

**CONSTRUCCIÓN Y EXPLORACIÓN DE UN REPERTORIO DE TÉCNICAS
ANALÓGICAS DE *FORM-FINDING* PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE
PRODUCTOS**

Ever Patiño Mazo

**Universidad EAFIT
Escuela de Ingeniería
2018**

**CONSTRUCCIÓN Y EXPLORACIÓN DE UN REPERTORIO DE TÉCNICAS
ANALÓGICAS DE *FORM-FINDING* PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE
PRODUCTOS**

EVER PATIÑO MAZO

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería

Director: JORGE HERNÁN MAYA CASTAÑO

**MEDELLÍN
UNIVERSIDAD EAFIT
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
2018**

Agradecimientos

El investigador agradece al Director de la tesis, profesor Jorge Maya por su asesoría amable, acertada, profusa y confiable. A los integrantes del Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño (GRID) de la Universidad EAFIT por sus observaciones y recomendaciones. A los integrantes de la Línea de Investigación en Morfología Experimental de la Universidad Pontificia Bolivariana, especialmente a los profesores Andrés Valencia, Alejandro Zuleta y Paula Chacón por sus asesorías constantes y por su habilidad para soportar el desorden producto de este proyecto. Al profesor de la Universidad de Antioquia, mi amigo Andrés Felipe Estrada, por sus correcciones y recomendaciones alrededor de los fenómenos físicos. A los integrantes del Semillero Morfolab de la Universidad Pontificia Bolivariana: Valeria Londoño, José Agudelo, Juliana Vélez y Camila Aguirre, por su trabajo constante y amistad. Y por último, a mi colega, amiga y esposa Sandra Vélez por estar siempre conmigo.

Contenido

Resumen

1. Introducción	7
1.1. Diseño de productos	7
1.2. Form-Finding	9
1.3. Problema	11
1.4. Estado del arte	13
1.5. Objetivos	15
1.6. Estructura del documento	15
2. Marco teórico	16
2.1. Generación de la forma	16
2.2. Representación en diseño	19
2.3. Creatividad y estímulos en la generación de la forma	21
3. Metodología	22
3.1. Objetivo específico A: Identificar técnicas	23
3.2. Objetivo específico B: Construir repertorio	24
3.2.1. Metodología para la caracterización conceptual, matemática y empírica	24
3.2.2. Metodología para la exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas...27	
3.3. Objetivo específico C: Proponer pautas	28
3.3.1. Metodología para la estimación cualitativa del potencial de aplicación en el diseño de productos de las técnicas del repertorio	28
3.3.2. Metodología para la medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas del repertorio	31
3.3.3. Descripción de las pautas metodológicas para aplicar de las técnicas	31
3.4. Objetivo específico D: Desarrollar hipótesis	31
4. Resultados y discusión	32
4.1. Identificación de las 40 técnicas de <i>form-finding</i> analógico (Objetivo específico A. Identificar técnicas)	32
4.2. Caracterización conceptual, matemática y empírica de las 40 técnicas (Objetivo específico B. Construir repertorio)	35
4.3. Exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas (Objetivo	

específico B. Construir repertorio y objetivo específico C. Proponer pautas)	48
4.3.1. Selección del material para la técnica	48
4.3.2. Análisis de la deformación de los resultados de la técnica	52
4.3.3. Análisis estructural de los resultados de una de las técnicas	55
4.3.4. Generación de variedad de formas con la técnica	58
4.4. Estimación cualitativa de aplicabilidad en el diseño de productos de las	
40 técnicas del repertorio (Objetivo específico C. Proponer pautas)	61
4.4.1. Eficacia de las técnicas	62
4.4.2. Eficiencia de las técnicas	66
4.4.3. Efectividad cualitativa de la ideación	70
4.4.4. Facilidad de aprendizaje de las técnicas	73
4.5. Medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas (Objetivo C.	
Proponer pautas)	76
4.5.1. Proceso de evaluación	79
4.5.2. Análisis de los resultados de la prueba	85
4.6. Descripción de pautas metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas	
(Objetivo específico C. Proponer pautas)	87
4.7. Formulación de las hipótesis que se deducen de los conceptos y resultados promisorios	
(Objetivo específico D. Desarrollar hipótesis)	88
4.7.1. Esquema resultado de la construcción del repertorio	89
4.7.2. Esquema resultado de la proposición de pautas metodológicas	
para la aplicación de las técnicas	90
4.7.3. Presentación de hipótesis	92
5. Conclusiones	95
5.1. Limitaciones	96
5.2. Trabajo futuro	96

Referencias bibliográficas

Referencias de las figuras

Anexos

Lista de figuras

Figura 1. (a) Técnica de modelado de cadenas con espejo en la parte inferior similar a la utilizada por Gaudí en la Sagrada Familia. (b) Técnica de burbujas jabonosas similar al proceso que utilizaba Frei Otto.

Figura 2. Características generales a nivel cognitivo del *form-finding* analógico y computacional.

Figura 3. Esquema del modelo de Rowena Reed, según la cronología de sus cursos (Hannah, 2002).

Figura 4. Términos y ecuaciones de búsqueda.

Figura 5. Matriz de doble entrada para el registro y síntesis de las 40 técnicas.

Figura 6. Instrumento de registro de la exploración empírica de las técnicas.

Figura 7. Matriz de las técnicas para registrar la posibilidad de maximizar y minimizar características.

Figura 8. Resumen fotográfico de uno de los modelos desarrollados en cada una de las técnicas..

Figura 9. Resumen del repertorio con las principales categorías de análisis.

Figura 10. Caracterización de la técnica (4) “células ligeras”.

Figura 11. Caracterización de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

Figura 12. Caracterización de la técnica (14) “Partículas de arena y vibración”.

Figura 13. Agrupación y descripción de las ecuaciones matemáticas asociadas al principal proceso físico de cada técnica.

Figura 14. Características generales de la fuente de calor del equipo para termoformar.

Figura 15. Experimentos para seleccionar el material de la técnica (24) películas plásticas y gravedad.

Figura 16. Prueba de deformación circular.

Figura 17. Prueba de deformación irregular.

Figura 18. Análisis físico de las tensiones y la influencia de la gravedad, en una película plástica con suministro de calor en la parte superior, y anclaje en el área plana.

Figura 19. Análisis estructural de la prueba de deformación circular.

Figura 20. Análisis estructural de la prueba de deformación irregular.

Figura 21. Esquema del proceso de experimentación semiestructurada con la técnica (24) películas plásticas y gravedad.

Figura 22. Resultados de la exploración semiestructurada con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

Figura 23. Categorías de diseño de productos basada en la clasificación propuesta por los concursos de diseño: *A' Design Award & Competition* (2018) y *RedDot Design Award* (2018).

Figura 24. Matriz gráfica de las categorías de productos de diseño vs todas las técnicas, donde se consignan el número de bocetos desarrollado.

Figura 25. Matriz con los valores numéricos de los bocetos desarrollados en cada técnica para cada categoría de productos.

Figura 26. Estimación de la eficacia a partir de las categorías de productos. Técnica (33) moldes flexibles y concreto.

Figura 27. Matriz de las variables a maximizar y/o minimizar vs todas las técnicas.

Figura 28. Matriz entre la inversión económica y la inversión en mano de obra vs todas las técnicas.

Figura 29. Clasificación geométrica de formas basada en Arbeláez & Patiño (2010).

Figura 30. Matriz de estimación de la efectividad cualitativa de la ideación vs técnicas.

Figura 31. Radar de la estimación de la efectividad de ideación de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

Figura 32. Matriz dificultad de aprendizaje vs técnicas con comentarios realizados por los integrantes del grupo focal.

Figura 33. Estimación de la dificultad de aprendizaje de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

Figura 34. Espacio para la sesión experimental.

Figura 35. Materiales y herramientas: Lápiz, borrador, sacapuntas, lapicero, Formato A y Formato B para los bocetos.

Figura 36. (a) *Board* para el Grupo Experimental y (b) (c) *Boards* para el Grupo Control (*RedDot Design Award, 2018; A' Award Design & Competition; 2018*).

Figura 37. Proceso de generación de ideas.

Figura 38. Resultados del nivel creativo del grupo experimental (GE) y el grupo control (GC) en cada uno de los enunciados.

Figura 39. Atributos para la silla tipo poltrona con sus respectivos pesos en la puntuación global.

Figura 40. Atributos para la lámpara de piso con sus respectivos pesos en la puntuación global.

Figura 41. Boceto de lámpara 1 del sujeto 1 del GC.

Figura 42. Árboles de funciones de los bocetos del sujeto 1 GC para las lámparas de piso.

Figura 43. Bocetos del sujeto 1 GC para las lámparas de piso.

Figura 44. Criterio de calidad de las propuestas en relación con su factibilidad productiva.

Figura 45. Algunos bocetos de lámparas del GC y el GE para ver la influencia positiva en la variedad y en la cantidad de las propuestas del GC.

Figura 46. Algunos bocetos de sillas del GC y el GE para ver la influencia positiva en la novedad de las propuestas del GE.

Figura 47. Mapa conceptual de la profundización de la definición del término *Form-finding*. Autoría propia.

Figura 48. Mapa conceptual estimación de potencial de aplicación al diseño de producto. Autoría propia.

Figura 49. Mapa conceptual de relaciones promisorias e hipótesis.

Resumen

Se presenta un repertorio de técnicas analógicas de *form-finding* y una exploración de su potencial aplicación en el diseño de productos. En la actualidad, las técnicas de *form-finding* están disgregadas y se presentan con diferentes enfoques y profundidades; además, han sido utilizadas sobre todo en la arquitectura y el diseño estructural, y no hay claridad sobre la manera de aplicarlas en el diseño de productos. La metodología que se siguió fue (i) caracterización conceptual, empírica y matemática de un repertorio de técnicas de *form-finding* a partir de una revisión documental, (ii) evaluación cuantitativa de las propiedades físicas y geométricas de una de las técnicas, (iii) evaluación cualitativa para generar variedad de formas con una de las técnicas, (iv) evaluación cualitativa de la aplicabilidad de las técnicas del repertorio utilizando grupos focales e información recolectada en la caracterización, para valorar la eficacia, la eficiencia, la efectividad cualitativa de ideación y la facilidad de aprendizaje, (v) medición cuantitativa de la efectividad de la ideación de una de las técnicas, utilizando protocolos controlados en un grupo control y un grupo experimental, y (vi) desarrollo de mapas conceptuales para identificar relaciones promisorias entre conceptos y resultados obtenidos del análisis en las fases metodológicas anteriores. Los resultados son (i) un repertorio de 40 técnicas de *form-finding* que se pueden utilizar en el diseño de producto de manera analógica o computacional, (ii) pautas metodológicas para la aplicación de las técnicas, y por último, (iii) formulación de hipótesis de investigación fundadas en los resultados anteriores. Al final se presentan las conclusiones, que incluyen la manera de usar el repertorio y la metodología utilizada, un acercamiento a los límites conceptuales y procedimentales de la relación *form-finding* y diseño de productos, las tendencias en el estudio del *form-finding*, las limitaciones de la investigación y el trabajo futuro.

Palabras clave: *form-finding*, generación de la forma, creatividad, diseño industrial, diseño de productos, medición de la ideación.

1. Introducción

La fase donde se genera la forma dentro del proceso de diseño es usualmente una de las más complejas y confusas, ya que el diseñador debe integrar de manera simultánea soluciones a requerimientos técnicos, estéticos, funcionales y productivos. Además, la respuesta a estos requerimientos, así como la búsqueda de materiales, procesos de manufactura y posibles geometrías, no son exhaustivas, haciendo que desde un punto de vista cognitivo, el desarrollo y evaluación de las formas físicas pertinentes sea, tal vez, el problema central que enfrenta el diseñador (Purcell & Gero, 1998).

Es por esto que se presenta un repertorio de técnicas analógicas de *form-finding* que puede ayudar a generar ideas en esta fase del proceso de diseño, brindando herramientas cognitivas y técnicas para alterar el estado pasivo del diseñador (Goldschmidt, & Smolkov, 2006; Goldschmidt, 2015), visualizar de manera temprana las propuestas de diseño (Patiño & Maya, 2018), generar formas con características geométricas similares a las encontradas en la naturaleza viva e inerte (Otto & Rasch, 2001), aumentar el tamaño de vocabulario morfológico de cada diseñador (Hopf, 2009), comprobar tan pronto como sea posible propiedades técnicas y estructurales de la propuesta (Römer, et al., 2001). Finalmente, estas técnicas analógicas de *form-finding* generarán formas que se auto organizan y debido a lo anterior, tendrán una alta probabilidad de presentar altas cualidades estéticas (Bejan & Lorente, 2013).

1.1. Diseño de Productos

El diseño de productos es la disciplina encargada del diseño y desarrollo de nuevos productos (DNP), que apoya la integración de las actividades y el equipo de trabajo, para cumplir con las necesidades y deseos de los clientes, y los intereses de las partes involucradas en el proceso (Cagan & Vogel, 2005). La disciplina busca crear experiencias que las personas consideren gratificantes y valiosas (Cagan & Vogel, 2002), a partir de darle respuesta a la oportunidad del mercado encontrada, con un producto físico que es fabricado, vendido y entregado (Ulrich & Eppinger, 2009).

Por otro lado, el diseño industrial interviene en la etapa del DNP donde es necesaria la traducción de las necesidades en requerimientos, y los requerimientos en geometrías y formas. Según el World Design Organization¹ (WDO) el diseño industrial es: una actividad estratégica que aprovecha la creatividad y la innovación para resolver problemas que mejoran las esferas económicas, sociales y ambientales del ser humano a través de productos, sistemas o servicios (WDO, 2018). En este caso

¹ Anteriormente llamado International Council of Societies of Industrial Design (Icsid)

solo es de interés los productos físicos, entendidos como objetos donde se traducen necesidades del usuario relacionados con la funcionalidad, la usabilidad y la experiencia (Jordan, 1998), en formas tangibles tridimensionales (Arbeláez & Patiño, 2010).

La forma para el diseño industrial se puede definir como la característica que permite identificar un volumen (Wallschlaeger, Busic-Snyder, & Morgan, 1992), y que le permite al usuario percibirlo, a través de los sentidos, como un conjunto de elementos que se organizan como un todo (Quarante, 1992; Abidin, 2012), con el objetivo de responder a unas necesidades definidas en el planteamiento del problema de diseño.

Ahora bien, a la etapa donde se desarrolla la forma se le asignan diferentes nombres de acuerdo al modelo empleado, como por ejemplo, *concept design* o *embodiment design*; en el presente texto se le llamará Fase de generación de la forma. Es en ella donde se definen las principales características que determinarán aproximadamente el 70% de los costos finales del producto (Römer, et al., 2001) y es también donde recae, según Bouroullec y Bouroullec, dos diseñadores industriales ampliamente conocidos, la tarea de encontrar nuevas formas, nuevas estructuras y nuevas formas de construcción (Terstiege, 2009).

Para agilizar el tránsito por la generación de la forma los diseñadores usan diferentes estrategias, tales como buscar precedentes en Pinterest y revistas impresas o digitales especializadas, visitar blogs (Mougenot, Bouchard, & Aoussat, 2007), construir diferentes tipos de *boards*, como *mood*, *life-style* y *visual-theme* (Baxter, 1995), o analizar productos con características afines. Dentro de estas estrategias se encuentran también los sistemas generativos, los cuales generan de manera más o menos automática una gran cantidad de formas a través de la manipulación de diferentes variables de un modelo matemático. Para ello, se utilizan diferentes *softwares* que permiten la programación de reglas, con el fin de encontrar geometrías que respondan mejor a los requerimientos planteados. Posteriormente, dichas geometrías deben ser evaluadas y adaptadas a las condiciones iniciales del proyecto (Celani, 2008; Burry & Maher, 2008).

El diseño generativo presenta diferentes características que lo convierten en una herramienta útil y práctica, entre ellas, que es un sistema que automatiza la Fase de generación de la forma (Shea, Aish, & Gourtovaia, 2005; Singh, & Gu, 2012), permitiendo generar numerosas posibilidades a partir de las formas iniciales, manipulando de manera controlada las variables de la forma (Szalabaj, 2014); la mayoría de los *softwares* de diseño generativo permiten una transición fácil a la manufactura digital. Permiten además generar formas novedosas o de una complejidad que por otros medios serían muy difíciles de lograr (McCormack, Dorin, & Innocent, 2004; Menges, 2005; Chase, 2005).

Dentro de los sistemas generativos, se encuentran técnicas analógicas y computacionales basadas en principios físicos y/o biológicos que se agrupan bajo el término común de *form-finding*.

1.2. Form-Finding

Las técnicas *form-finding* son estrategias basadas en reglas y principios físicos que propician procesos de transformación a partir de la interrelación entre la forma, la estructura y el material (Motro, 2009; Li, Borgart & Wu, 2017; Agkathidis, 2013). Estas reglas son usualmente algoritmos de diferente complejidad, conformados por una entrada, un proceso de manipulación controlada de variables y una salida. El seguimiento de las reglas y los principios físicos posibilitan la construcción de formas que mediante la auto-organización, generan formas similares a los patrones geométricos encontrados en la formación de la naturaleza viva e inerte (Otto & Rasch, 2001).

La auto organización, se refiere a la capacidad que tienen algunos sistemas físicos y/o biológicos de organizarse y cambiar autónomamente su morfología (Otto, 2001). En el *form-finding* esta capacidad está influenciada y restringida por las mismas fuerzas mecánicas y fuerzas fundamentales que influyen y restringen la generación de las geometrías en la naturaleza viva o inerte. La imitación de ese proceso de transformación, conlleva la generación de formas similares a las encontradas en la naturaleza, y con frecuencia a la generación de formas armónicas y bellas (Thompson, 1942; Stach, 2010; Bejan & Lorente, 2013). Además, la imitación de la naturaleza ha demostrado en el diseño que el producto final puede adquirir características que lo harán atractivo visualmente y eficiente en términos de capacidad estructural y economía de materiales (Vincent, et. al., 2006; Jirapong, Krawczyk, & Elnimeiri, 2002; Wen, et. al., 2008; Hemberg, et. al., 2006).

Los precursores del *form-finding* fueron los arquitectos Antoni Gaudí (1852-1926) y Frei Otto (1925-2015). Ambos exploraban las propiedades de las fuerzas mecánicas para generar formas y estructuras. Gaudí utilizó, por ejemplo, la técnica de modelado de cadenas que el mismo desarrolló para diseñar la Sagrada Familia en Barcelona (Figura 1a). La técnica se basa en dejar colgar una serie de cuerdas previamente humedecidas con pesos cada tantos segmentos y por la acción de la gravedad y la capilaridad, estos se van agrupando y generan curvas catenarias, configuraciones que se han demostrado que al ser invertidas funcionan óptimamente para distribuir las fuerzas de compresión (MRGD, 2008).

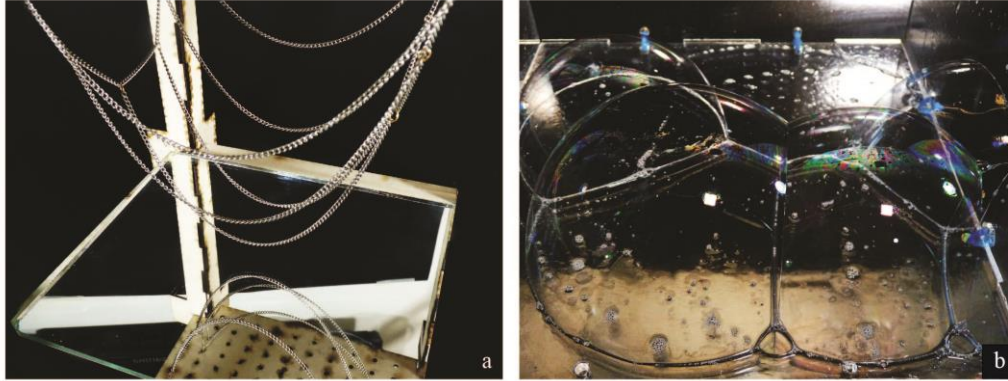


Fig. 1. (a) Técnica de modelado de cadenas con espejo en la parte inferior similar a la utilizada por Gaudí en la Sagrada Familia. (b) Técnica de burbujas jabonosas similar al proceso que utilizaba Frei Otto. Fotografías de: Ever Patiño.

Posteriormente, Frei Otto, quién sistematizó el proceso de utilizar las fuerzas mecánicas para buscar estructuras espaciales como cúpulas y cubiertas, acuñó el término *form-finding* (Schumacher, 2008, p.6; Symeonidou, 2016, p.322) y desarrolló diferentes técnicas para ser exploradas analógicamente en un laboratorio, controlando las variables intrínsecas al experimento, como la tensión, la compresión, el magnetismo y la gravedad, las cuales exhiben cualidades de auto-formación y auto-organización presentes también en las formas naturales vivas e inertes (Figura 1b). Por analógico, se entiende el uso de materiales reales para la construcción manual de modelos y maquetas físicas.

En la actualidad, los arquitectos Frank Gehry y Toyo Ito son conocidos por iniciar sus experimentaciones formales analógicas para luego traducirlas a un lenguaje computacional, ya sea programando su propio software o utilizando herramientas de otros desarrolladores. Igualmente, es usual que el proceso analógico o manual anteceda al proceso computacional o digital. Aunque ambos enfoques propicien la exploración rápida de formas (Chase, 2005; McKay, et. al., 2009) y el desarrollo de geometrías complejas que por otros medios serían difícil encontrarlas (McCormack, Dorin & Innocent, 2004), los dos tienen diferentes fortalezas. El enfoque computacional, por ejemplo, permite un nivel mayor de automatización, exactitud y proximidad a la fabricación digital (Singh & Gu, 2012), pero el enfoque analógico posee fortalezas a nivel cognitivo (ver figura 2) que lo hacen idóneo para ser utilizado como recurso creativo en la Fase de generación de la forma. Asimismo, el enfoque analógico permite transitar por áreas del espacio de diseño, como la generación de formas de alta complejidad, que para hacerlas digitalmente, se necesitaría el uso de algoritmos complejos, programación y una alta inversión en tiempo.

<i>Form-finding analógico</i>	<i>Form-finding computacional</i>
El diseñador puede sentir la representación, comprender y modificar el objeto (Wendrich, 2010).	El diseñador observa, pero no interactúa con la representación virtual (Krish, 2011).
Es efectiva, rentable, sin pérdida de tiempo, y sin consumo energético (Römer, et. al., 2001; Goldschmidt, 2014).	Manipulación de variables matemáticas en paralelo con la geometría, sin tener contacto físico con los materiales (Oxman & Rosenberg, 2007).
Pensamiento creativo por bucles de retroalimentación y por la interacción con los materiales (Wendrich, 2010).	Cambios entre un pensamiento creativo y un pensamiento sistemático y matemático en la programación de las reglas (Dino, 2012).
Libre de costos cognitivos, libera carga de memoria (Goldschmidt, 2014).	Alto consumo de recursos cognitivos por causa del tipo de representación (Goldschmidt, 2014).
Mejora la coordinación mano-ojo y altera el estado pasivo del diseñador (Goldschmidt, 2014; Megahed, 2017).	Tiende a un estado emocional pasivo, sin estímulos externos (Goldschmidt, 1991)
Aprendizaje experiencial y significativo en la medida que integra todos los sentidos (Kolb & Kolb, 2012).	Aprendizaje asociativo, basado en la memoria. (Dincer, Tong, & Cagdas, 2012).

Fig. 2. Características generales a nivel cognitivo del *form-finding* analógico y computacional. Autoría propia.

1.3. Problema

Aunque en la arquitectura se ha demostrado que la utilización de estrategias de diseño generativo y *form-finding*, tanto analógico como computacional, genera una variedad de soluciones atractivas, novedosas y eficientes, esto ha ocurrido de manera ocasional en el diseño de producto. En específico, Nordin y otros (2011) mencionan que, comparado con la arquitectura, en el diseño industrial hay pocos referentes de diseño generativo, y los existentes no están documentados o publicados; sólo se menciona su utilización sin profundizar en el procedimiento.

Así mismo, las técnicas de *form-finding* están disgregadas y se presentan con diferentes profundidades y enfoques; algunos artículos se centran en la descripción de las variables matemáticas para la optimización estructural y la posterior programación computacional, pero descuidan la metodología de aplicación, por ejemplo: Bletzinger & Ramm (2001); en otros, por ejemplo Otto & Rash (2001), no se definen con precisión las variables, ni las características de las entradas de información y las salidas de información, así como los materiales y variables utilizadas, y todas las posibilidades geométricas resultantes. Por último, la mayoría de los artículos se centran en desarrollar una técnica para una aplicación particular en arquitectura, por ejemplo: Thönnissen (2014). En otras palabras, no se conoce cuáles son los elementos que definen la relación amplia entre el diseño de producto y el *form-finding*, y tampoco cómo se establece dicha relación.

Por otro lado, componer y generar la forma, para que responda de manera cuidadosa, simultánea y armónica a los requerimientos sigue siendo un problema complejo dentro del proceso de diseño, tanto para diseñadores novatos como expertos (Purcell & Gero, 1998; Wendrich, 2010). El diseñador debe solucionar estéticamente el producto mientras da respuesta a las restricciones técnicas, funcionales y productivas. Debe incitar respuestas estéticas y emocionales positivas por medio de la forma (Catalano, et al., 2002), debe mediar y equilibrar las propiedades que hacen que la forma sea más o menos típica, más o menos novedosa, que se perciba o no como una unidad, para que se pueda ajustar coherentemente con las características del usuario y el contexto de uso determinados inicialmente en la problematización (Post, Blijlevens & Hekkert, 2013; Thurgood, Hekkert, & Blijlevens, 2014).

Igualmente, en esta fase recae gran parte del nivel creativo de la propuesta de diseño, ya que la comprensión que tenga el diseñador de las geometrías tridimensionales, interviene en el razonamiento visual, es decir, el nivel cognitivo de concluir e inferir información con base en los datos visuales del dibujo o la maqueta observada (Egenhofer, 2015). De la misma manera, el razonamiento visual está directamente relacionado con la capacidad de generar creativamente propuestas más novedosas; esto quiere decir, que entre mayor sea el nivel de razonamiento visual, mayor será la capacidad del diseñador de proponer formas que rompen con lo convencional (Oxman, 1997; Yilmaz, Park, Kim, 2008; Park, & Kim, 2007). Esto se debe a que en el proceso creativo se transita espontáneamente del pensamiento analítico al asociativo (Gabora, 2010), y se generan bucles de retroalimentación ágiles y constantes, que posibilitan que en cortos períodos de tiempo y con poco esfuerzo cognitivo, el diseñador pueda generar mayor número de representaciones internas. Las ideas circulan rápidamente entre el reconocimiento por medio de la asociación, el análisis a partir de la lógica, y la generación de nuevas propuestas por medio del pensamiento creativo (Goldschmidt, 2014; Singh & Gu, 2012; Johnson, et al., 2009).

Este proceso creativo en la Fase de generación de la forma se ha visto menguado por el distanciamiento o brecha entre las herramientas analógicas y las computacionales (Römer, et al., 2001). Los diseñadores utilizan cada vez más las herramientas computacionales para buscar la forma, lo que tiene varios efectos: (i) ocasiona una pérdida en la comprensión de las propiedades de los materiales y de los efectos del entorno (Oxman & Rosenberg, 2007; Ahlquist & Menges, 2012; Goldschmidt, 2014); (ii) no proporcionan estímulos externos necesarios para dar respuestas creativas (Shea, Aish & Gourtovaia, 2005); (iii) aumenta el esfuerzo cognitivo y el consumo de tiempo en etapas tempranas, lo que (iv) disminuye la eficiencia para explorar formas (Dino, 2012; Chen, Lim & Shao, 2015) y (v) reduce la generación de conceptos emergentes a partir del razonamiento visual (Goldschmidt, 1991; Yilmaz, Park, Kim, 2008).

Es por todo lo anterior, y con la intención de determinar los elementos que definen la relación entre el diseño de producto y el *form-finding*, e identificar como se establece dicha relación, que se propone las siguientes preguntas de investigación exploratoria: (i) ¿Cómo soportar el proceso de generación de la forma en el diseño de producto usando el *form-finding* analógico? Y (ii) ¿Cómo soportar el proceso creativo del diseño de producto haciendo uso del *form-finding* analógico?

1.4. Estado del arte

El Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart, Alemania (*Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart*) publicó una serie de libros que titularon “IL”, basados en las investigaciones Otto, entre los que destacan: IL1 “*Minimal Nets*” (Otto, 1971), IL 10 “*Grid shells*” (Hennicke, 1974), IL22 “*Form*” (Otto, 1988), IL25 “*Experiments*” (Gaß, 1990), IL39 “*Non-planned settlements*” (Schaur, 1992) e IL35 “*Pneu and bone*” (Otto, 1995). Las publicaciones estudian las técnicas de *form-finding* desde dos perspectivas, cómo fenómenos abstractos y como referentes para el diseño de cubiertas y domos. En los dos casos, son perspectivas que no permiten una adaptación clara al diseño de producto, puesto que los requerimientos y en definitiva, la relación con el ser humano cambia. Mientras que en el diseño de cubiertas y domos el ser humano puede ingresar y habitar la forma, en el diseño de productos, el ser humano manipula la forma.

De igual modo, Otto y Rash (2001) hacen quizás la revisión más completa de *Form-finding* hasta la fecha. Exponen 10 técnicas, pero sin profundizar en las variables que se manipulan, centrándose en la importancia conceptual y su potencial de aplicación en arquitectura. Por otro lado, Hopf (2009) propone una clasificación que él llama Repertorio Morfológico, basado en la naturaleza y las matemáticas, que el diseñador puede utilizar como un repositorio infinito de formas posibles. La categorización se organiza jerárquicamente, sin hacer descripciones y al final se argumenta su potencial de aplicación en el diseño algorítmico, paramétrico y/o generativo.

Gaß (2016) propone un esquema gráfico sin descripciones, de dos clasificaciones de técnicas de auto-formación que pueden servir para entender los modelos físicos analógicos en diseño arquitectónico, uno basado en las formas resultantes y otro basado en las fuerzas que las generan. En las formas resultantes se encuentran los elementos lineales, los elementos que forman superficies, los elementos espaciales, y los elementos que están en el espacio pero dependen del tiempo, como las ondas; y en las fuerzas: la tensión, la compresión y el doblado. Aunque esta clasificación hace parte del marco

teórico, el autor se centra en responder a 3 hipótesis que vinculan la autoformación con el diseño arquitectónico.

A diferencia de los ejemplos anteriores, que presentan repertorios o catálogos de técnicas relacionadas con el *form-finding*, la búsqueda en la literatura arroja revisiones que profundizan en las técnicas o en los procedimientos matemáticos que más se han utilizado en el diseño arquitectónico y estructural, como: *Form finding and optimization of membranes and minimal surfaces* (Bletzinger, 1998); *Review of form-finding methods for tensegrity structures* (Tibert & Pellegrino, 2011); *An overview and comparison of structural form finding methods for general networks* (Veenendaal & Block, 2012); *Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process* (Lienhard, et. al., 2013); *A Form-Finding Instrument for Reciprocal Structures* (Thönnissen, 2014); *From folds to structures, a review* (Lebée, 2015).

Por otro lado, para las matemáticas, la ingeniería, el arte y la educación también son relevantes las publicaciones sobre la técnica y los análisis matemáticos de plegar papel o superficies laminares de los *International Meetings of Origami Science, Mathematics, and Education*, como: *Origami 4* (Lang, 2009), y *Origami 5* (Wang-Iverson, Lang, & Mark, 2011). Pero además de contemplar sólo un grupo de técnicas, son publicaciones que no muestran una aplicabilidad directa al diseño de productos.

Aunque es clara la importancia del uso del diseño generativo en el diseño de productos, su utilización práctica está poco publicada, y es escasa la literatura científica que relaciona las técnicas *form-finding* con el diseño de productos. Frank Gehry diseñó la *Fog chair* basado en las arrugas de las láminas metálicas (Giovannini, 1999). La Universidad Pontificia Bolivariana desarrolló una investigación para el diseño de mobiliario fabricado con telas tensadas y rigidizado con fibra de vidrio y resina de poliéster (Sierra & Patiño, 2005). El diseñador Kyungeun Ko desarrolló en el 2013 para Bentley™ el modelo de un carro de superficies metálicas plegadas (Lebée, 2015). La arquitecta Anne-Mette Manelius diseñó como parte de su tesis doctoral la *Ambiguous Chair*, utilizando concreto y encofrados flexibles de tela (Manelius, 2012). Los diseñadores Nordin, Hopf y Motte (2013) diseñaron una lámpara a partir del estudio de la tensión superficial de una gota de agua; El estudio chileno GT2P diseñó *Catenary Pottery Printer*, que posibilita el vertimiento de cerámica líquida sobre una tela elástica que cuelga por la acción de la gravedad (GT2P, 2015). Por último, el laboratorio de diseño REFORMA, estudió el crecimiento celular y su analogía con membranas elásticas para diseñar diferentes contenedores decorativos (Patiño, Arango & Jaramillo, 2015).

Aunque estos ejemplos puedan parecer numerosos, resultan aislados frente al vasto número de técnicas analógicas de *form-finding* que probablemente existen. Además, al provenir de diferentes fenómenos físicos, no permiten extraer elementos que sugieran cierta sistematicidad en su aplicación al diseño de producto, puesto que son aplicaciones en casos específicos.

1.5. Objetivos

Debido a las características del área de conocimiento y del problema identificado, el proyecto se centrará, desde un enfoque exploratorio, en indagar de una manera flexible la relación de las técnicas de *form-finding* con el diseño de producto. Por ello, se define como objetivo general: Explorar el potencial de aplicación de las técnicas de *form-finding* en el diseño de producto.

Objetivos específicos:

- A. Identificar técnicas de *form-finding* analógico a partir de una revisión documental.
- B. Construir un repertorio de técnicas de *form-finding* analógico a partir de su caracterización conceptual, matemática y empírica.
- C. Proponer pautas metodológicas para la aplicación de técnicas de *form-finding* en el diseño de producto, a partir de la estimación de su potencial aplicación y la identificación de los elementos creativos promisorios en la aplicación de dichas técnicas.
- D. Desarrollar hipótesis de investigación fundadas en los resultados anteriores.

1.6. Estructura del documento

Este documento presentará primero el marco teórico que fundamenta la investigación, luego se describirá la metodología de enfoque exploratorio para la recopilación, organización y análisis de información. Posteriormente, se describirán los resultados presentados a partir de los objetivos y la metodología. Para el objetivo específico A se presenta (i) la identificación de 40 técnicas analógicas de *form-finding*; para el objetivo específico B, (ii) una caracterización conceptual, matemática y empírica de las 40 técnicas del repertorio; para los objetivos B y C, (iii) una exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas; para el objetivo específico C, (iv) una estimación cualitativa de la aplicabilidad en el diseño de productos de las 40 técnicas del repertorio, (v) una medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas y (vi) descripción de las pautas

metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas; por último, para el objetivo específico D, se presenta (vii) una formulación de las hipótesis que se deducen de los conceptos y resultados promisorios. Finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación, se describen sus limitantes, se determinan áreas prioritarias para seguir creciendo el repertorio, y se formulan preguntas que podrían direccionar posteriores investigaciones.

2. Marco teórico

El marco teórico fundamenta conceptualmente el repertorio y su construcción está constituido por tres áreas de conocimiento. La primera es la generación de la forma, presentada como fase dentro del proceso de diseño, como estrategia para ayudar en el proceso creativo, y como problema pedagógico en la enseñanza del diseño industrial. La segunda es la Representación del diseño: en esta se demuestra su importancia dentro del proceso de diseño, y se presenta su relación con la generación de la forma y la creatividad. Y la tercera es la Creatividad y los estímulos en la generación de la forma, presentada como problema cognitivo relacionado con el proceso de diseño.

2.1. Generación de la forma

Comprender el proceso de diseño proporciona una base para enfocar los recursos en la enseñanza del diseño, en las investigaciones sobre diseño y en los proyectos de diseño dentro de la empresa (Howard, Culley, & Dekoninck, 2008). Existen diversos modelos del proceso de diseño dividiéndolo en diferentes fases y etapas. Howard, Culley y Dekoninck (2008) revisaron 23 modelos y concluyeron que, aunque cambien de nombre y énfasis, todos presentan 4 fases principales: *analysis of task*, *conceptual design*, *embodiment design* y *detailed design*. Algunos modelos presentan una fase preliminar de *Establishing a need phase* y otros una fase posterior de *Implementation phase*. La fase donde se genera la forma a partir de un concepto de diseño inicial o de ideas preliminares se ubica, según el modelo, en la fase de *conceptual design* o en la fase de *embodiment design*; para esta investigación se llamará Fase de generación de la forma.

Igualmente, se han desarrollado modelos que describen la Fase de generación de la forma, los cuales se pueden clasificar en modelos intuitivos y modelos lógicos. Los intuitivos propician la inducción a partir de un pensamiento divergente e imaginativo, y los lógicos posibilitan la deducción a partir de

un pensamiento convergente, deductivo y racional (Shah, Smith, & Vargas-Hernandez, 2003; Lawson, 2006; Morello, et.al., 2011; Grabska, 2015).

Todos los modelos de generación de la forma tienen en común, que el diseñador debe representar de diferentes maneras, ya sea con lápiz y papel, cartón o arcilla, las soluciones que respondan de una manera más o menos ajustada al concepto de diseño inicial, las ideas preliminares y al análisis de la tarea efectuado. Esto no es una tarea sencilla, pues tanto el diseñador novato como el experto, deben integrar al mismo tiempo requerimientos de diversa índole en una forma individual, lo que hace que esta fase sea difícil de enseñar y dominar (Rampino & Gorno, 2011), y convirtiéndose, quizá, en el problema más confuso que el diseñador deba solucionar (Purcell & Gero, 1998; Römer, et al., 2001; Akner-Koler, C. 2012).

Debido a lo anterior, se han desarrollado modelos y estrategias para enseñar a generar la forma y para dinamizar procesos de generación formal en proyectos de diseñadores expertos. Sobre todo en los primeros años de formación en diseño industrial se privilegian enfoques analógicos sobre los computacionales, pues como ya se ha visto (ver tabla 1), posibilitan un aprendizaje experiencial que integra todos los sentidos (Kolb & Kolb, 2012), y posibilita comprender y modificar el objeto en tiempo real (Wendrich, 2010).

Dentro de los modelos analógicos, existen dos enfoques que prevalecen: el cognitivo y el estético. Dentro del enfoque cognitivo, Mckim (1980) presenta un modelo de resolución de problemas que esquematiza con tres círculos que se intersectan. El primer círculo es la imaginación, el segundo es la visión y el tercero es el dibujo. Igualmente, Rosenman y Gero (1993) presentan el Modelo de diseño por prototipos, el cual, desde un enfoque creativo y cognitivo, se basa en los prototipos de diseño, es decir, en la selección de propiedades específicas en diseños satisfactorios existentes a partir de cuatro herramientas creativas: combinación, mutación, analogía y diseño con los principios primeros. Desde la misma perspectiva, el modelo *Geneplore* (Finke, Ward & Smith, 1992; Finke, 1993) propone un modelo contrario a la “forma sigue a la función”; en este caso, los autores sostienen que en la fase de formalización, el explorar formas antes de configurar una forma final que responda a la función, puede dar lugar a formas que ellos llaman *preinventivas*, las cuales tienen cualidades que estimulan la creatividad, como la novedad, la ambigüedad y la generación de formas inesperadas.

Similar al modelo de Mckim, Purcell y Gero (1998) proponen un modelo de resolución de problemas que integra el dibujo con el proceso de diseño, a través de tres momentos cognitivos: (i) reconocimiento del problema, (ii) generación de representaciones externas como dibujos y (iii) deducción de información de las representaciones. Igualmente, Yilmaz, Park y Kim (2008),

proponen un modelo de razonamiento visual vinculado con la creatividad, profundizando en la idea de Mckim. De igual manera, Ching y Juroszek (2010) justifican la importancia del dibujo en el proceso de diseño a partir de la iteración del ver, imaginar y dibujar.

Por otro lado, desde el enfoque estético, Hannah y sus colaboradores (2002) presentan el modelo que Rowena Reed utilizaba en sus clases (ver figura 3), donde exploraba conceptos como: los elementos generadores, los volúmenes dominantes, subdominantes y subordinados y los principios de composición, mediante el tránsito por diversas etapas que ella llamaba fundación, estudios avanzados de la forma, estudios en el espacio y desarrollo. De manera similar, Ocvirk y otros (2002) proponen el modelo de *Form-generation*, en él, a partir de medios y herramientas de representación, se toman los elementos generadores de la forma: líneas, formas, planos, texturas y colores, y los principios de organización para generar una unidad.

Partes	Contenidos	Principios	Representación
Fundación	Volúmenes rectilíneos	Volúmenes dominantes, sub-dominantes y sub-ordinados	Bocetos de proporción y modelos de estudio
	Volúmenes curvilíneos		
	Volúmenes rectos y curvos	Proporciones globales, inherentes y comparativas	
	Fragmentos	Composiciones bellas, unificación visual	
	Construcciones planares	Contraste entre formas Balance	
Estudios avanzados de la forma	Líneas en el espacio	Relaciones de tensión	Modelos físicos mejorados con materiales finales
	Construcción	Interrelación entre los componentes	
	Convexidad	Formas orgánicas	
Concavidad			
Estudios en el espacio	Análisis del espacio	Introducción al espacio	
	Diseño espacial	Cualidades de los espacios interiores	
Desarrollo	Diseño para la producción	Respuesta a requerimientos funcionales ergonómicos y materiales	Prototipos

Contenidos acumulativos y con aumento de complejidad

Fig. 3. Esquema del modelo de Rowena Reed, según la cronología de sus cursos (Hannah, 2002). Adaptación del autor basado Hannah, 2002.

Desde otro punto de vista, Rampino y Gorno (2011) proponen el modelo *Form giving* con el objetivo de adentrarse en la generación formal, mientras se estimulan las habilidades de análisis morfológico y de asignación del carácter de la forma. Rahe, Babapour y Rehammar (2012) proponen el modelo FAEDA (*Formal aesthetics design approach*), en el que dividen la etapa de formalización en dos partes. En la primera se realiza una exploración de las formas estéticas por la variación de los parámetros geométricos básicos; y en la segunda parte se eligen las formas abstractas más interesantes para contextualizarlas eligiendo un escenario para desarrollar la función de las mismas.

Retomando un enfoque similar al modelo de Reed (Hannah, 2002), Akner-Koler (2012) propone el Modelo evolutivo de la forma. El modelo consta de dos ejes que conforman una matriz, el eje horizontal contiene 7 etapas: unir, intersectar, dividir, adaptar, combinar, distorsionar y etapa orgánica; y los ejes verticales contienen los valores bipolares en cada etapa; por ejemplo, en la etapa orgánica: cóncavo y convexo. El modelo está propuesto de tal modo que permita realizar operaciones en la forma, avanzando gradualmente hacia una configuración más compleja.

En conclusión, todos los modelos revisados son disciplinar y conceptualmente variados. La mayoría presenta enfoques intuitivos, con un predominio de lo descriptivo sobre lo explicativo, y dejan tácita la evaluación estética de las formas generadas, así como, la inserción de los mismos en todo el proceso de diseño.

Ahora bien, ¿cómo se entenderían entonces las técnicas de *form-finding* a la luz de la anterior revisión? El *form-finding* también es una estrategia de generación formal que según la perspectiva de exploración, mezcla lo intuitivo con lo lógico, en la medida en que se deben determinar unas variables de experimentación, pero es en el proceso de convertir las entradas en salidas, donde el diseñador aprovecha los diferentes estímulos para encontrar nuevas oportunidades, reinterpretar las formas, y si es el caso, comenzar nuevamente un bucle creativo con la incorporación de otras variables. De la misma manera, a las técnicas de *form-finding* analógico en el proceso de generación de la forma, les son intrínsecas las técnicas de representación, pues el diseñador está generando una representación mental de lo que podría generar la técnica, mientras representa manualmente las formas físicas que resultan del proceso.

2.2. Representación en diseño

En ciencias cognitivas, una representación consiste en un estado interno, o representación interna, el cual corresponde a algo del mundo que es representado (Markman, 2005; Maya & Patiño, 2018). En diseño se considera que hay representaciones internas y externas (Goldschmidt, 1991; Porter &

Goldschmidt, 2004). Las internas son representaciones en la mente del diseñador. Las externas son materiales y concretas, que buscan presentar, de alguna manera, un modelo tangible de un contenido mental (Maya & Patiño, 2018). Esta tarea no es sencilla, pues se debe pasar de una representación interna, en la que el diseñador consciente o inconscientemente le ha dado forma al producto en su mente, a una representación externa, en donde a partir de diferentes herramientas, en su mayoría manuales, el diseñador debe graficar lo que cognitivamente está solucionando (Goldschmidt, 2014; Johnson, et al., 2009; Oxman, 1997; Maya & Patiño, 2018).

Igualmente, es con las técnicas de representación que es posible generar dicha forma gráfica. Por ejemplo, es con puntos, líneas, figuras, volúmenes y texturas que se conforma lo representado (Tjalve 1979; Ching & Juroszek 2010; Massironi 2001; Wallschlaeger, Busic-Snyder & Morgan, 1992; Wong, 1993), ya sea con bocetos o sketches, o con modelos físicos en papel y cartón. Al respecto, Pei, Campbell y Evans (2009) presentan una taxonomía de 35 tipos diferentes de representaciones 2D y 3D usadas en diseño categorizadas en: bocetos rápidos, dibujos, modelos y prototipos.

Todos estos tipos de representaciones son muy importantes en diseño y aunque se han adelantado investigaciones de este tipo, la generación de ideas formales y su relación con el tipo de representación y la creatividad, sigue siendo un fenómeno comprendido de manera incompleta (Mougenot, Bouchard & Aoussat, 2007; Ackerman, 1996)

Sin embargo, es claro que las representaciones son un concepto clave para explicar cómo se presenta la creatividad en diseño, ya que mientras se está representando, se está solucionando, es decir, hay un procesamiento mental de información, que abstrae el problema, lo divide y lo externaliza mostrando paulatinamente la intención del diseñador (Restrepo-Giraldo, 2004; Schön, 1983; Cross & Roozenburg, 1992). Las representaciones externas también actúan como un referente visual-cognitivo dentro del equipo de diseño que es evocado a lo largo del proceso de generación de la forma, sirviendo entre otras cosas, para comunicar aspectos semánticos y emocionales relacionados con la forma, que serían de muy difícil explicación sólo utilizando el lenguaje oral y escrito.

Finalmente, la representación está directamente relacionada con la creatividad en la medida que tiene la función de auxiliar cognitivamente el proceso de diseño, es decir, libera la carga de memoria y de atención para que el diseñador pueda pensar más fácilmente (Goldschmidt & Porter, 2004). Esto hace, entre otras cosas, que las imágenes mentales y las representaciones visuales se relacionen en un diálogo reflexivo (Schön, 1983), logrando generar un conjunto amplio de representaciones (Goldschmidt, 2014). Igualmente, apoya la generación de nuevas formas (Eastman, 2001), mientras permite la exploración ágil de diferentes propuestas de diseño (Gero, 1994). Además, se ha

demostrado que la presencia de representaciones externas estimula la creatividad en el proceso de generar la forma (Goldschmidt & Smolkov, 2006) y en general en todo el proceso de diseño, favoreciendo entre otras cosas, la imaginación (Singer, 1991).

2.3. Creatividad y estímulos en la generación de la forma

Desde la psicología cognitiva, la creatividad está relacionada con la capacidad de generar ideas novedosas de manera fluida. Sin embargo, estas dos características son insuficientes para el diseño de productos, en el cual se espera que además de las dos características anteriores, las ideas sean soluciones útiles (Sternberg, O'Hara & Lubart, 1997). Esto significa que las ideas generadas cumplan con los alcances, objetivos y requerimientos definidos con anterioridad en el proyecto (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). A partir de lo anterior, Shah, Smith y Vargas-Hernandez (2003) proponen una métrica de medición de la efectividad de la ideación, analizando los bocetos que resultan de la fase de generación de la forma, basada en 4 características fundamentales de la creatividad en el diseño: cantidad, novedad, variedad, y calidad.

La **cantidad** es el número de ideas generadas dentro del proceso de ideación. Es importante, porque generar más ideas aumenta la posibilidad de generar mejores ideas (Cross & Cross, 1996; Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). La **novedad** se define como lo inusual de una idea en relación con otras en un espacio de diseño determinado. La **variedad**, está relacionada con la fluidez de generar ideas, pero es una medida de la exploración del espacio de diseño durante el proceso de generación de ideas. Ideas similares indican baja variedad, y por lo tanto, menor probabilidad de encontrar mejores ideas. Y por último, la **calidad** es la medida de factibilidad de una idea, es decir, el nivel de viabilidad de la idea relacionada con el rendimiento de la propuesta, como tiempo, peso y energía (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003).

Para que la cantidad, la novedad, la variedad y la calidad contribuyan a mejorar el nivel creativo, se han desarrollado diferentes técnicas basadas en la búsqueda y el uso de estímulos visuales (Mougenot, Watanabe, Bouchard, & Aoussat, 2009), pues se cree que dichos estímulos interactúan con operaciones cognitivas básicas, ayudando a la resolución de problemas (Rosenman & Gero, 1993; Cross, 1996), y conduciendo además, a la generación de mayor número de ideas (Mougenot, Watanabe, Bouchard & Aoussat, 2009).

La búsqueda y organización de estímulos, como construcción de *boards* y collages, permiten delimitar el problema en un dominio específico de conocimiento y por tanto ayudan a la búsqueda de la solución (Gonçalves, Cardoso y Badke-Schaub, 2013). Juegan además un papel primordial en el

nivel creativo de la representación, pues las ideas circulan entre la asociación que causan los estímulos, y el razonamiento que permite, a partir de la lógica, mejorar los bocetos (Goldschmidt, 2014; Singh & Gu, 2012; Johnson, et al., 2009). Es en este bucle de retroalimentación donde emerge el pensamiento creativo, en el paso entre la información consignada en la memoria a largo plazo y los estímulos externos tales como los precedentes o el estado del arte de productos similares (Gonçalves, Cardoso & Badke-Schaub, 2016).

Los estímulos son pues cualquier información que después de ser comprendida e interpretada, genera una influencia creativa, directa o indirecta en el proceso de diseño. Sin embargo, muchos investigadores han centrado su atención en el posible impacto negativo que los estímulos externos pueden tener en las actividades de diseño creativo (Gonçalves, Cardoso & Badke-Schaub, 2016). Se ha demostrado que los estímulos pueden ampliar el conjunto potencial de soluciones (Goldschmidt & Sever, 2010), pero de la misma manera, pueden fijar una imagen en la memoria del diseñador y facilitar la imitación de ejemplos existentes (Purcell y Gero, 1996), disminuyendo la novedad y la variedad en la generación de ideas.

En definitiva, aunque las investigaciones sobre el tema revelan resultados contradictorios, es esencial aclarar la influencia de los tipos de estímulos en los resultados creativos, su relación con los tipos de representación y su rol dentro del proceso de generación de la forma. Sabiendo esto, los diseñadores podrían seleccionar de manera más eficiente el modelo de generación de la forma, el tipo de representación y los tipos de estímulos que mejor se adapten a su problema de diseño (Gonçalves, Cardoso & Badke-Schaub, 2014).

Partiendo de lo anterior, se estableció una ruta metodológica, donde se presentan las actividades realizadas para responder a cada uno de los objetivos específicos.

3. Metodología

Aunque el término *form-finding* ha sido usado en la literatura científica desde los años 70's, sigue siendo, sobre todo en el diseño de productos, una estrategia poco conocida, con una delimitación conceptual y metodológica aún difusa y en donde no hay certeza de las variables de las técnicas y su posible aplicabilidad. Es por esto que el enfoque de la investigación es de tipo exploratorio, con el objetivo de clarificar y delimitar los conceptos para que sean la base de futuras investigaciones, y posibiliten el desarrollo de herramientas e instrumentos para posteriores estudios descriptivos o explicativos. Igualmente, el enfoque exploratorio posibilita identificar técnicas promisorias para ser

aplicadas en el diseño de productos (Hurtado, 2008; Hernández, Fernández & Baptista, 1998). En seguida se detallará la metodología para alcanzar cada uno de los objetivos específicos.

3.1. Objetivo específico A: Identificar técnicas

Para cumplir este objetivo se realizó una búsqueda sistemática de información en las bases de datos Google Scholar, Scopus, Jstor, Science Direct, Ebsco, Proquest y Springer Link, con el término *Form-finding*. Posteriormente, se utilizaron diferentes ecuaciones de búsqueda que relacionaban términos similares que usualmente han servido para referirse al mismo tipo de generación morfológica, con términos que denotaran el proceso manual (ver figura 4). Este proceso está descrito con detalle en Patiño & Maya (2018).

Término principal	OR (término secundario)	AND
<i>Form-finding</i>	<i>Generative-design</i>	<i>Manual</i>
	<i>Morphogenetic-design</i>	<i>Handmade</i>
	<i>Material-adapted form</i>	<i>Physical</i>
	<i>Material-based design</i>	<i>Analogic</i>
	<i>Physics-based generative design</i>	<i>Analogical</i>
	<i>Free-form</i>	

Fig. 4. Términos y ecuaciones de búsqueda.

Este proceso no tuvo restricciones temporales, es decir, que no se tuvo en cuenta la fecha de su publicación; ni tuvo barreras disciplinares, en otras palabras, se tuvieron en cuenta proyecto en arquitectura, diseño de producto, diseño industrial e ingeniería. Igualmente, las ecuaciones no arrojaron mayores resultados cuando se conjugaba las características referidas a lo manual, lo hecho a mano, analógico o físico. Por tanto, sólo se utilizaron las ecuaciones de búsqueda que combinaran el término principal o el término secundario (ver figura 4), y se incluyeron sólo los procedimientos digitales que pudieran tener traducción directa a la experimentación con materiales y que exhibieran algún tipo de auto-organización (Patiño & Maya, 2018).

De manera contraria, se excluyeron los artículos que analizaban procedimientos ya publicados por los autores que dominan el campo como Frei Otto, Achim Menges, Sergio Pellegrino y Neri Oxman; y que describían aplicaciones diferentes y variaciones de la misma técnica. Es importante mencionar,

que las técnicas *form-finding* digitales aplicadas a los sistemas tensegrity, los sistemas de membrana y los sistemas plegados tipo origami, con énfasis en la ingeniería y la arquitectura, son, por mucho, las técnicas con mayor cantidad de publicaciones; de estos tres temas también se excluyeron los documentos que profundizaran en asuntos diferentes a la exploración formal y sólo se dejaron aquellos que se acercaran a la técnica de una manera básica.

3.2. Objetivo específico B: Construir un repertorio

Al terminar el proceso anterior, se definieron 40 técnicas en total, y se desarrollaron dos procedimientos que permitieran organizar y sintetizar la información: (i) caracterización conceptual, matemática y empírica de las 40 técnicas del repertorio (ver § 3.2.1) y (ii) exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas (ver § 3.2.2).

3.2.1. Metodología para la caracterización conceptual, matemática y empírica

En este procedimiento las técnicas se registraban a medida que se encontraban en una matriz de doble entrada que se puede ver en la figura 5, que relacionaba las técnicas con las categorías: nombre de la técnica, entrada, proceso/regla, salida, ecuación que describe el proceso, nomenclatura o parámetros de la ecuación, esquema del proceso, esquema del resultado y referencias bibliográficas. La definición de las categorías de análisis se hizo a partir de un proceso iterativo, en conversaciones con el asesor, intentando definir qué información podría serle útil al investigador, diseñador o programador (Patiño & Maya, 2018).

Luego, se agruparon las técnicas teniendo en cuenta el proceso mediante el cual los procedimientos auto-organizan las morfologías, es decir, se agruparon las técnicas que exhibían procesos físicos y mecánicos similares que influenciaran las propiedades geométricas. Estos procesos físicos en los que se agruparon las técnicas, son: inflar, agrupar, de-construir, tensionar, solidificar y plegar. Es importante mencionar que las agrupaciones no son totalmente excluyentes, en muchos casos una técnica puede hacer parte de varios grupos simultáneamente, pero se ubicó en el grupo que mejor la representa con el fin de ayudar a su entendimiento y comprensión. Este proceso está descrito con detalle en Patiño & Maya (2018).

Técnica	Input	Proceso/ regla	Output	Parámetros / Nomenclatura	Ecuación	Gráfico proceso	Gráfico Output	Ref.
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Fig. 5. Matriz de doble entrada para el registro y síntesis de las 40 técnicas.

Posteriormente, y siguiendo el enfoque exploratorio, se desarrolló un instrumento de registro (ver figura 6) con una estructura flexible que se iba modificando mientras se experimentaba empíricamente con las técnicas. En el instrumento se registró fotográficamente todo el proceso, se adjuntó la planimetría de los dispositivos que se fabricaron para explorar cada técnica y se describieron: (i) entrada de información, (ii) posibles variables de experimentación y sus niveles, (iii) descripción geométrica de las salidas de información, (iv) cantidad de modelos, (v) número de acciones constructivas, como movimientos y procedimientos necesarios por modelo, (vi) duración de los experimentos, (vii) costos, (viii) observaciones sobre las posibles aplicaciones, (ix) observaciones sobre el uso y (x) principios físicos asociados.

La información contenida en los instrumentos de registro permitió caracterizar las técnicas conceptual y empíricamente. Luego se buscó información documental que permitiera realizar un acercamiento matemático, analizando al menos un principio físico asociado a cada una de las técnicas.

En la construcción y el registro de los modelos trabajaron 4 auxiliares de investigación dirigidos por el autor: estudiantes de sexto semestre de Diseño Industrial, del semillero Morfolab, de la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes construyeran como mínimo 3 modelos por técnica, y describían y analizaban la información en el instrumento de registro.

EXPLORACIÓN TÉCNICAS DE FORM-FINDING

INFORMACIÓN GENERAL	
Investigador:	
Fecha:	
Técnica:	
Nombres de los archivos:	

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES	
ENTRADAS	
Materiales y herramientas que se mantienen constantes	
PROCESO	
Variable A	
Nivel A1	
Nivel A2	
Nivel A3	
Variable B	
Nivel B1	
Nivel B2	
Nivel B3	
Variable C	
Nivel C1	
Nivel C2	
Nivel C3	
SALIDAS	
Descripción geométrica de los resultados	

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA	
NÚMERO DE EXPERIMENTOS	
ACCIONES POR EXPERIMENTO	
REGISTRO DEL TIEMPO / Minutos	
Consecución de materiales	
Desarrollo del dispositivo	
Experimentando	
Registrando	
Total	
REGISTRO DE COSTOS / \$	
Material 1	
Material 2	
Material 3	
OBSERVACIONES SOBRE LAS POSIBLES APLICACIONES	
OBSERVACIONES SOBRE LA FACILIDAD DE USO	
DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS FÍSICOS ASOCIADOS	

REGISTRO FOTOGRÁFICO			
<i>Registrar especialmente: Las entradas, el proceso y las salidas. Para ello utilizar una cartulina para hacer un fondo blanco sobre una mesa (ver imagen adjunta). En las entradas ubicar sobre la cartulina los materiales y fotografiarlos desde una vista superior (ver imagen adjunta).</i>			
PLANOS O MODELO DIGITAL EN LÍNEAS DEL DISPOSITIVO <i>Insertar vistas de las piezas desarrolladas y/o del dispositivo. Si se utilizó Rhinoceros, exportar las vistas como Illustrator, abrir los archivos en AI, y guardarlos como pdf y como jpg.</i>			

Fig. 6. Instrumento de registro de la exploración empírica de las técnicas.

3.2.2. Metodología para la exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas.

Posteriormente, se seleccionó una técnica promisoría para hacer un análisis detallado y una exploración profunda. En este procedimiento se hicieron las siguientes actividades: (i) selección del material idóneo para la técnica, (ii) análisis de deformación de los resultados de la técnica, (iii) análisis estructural de los resultados de la técnica y (iv) generación de variedad de formas que resultan de la técnica.

Para la selección del material se llevó a cabo un experimento para determinar el material que pudiera responder mejor a la exploración de formas, definiendo variables independientes, variables dependientes, variables fijas y factores de ruido.

Luego de seleccionado el material, se verificaron las propiedades morfológicas y estructurales de los resultados de la técnica que se habían definido en la caracterización del repertorio. Para la ejecución del experimento y para la verificación de las propiedades se utilizaron las siguientes herramientas:

- a. Termómetro infrarrojo digital láser
- b. Equipo para termoformar de fabricación local
- c. Calibrador digital marca *MITUTOYO Modelo Absolute*
- d. *Scanner* marca *GOM* Modelo *ATOS Core 200*
- e. *Software GOM Inspect 2018*
- f. *Software Rhinoceros 5*
- g. *Software Grasshopper*

Posteriormente a la verificación de las propiedades, que arrojó información precisa del comportamiento del material y la estructura necesario para estimar los elementos creativos promisorios, se hizo una exploración creativa no estructurada a partir de las variables prometedoras y conclusiones que arrojaron los procedimientos anteriores. Conviene subrayar que en la construcción del repertorio se hizo una exploración empírica básica, que arrojó en promedio de 3 a 6 modelos por técnica, pero para este caso, el objetivo fue ampliar la exploración, para aumentar la variedad, la cantidad, y en definitiva, la novedad en los modelos resultados de la técnica.

3.3. Objetivo específico C: Proponer pautas metodológicas

Para cumplir este objetivo se determinaron tres procedimientos: (i) estimación cualitativa del potencial de aplicación en el diseño de productos de las técnicas del repertorio (ver § 3.3.1), (ii) medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas del repertorio (ver § 3.3.2), y (iii) descripción de las pautas metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas (ver § 3.3.3).

3.3.1. Metodología para la estimación cualitativa del potencial de aplicación en el diseño de productos de las técnicas del repertorio

Para este procedimiento se definieron criterios de evaluación, que al ser valorados, le sugirieran al diseñador la técnica que mejor se adapte a su proyecto, estos son: (i) eficacia de las técnicas, (ii) eficiencia de las técnicas, (iii) efectividad cualitativa de la ideación de las técnicas y (iv) facilidad de aprendizaje de las técnicas.

La eficacia es la “capacidad de lograr el efecto que se desea o espera” (RAE, 2018), y en este caso específico es la capacidad de la técnica de ser usada para producir ideas de productos que se puedan aplicar en el proyecto de diseño. Para ello, se les pidió a los estudiantes que trabajaron en la elaboración de los modelos de las técnicas, que al terminar cada técnica, dibujaran por mínimo una hora y media, y máximo dos horas, todos los bocetos de ideas de diseño de productos, que por asociación pudieran generar. Esto es relevante porque algunos de los procesos cognitivos subyacentes al proceso de diseño, son un tipo de razonamiento basado en precedentes (Oxman & Oxman, 1992), ya que cualquier imagen, objeto o escena puede sugerirle al diseñador una imagen utilizable, mientras relaciona lo que ve con conceptos y experiencias pasadas guardadas en la memoria (Gonçalves; Cardoso & Badke-Schaub, 2011).

Estos bocetos fueron contados y categorizados, siguiendo una clasificación de diseño de productos basada en la categorización propuesta por dos concursos de diseño reconocidos: *A' Design Award & Competition* (2018) y *RedDot Design Award*. (2018). Estos bocetos sugieren por asociación posibilidades de aplicación de las técnicas en cada una de las categorías de productos de diseño.

La valoración de la **eficiencia** se hizo de dos maneras: (i) como posibilidad de maximizar y minimizar características de las técnicas, y (ii) en la relación del costo con el beneficio de las técnicas. Para la valoración de la posibilidad de maximizar y minimizar características, se generó una matriz (ver figura 7), con base en la revisión bibliográfica, para seguir un procedimiento similar al propuesto por

el método TRIZ (Chai, Zhang & Tan, 2005), en donde se seleccionan principios de invención como fundamento para el desarrollo creativo. Para esto se determinaron los principios para maximizar y minimizar que le son intrínsecos a cada técnica, y se toman como la capacidad que presentan el uso de las técnicas de aumentar o disminuir propiedades.

La valoración de la eficiencia en relación del costo con el beneficio (De Angeli, Lynch, & Johnson, 2002), se hizo a partir de información factual y empírica que arrojó la construcción de los modelos que se registró en el instrumento de la figura 6, en relación con el nivel de inversión económica y el nivel de inversión mano de obra, representada en el número de acciones constructivas, como cortes, dobleces y movimientos de la mano que efectúa el diseñador.

		TÉCNICAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MINIMIZAR	PESO																					
	LONGITUD																					
	ÁREA SUPERFICIAL																					
	RECURSOS																					
MAXIMIZAR	VOLUMEN																					
	RESISTENCIA ESTRUCTURAL																					
	DISTRIBUCIÓN																					
			TÉCNICAS	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
MINIMIZAR	PESO																					
	LONGITUD																					
	ÁREA SUPERFICIAL																					
	RECURSOS																					
MAXIMIZAR	VOLUMEN																					
	RESISTENCIA ESTRUCTURAL																					
	DISTRIBUCIÓN																					

Fig. 7. Matriz de las técnicas para registrar la posibilidad de maximizar y minimizar características.

Por otro lado, para la valoración de las **efectividad cualitativa de la ideación** se utilizó la técnica de grupo focal (Kitzinger, 1995), con la intención de aprovechar la comunicación de los participantes para inferir conclusiones. El grupo estaba compuesto por el investigador principal y los 4 auxiliares de investigación. Se discutió y evaluó tres de las cuatro características que propone Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003) para medir la efectividad de ideación: novedad, variedad y cantidad. El criterio de calidad, no se tomó en cuenta porque la viabilidad de la técnica se discutió como posibilidad de aplicación en la valoración de la eficacia y la eficiencia.

Finalmente, para medir la **facilidad de aprendizaje**, el mismo grupo focal, interactuó y estudió para emitir un juicio por consenso, los criterios que proponen Abran, et. al., (2003) para valorar el aprendizaje: complejidad de las acciones, conocimientos previos y nivel de razonamiento visual de las técnicas.

3.3.2. Metodología para la medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas del repertorio

Debido a la imposibilidad de explorar en detalle las 40 técnicas, se seleccionó la técnica a la que se le realizó la caracterización detallada física y geométrica de la sección 3.2.2. Esto con el fin de realizar la medición sobre la técnica con mayor análisis a profundidad. A dicha técnica se le efectuó una medición de la efectividad de la ideación, utilizando el procedimiento y los criterios propuestos por Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003). Se ejecutó una prueba controlada de generación de ideas y métricas basadas en resultados de un grupo control (GC) sometidos a un estímulo visual convencional y un grupo experimental (GE) sometido a un estímulo visual que utilizara los modelos resultados de la técnica seleccionada.

Los dos grupos estaban conformados cada uno por 7 estudiantes de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana que cursaban entre 5° y 8° semestre, con calificaciones promedio acumuladas entre 4.0 y 4.6, y con edades entre los 19 y los 22 años. En total 4 hombres y 10 mujeres, asignados aleatoriamente pero distribuidos por género de manera equilibrada en los equipos.

Antes de comenzar la prueba se utilizó la herramienta de escala pictórica de estados de ánimo *Pick-A-Mood* (Desmet, Vastenburg & Romero, 2016) para que los sujetos indicaran con cual estado de ánimo se identificaban en el momento, con el fin de evitar posibles sesgos en los resultados debidos a estados de ánimo extremadamente negativos que no permitieran un adecuado flujo creativo de generación de ideas.

A los sujetos se les presentaron diferentes estímulos antes de comenzar la generación de las ideas de diseño. Al grupo control (GC), que sirve como nivel de referencia se le presentó un *board* de objetos de diseño relacionados con el enunciado, ya que esta herramienta es la más común utilizada en esta fase tanto por diseñadores novatos como expertos (Gonçalves, Cardoso y Badke-Schaub, 2013). Al grupo experimental (GE) se le presentaron las fotografías de los modelos generados con la técnica. El *board* fue construido por un estudiante de Diseño Industrial de 6 semestre, consultando los proyectos ganadores entre el año 2014 y 2018 de los concursos *RedDot Design Award* y *A' Award Design & Competition*.

La medición de la efectividad de la ideación se hizo con base en los criterios desarrollados por Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003) para cuantificar el resultado creativo del proceso de diseño: novedad, variedad, cantidad y calidad.

3.3.3. Descripción de las pautas metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas

Finalmente, para cumplir con el objetivo C, se describieron las pautas metodológicas que el diseñador debe seguir para usar las técnicas. Estas pautas surgieron de los resultados obtenidos con los procedimientos descritos en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, referidos a la estimación del potencial de aplicación de las técnicas, y a la medición de la efectividad de ideación de una de las técnicas.

3.4. Objetivo específico D: Desarrollar hipótesis

Para terminar, se relacionaron conceptos y resultados de los objetivos anteriores a partir del desarrollo de mapas conceptuales que los representaran visualmente. Posteriormente, se unificaron los esquemas en un solo mapa para generar relaciones entre dos o más conceptos, y así identificar proposiciones tentativas y formular de manera argumentada hipótesis de investigación que puedan ser probadas o refutadas en posteriores investigaciones descriptivas, correlacionales o explicativas (Hernández, Fernández & Baptista, 1998).

4. Resultados y discusión

A continuación se presentarán los resultados del proyecto según los objetivos y los procedimientos planteados en la metodología.

Para el objetivo específico A se presentará (i) la identificación de 40 técnicas analógicas de *form-finding*; para el objetivo específico B, (ii) la caracterización conceptual, matemática y empírica de las 40 técnicas del repertorio; para los objetivos B y C, (iii) una exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas; para el objetivo específico C, (iv) una estimación cualitativa de la aplicabilidad en el diseño de productos de las 40 técnicas del repertorio, (v) una medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas y (vi) descripción de las pautas metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas; por último, para el objetivo específico D, se presenta (vii) una formulación de las hipótesis que se deducen de los conceptos y resultados promisorios.

4.1. Identificación de las 40 técnicas de *form-finding* analógico (Objetivo específico A. Identificar técnicas)

El repertorio está compuesto por 40 técnicas analógicas de *form-finding* extraídas de la literatura científica, su proceso de construcción de puede ver en Patiño y Maya (2018). Su característica analógica y de fabricación manual no excluye la posibilidad de aplicación en un medio computacional (ver figura 8). Para explorar y registrar las técnicas se utilizaron las siguientes categorías de análisis: Nombre de la técnica, grupo al que pertenece según el fenómeno físico asociado, *input* de la técnica, proceso/regla, *output* de la técnica, esquema del proceso, esquema de las salidas, posibles variables de exploración formal, ecuación del principal proceso físico y/o químico asociado, nomenclatura de la ecuación de la ecuación anterior, fotografía de los *inputs*, fotografías del proceso, fotografías de las *outputs* y referencia bibliográfica de la técnica para profundizar en su estudio. En la figura 8 se presentan las fotografías de una de las salidas de cada técnica, es decir, el registro de uno de los modelos desarrollados con el fin de establecer un panorama general del repertorio.



Fig.8. Resumen fotográfico de uno de los modelos desarrollados en cada una de las técnicas. Fotografías de Ever Patiño, Valeria Londoño, José Agudelo, Juliana Vélez y Camila Aguirre.

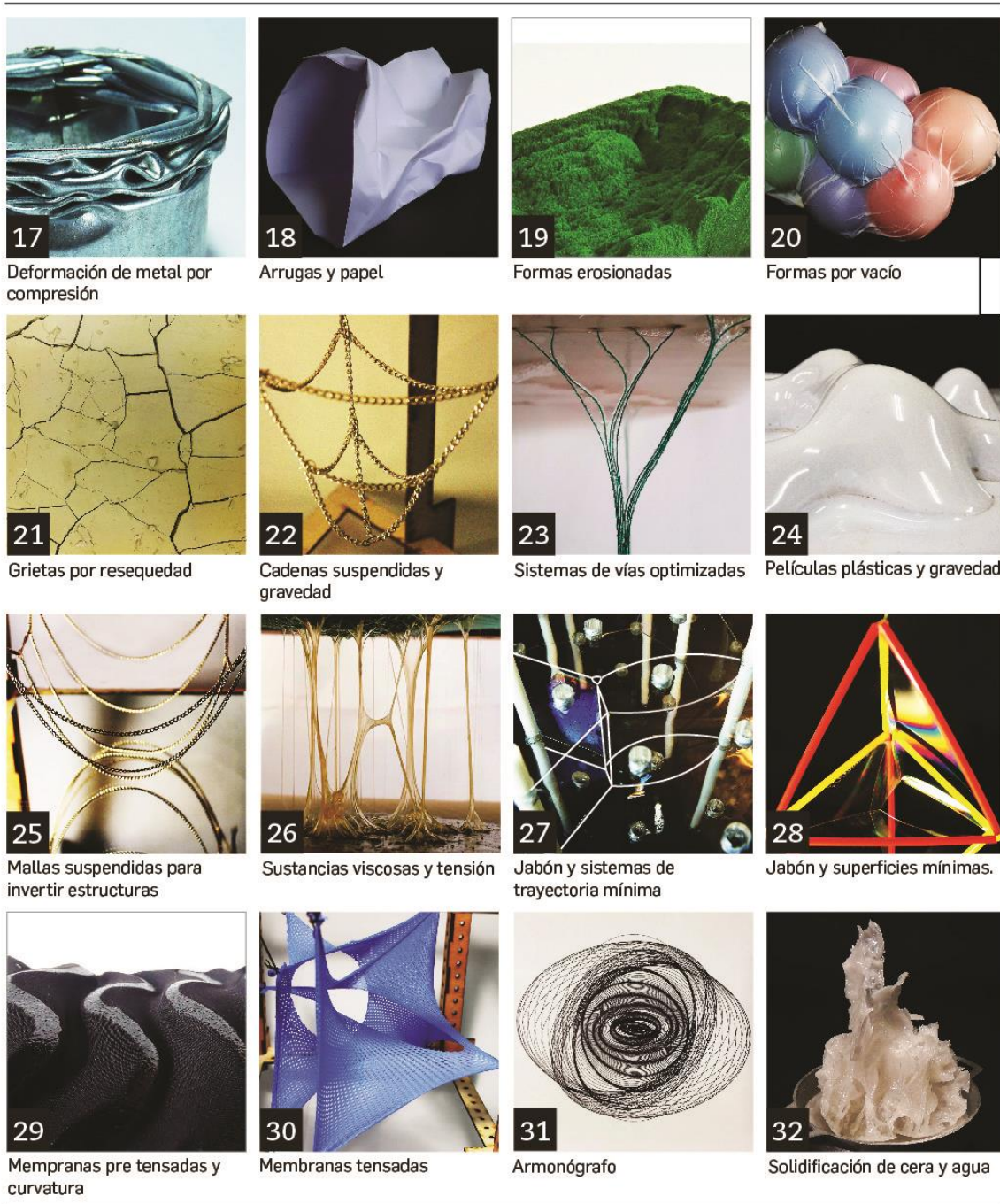


Fig. 8. (Continuación) Resumen fotográfico de uno de los modelos desarrollados en cada una de las técnicas.
Fotografías de Ever Patiño, Valeria Londoño, José Agudelo, Juliana Vélez y Camila Aguirre.

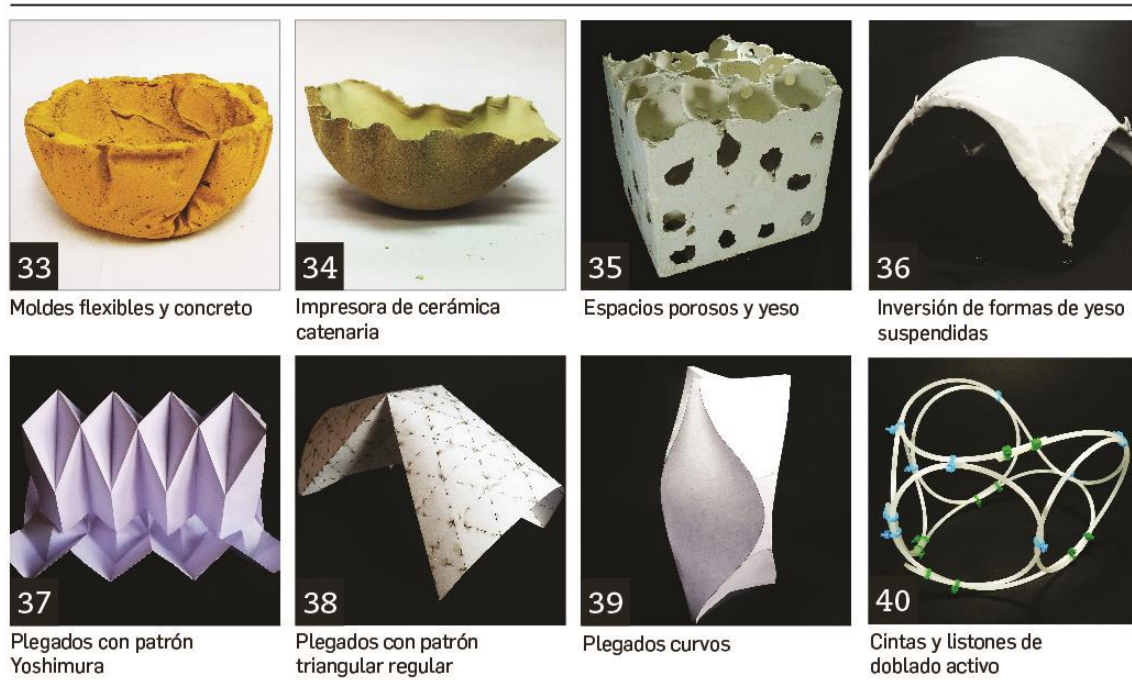


Fig. 8. (Continuación) Resumen fotográfico de uno de los modelos desarrollados en cada una de las técnicas.
Fotografías de Ever Patiño, Valeria Londoño, José Agudelo, Juliana Vélez y Camila Aguirre.

4.2. Caracterización conceptual, matemática y empírica de las 40 técnicas (Objetivo específico B. Construir repertorio)

Luego de la identificación de las técnicas, se utilizaron las categorías de análisis anteriormente descritas para realizar la caracterización. En la figura 9 se presenta un resumen del repertorio, con las siguientes categorías de análisis:

- Grupo: categoría a la que pertenecen las técnicas según el proceso físico o químico predominante (inflar, agrupar, deconstruir, tensionar, solidificar y doblar). No se trata de categorías excluyentes pues una técnica puede utilizar varios procesos, pero ayuda a relacionar y comprender las técnicas. Para mayor detalle del proceso de agrupación ver Patiño y Maya (2018).
- Técnica: nombre de la técnica analizada según los autores estudiados.
- Input: descripción de todos los materiales y herramientas necesarias para iniciar el proceso.
- Proceso/regla: se describen los procesos físicos y/o químicos asociados, o procedimiento que permiten que los input se transformen.

- Output: descripción de los modelos a partir de las características geométricas que resultan del proceso.
- Posibles variables: variables que pueden cambiar en la experimentación, y posibilitan que el resultado varíe.
- Gráfico del proceso: esquema gráfico que explica de manera visual el proceso.
- Gráfico de la salida: esquema gráfico de un posible resultado de la técnica.
- Referencias: libros o revistas científicas que hacen referencia a la técnica.

Así mismo, en las figuras 10, 11 y 12 se presentan el detalle de tres técnicas que pueden servir como ejemplo para comprender la relación entre todos los elementos de análisis (En el Anexo 1 se puede ver la caracterización detallada de las 40 técnicas). Estas caracterizaciones se hicieron para las 40 técnicas. En ellas, además de los elementos de análisis de la figura 9 se presentan:

- Niveles de las posibles variables: diferentes valores dentro de las variables que permiten modificar los resultados.
- Ecuación del proceso físico asociado: expresión matemática que explica el proceso físico asociado a la técnica. No explica la relación entre todas las variables, sino sólo uno de los principios físicos que más probablemente influye en el fenómeno.
- Nomenclatura: explicación de los términos que componen la ecuación. No están relacionadas todas las variables porque la ecuación sólo explica uno de los procesos físicos asociados a la técnica.
- Esquema de interacción entre las variables: gráfico circular con las posibles combinaciones entre las variables y sus niveles. Estos últimos son valores arbitrarios establecidos dentro de la exploración de la técnica. En general se definieron tres variables, con dos o tres niveles, los cuales se combinan para dar diferentes respuestas. En el proceso de exploración el diseñador escoge un nivel por cada variable, por ejemplo: A1+B1+C1 o A1+B3+C2.
- Registro fotográfico: Fotografías de las entradas de la técnica, el proceso de exploración, y algunas salidas resultantes o modelos.














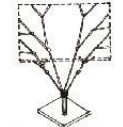



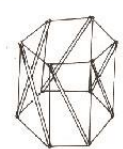
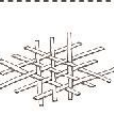

	Técnica	Input	Proceso/ regla	Output	Posibles variables	Gráfico proceso	Gráfico salida	Referencias	
Inflar	1	Encofrados elásticos y concreto	Yeso, concreto, membranas de nylon o latex, varillas.	Presión interna, gravedad y equilibrio superficial.	Sólidos con dobles curvaturas positivas fluidas	Tipos de apoyo, flexibilidad del textil, Volumen del concreto			(Iwamoto, 2013) (Rojo, 2013) (Swackhamer & Satterfield, 2013)
	2	Modelo de empaquetamiento de burbujas	Máquina para generar burbujas, agua, líquido jabonoso, contenedor.	Tensión superficial	Estructura tridimensional espumosa	Número de boquillas, nivel de tensión superficial, tamaño contenedor			(Lopes, et al., 2014) (Schaer, 1992) (Otto, 2011) (Nordin, et al., 2013)
	3	Aparatos para crear la forma de estructuras neumáticas	Latex, inflador, dispositivo en madera	Presión interna homogénea	Superficies de doble curvatura positiva	Calibre del latex, figura del dispositivo, presión.			(Otto, 2011) (Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001) (Arbeláez & Patiño, 2010) (Eggers, 1977)* (Sastre, 2012)*
	4	Células ligeras	Globo de látex, marco e hilos.	Presión interna	Sólido de dobles curvaturas positivas.	Tipo de globo, tamaño del globo, tipo de restricción			(Patiño, Arango & Jaramillo, 2015) (Sastre, 2012)* (Eggers, 1977)*
	5	Crecimiento de espumas	Espuma de poliuretano, recipiente, restricciones.	Crecimiento químico de dos sustancias	Sólidos de doble curvatura positiva.	Volumen de poliuretano, tipo de restricción, distribución de la restricción.			(Arbeláez & Patiño, 2010)
Agrupar	6	Pilas de arena	Embudos, granos de arena o de azúcar.	Agrupación por gravedad	Formas montañas, montículos o dunas	Volumen de arena, tipo de perforación, distribución de la restricción, altura de caída			(Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001)
	7	Construcciones ramificadas	Hilos elásticos, marcos, anillos, sujetadores	Ramificación progresiva mientras se aleja del centro	Estructura arboriforme 2D o 3D	Distribución, cantidad de puntos, longitud y elasticidad de los hilos.			(VON, 2009) (Otto & Rasch, 2001) (Villate, 2008)
	8	Estructuras recíprocas	Barras cilíndricas de madera o metal	Soporte mutuo	Estructura tipo retícula con curvatura	Longitud y ancho de las barras, número de barras, distribución, punto de soporte.			(Parigi & Kirkegaard, 2014)* (Thönnissen, 2014) (Fuller, 1982) (Villate, 2008)
	9	Sistemas tensegrity prismáticos	Varillas rígidas, cables flexibles	Auto-equilibrio. Tensión continua, compresión discontinua	Estructuras ligeras tridimensionales	Longitud de las barras, número de barras, distribución.			(Tibert & Pellegrino, 2011) (Paul, et al., 2005) (Pellegrino, 2014) (Sobek, 2016) (Rodríguez, et al., 2006) (Fuller, 1982) (Villate, 2008)
	10	Tejidos geodésicos	Cintas	Agrupación en vértices de 3° a 7° orden.	Estructuras ligeras tridimensionales	Longitud y ancho de las cintas, tipo de entrecruzamiento 3° - 7° orden			(Rodríguez, et al., 2006) (Fuller, 1982)

Fig.9. Resumen del repertorio con las principales categorías de análisis. Dibujos de Ever Patiño.



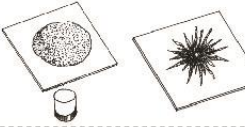

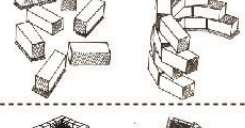
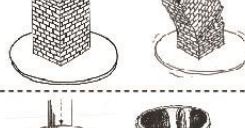




	Técnica	Input	Proceso/ regla	Output	Posibles variables	Gráfico proceso	Gráfico salida	Referencias
Agrupar	11	Triángulos y construcción geodésica	Triángulos equiláteros en cartón	Unión por vértices de 3°, 4°, 5°, 6° y 7° orden.	Volúmenes con aristas	Número de triángulos, tipos de unión y predominio de unión.		(Arbeláez & Patiño, 2010)
	12	Ocupación de espacio por repulsión o distanciamiento	Alfileres magnetizados, contenedor, agua	Auto-equilibrio de fuerzas magnéticas	Rejillas irregulares	# de alfileres, tamaño de alfileres, punto para magnetizar.		(Lopes, et al., 2014) (Schaur, 1992)
	13	Partículas y magnetismo	Limadura de hierro, imanes, superficie	Auto-equilibrio de fuerzas magnéticas	Formas irregulares en explosión	Cantidad de limadura, número de imanes, distribución.		(Arbeláez & Patiño, 2010)
	14	Partículas de arena y vibración	Arena, parlante, amplificador, lámina metálica, generador de frecuencias y	Auto-organización por vibración	Redes semirregulares	Frecuencia, cantidad de arena, tiempo, figura de la placa.		(Gaf3, 2016) (Steward & Golubitsky, 1995)
	15	Agrupación simétrica de módulos paralelepípedos	Paralelepípedos en madera	Agrupación en diferentes direcciones	Volúmen por secciones	Número de módulos, proporción de los módulos, dirección de agrupación.		(Agkathidis, 2016)
Deconstruir	16	Estabilidad de estructuras y gravedad	Ladrillos pequeños y báscula	Agrupación, estabilidad y gravedad	Estructura deconstruida	Número de módulos, proporción de los módulos, dirección de agrupación.		(Otto & Rasch, 2001)
	17	Deformación de metal por compresión	Sección metálica, prensa hidráulica	Compresión perpendicular	Superficies deformadas y onduladas	Fuerza (psi), Tipo de sección, tiempo de compresión		(Arbeláez & Patiño, 2010)
	18	Arrugas y papel	Láminas de papel, cartón y/o metal.	Arrugar para generar volumen	Superficies continua tridimensional	Dimensiones del papel, calibre, tamaño de las aristas, tipo y distribución de aristas.		(Attar, et al., 2009) (Kumar & Chani, 2017)
	19	Formas erosionadas	Espuma de floristería, hidrolavadora	Corrosión por fricción	Superficie irregular corroída	Fuerza (psi), tiempo, restricciones, densidad de la espuma.		(De Micoli, S., Rinderspacher, K., & Menges, A. 2018)
	20	Formas por vacío	Bombas, pelotas, bolsa de polietileno, aspiradora	Vacío	Volúmen orgánico	Tamaño de la bolsa, tipo de elemento interior, fuerza de vacío.		(Huijben & Van Herwijnen, 2007)

Fig.9. (Continuación) Resumen del repertorio con las principales categorías de análisis. Dibujos de Ever Patiño.

	Técnica	Input	Proceso/ regla	Output	Posibles variables	Gráfico proceso	Gráfico salida	Referencias
Deconstruir	21 Grietas por resequedad	Arcilla, superficie de madera o plástico	Fractura por secado irregular	Redes irregulares	Grosor de la arcilla, dimensiones y forma de la placa, tiempo, humedad.			(Gaß, 2016)
	22 Cadenas suspendidas y gravedad	Cadenas suspendidas, marco	Gravedad y curvas funiculares	Geometría de formas suspendidas	Longitud de las cadenas, tamaño del eslabón, distribución, puntos de apoyo.			(Jannasch, 2016) (Otto & Rasch, 2001)
	23 Sistemas de vías optimizadas	Agua, jabón, cordones o hilos, marcos	Capilaridad	Estructuras ramificadas	Longitud de los hilos, densidad del jabón, # de hilos, distribución.			(Otto & Rasch, 2001) (Lopes, et al. 2014) (Schaur, 1992) (Dickson, 2003)
	24 Películas plásticas y gravedad	Película de PS, calor y restricciones.	Gravedad y deformación por calor.	Superficie de doble curvatura con catenarias	Tipo de restricción, tipo de polímero, calibre, temperatura, forma.			(Arbeláez & Patiño, 2010) (Bradley & Gohnert, 2016) (Swackhamer & Satterfield, 2013)
Tensionar	25 Mallas suspendidas para invertir estructuras	Mallas suspendidas	Gravedad y curvas funiculares	Dobles curvaturas positivas reticuladas con catenarias	Longitud de las cadenas, tamaño del eslabón, distribución, puntos de apoyo.			(Jannasch, 2016) (Otto & Rasch, 2001)
	26 Sustancias viscosas y tensión	Mallas, superficies rígidas, XL (pega amarilla)	Viscosidad y capilaridad de los líquidos	Superficies con arcos, ramificaciones y espumas.	Cantidad de pega, forma de las superficies, tipo de superficies, distribución.			(Arbeláez & Patiño, 2010)
	27 Jabón y sistemas de trayectoria mínima	Barras perpendiculares a dos superficies, agua jabonosa	Tensión superficial	Teselación de paredes de películas jabonosas con 120°	Distribución de las barras, densidad del jabón, número de barras.			(Lopes, et al., 2014) (Otto, 1971) (Otto, 2011) (Marder, 1987)
	28 Películas de jabón y superficies mínimas.	Agua, jabón líquido, restricciones y marco tensor	Relajación dinámica. Tensión superficial homogénea	Superficies mínimas de doble curvatura negativa, con tensiones equilibradas	Tipo de marco, densidad del jabón, tipo de restricción.			(Bletzinger, 1998) (Bletzinger, 2001) (Otto, 2011) (Beatini, et al., 2016) (Ahlquist & Menges, 2012) (Veenendaal, 2012) (Rumberger & Lienhard, 2018)
	29 Membranas pre tensadas y curvatura	Membrana elástica, líneas de fuerza (resina)	Distribución no homogénea del material	Membrana con curvatura	Tipo de tela, tipo de línea, grosor de la línea.			(Oxman & Rosenberg, 2007) (Ahlquist, 2014) (Ahlquist & Planning, 2014)
	30 Membranas tensadas	Estructura tensada, fibra de vidrio y resina de poliéster.	Equilibrio de tensión	Doble curvatura negativa	Tipo de marco, tipo de tela, forma de la tela, tipo de apoyos.			(Arbeláez & Patiño, 2010) (Sierra & Patiño, 2005) (Rumberger & Lienhard, 2018)

Fig.9. (Continuación) Resumen del repertorio con las principales categorías de análisis. Dibujos de Ever Patiño.
















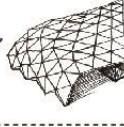




	Técnica	Input	Proceso/ regla	Output	Posibles variables	Gráfico proceso	Gráfico salida	Referencias
Tensionar	31 Armonógrafo	Papel, pincel, pintura, marco y péndulos	Movimiento pendular y gravedad	Curvas de Lissajous	Número de péndulos, largo y peso de péndulos, fuerza de accionamiento.			(Pickover, 2009)
	32 Solidificación de cera y agua	Cera caliente en recipiente y agua fría.	Turbulencias y solidificación por temperatura	Geometría de turbulencias	Volumen de cera, dirección y velocidad de inmersión			(Arbeláez & Patiño, 2010)
Solidificar	33 Moldes flexibles y concreto	Concreto, tela polimérica, contenedor	Solidificación y copia	Superficie irregular curva	Tipo de contenedor, tipo de tela, distribución de la tela.			(Manelius, 2012) (CONCRETECANVAS, 2015)
	34 Impresora de cerámica catenaria	Membrana elástica con cerámica líquida	Elásticidad, gravedad y solidificación de cerámica	Cuencos de dobles curvaturas.	Tipo de tela, dimensión de la tela, número y distribución de los apoyos.			(GT2P, 2015)
	35 Espacios porosos y yeso	Yeso, contenedor, globos de látex con agua.	Espacios llenos y vacíos	Sólido poroso	Volumen del cubo, número de globos, dimensión de los globos			(Agkathidis, 2013) (Sanchiz, 2008) (Baker, 2004)
	36 Inversión de formas de yeso suspendidas	Vendas de yeso	Gravedad y curvas funiculares	Formas de doble curvatura invertidas	Dimensión y forma de la tela, número y distribución de los apoyos.			(Bletzinger, et al., 2005) (Bletzinger & Ramm, 2001) (Jannasch, 2016) (Dickson, 2003)
Doblar	37 Plegados con patrón Yoshimura	Láminas de papel, cartón y metal; trapecio con diagonal	Doblar una lámina sin cortes, a partir de un patrón	Superficies continua tridimensional	Número de módulos, tamaño de los módulos, dirección y ángulo del doblar.			(Iwamoto, 2013) (Nabaei, et al., 2013) (Yacizi, 2011) (Sorguç, et al. 2009) (Gerber, 2012) (Rodríguez, et al., 2006)
	38 Plegados con patrón triangular regular	Láminas de papel, cartón y metal grafadas con triángulos	Doblar una lámina sin cortes, a partir de un patrón	Superficies continua tridimensional	Número de módulos, tamaño de los módulos, dirección y ángulo del doblar.			(Agkathidis, 2013) (Rocha, 2000)
	39 Plegado curvos	Láminas de papel, cartón y metal; secciones curvas	Doblar una lámina sin cortes, a partir de línea de doblez curvas.	Superficies continua tridimensional con dobles curvaturas	# y Longitud de aristas, radio y distribución de las aristas, dirección y ángulo del doblar.			(Rodríguez, et al., 2006)
	40 Cintas y listones de doblado activo	Cintas o listones de madera contrachapada, de fibra de vidrio o carbono	Deformación elástica para optimizar la rigidez (Dynamic relaxation)	Superficies curvas rígidas	Sección de la cinta o el listón, dirección y ángulo de doblar, distribución, longitud de las cintas.			(Deleuran, 2011) (Lienhard, 2014) (Bletzinger, et al., 2001) (Nabaei, et al., 2013) (Fleischmann, 2012) (Pone, et al., 2013) (De Rycke et al., 2018) (Fuller, 1982) (Lienhard, et al., 2013) (Lienhard & Knippers, 2013)

Fig.9. (Continuación) Resumen del repertorio con las principales categorías de análisis. Dibujos de Ever Patiño.


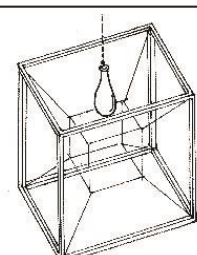
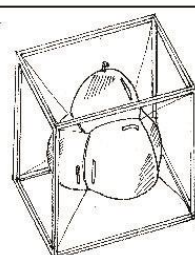
Por ejemplo, en la caracterización de la técnica (4) “células ligeras”, de la figura 10, se presentan cada uno de los elementos analizados. La técnica se basa en **inflar** con aire (**presión interna**) globos de látex y por la restricción que imponen **hilos, cuerdas y/o marcos** a la membrana, ésta se configura con **dobles curvaturas positivas** o geometrías esferoides. Las posibles variables que pueden interactuar en la experimentación pueden ser el **tipo de globo**, la **presión**, y el **tipo restricción**. El **tipo de globo** se puede establecer por el calibre del material y la forma, pero en este caso se determina por el tamaño, siendo grande un tamaño inflado aproximado de 50cm de diámetro, mediano de 25cm, y pequeño de 15cm. Igualmente, la **presión** interviene en la forma final que tomará la membrana, pues sin aire, el globo carece de estructura. Para este caso, al dificultarse la medición de los psi se valora en relación con el porcentaje de inflado aproximado; presión alta es 100%, presión media es 70%, y presión baja es 40%. Y por último, el **tipo de restricción** es el tipo de limitación que se utilizará en la exploración; puede ser generando una red con los hilos dentro del marco, amarrar con hilos pero sin marco, y tensionando externamente desde el marco. Esto da un total de 3 variables, cada uno con 3 niveles, 3^3 experimentos, es decir, 27 posibilidades de exploración formal. Para ilustrar mejor, una de las combinaciones puede ser A1+B1+C1, es decir, globo grande, con presión alta y en red con marco.

De manera similar, se presentan las ecuaciones vinculadas al principal proceso físico que influencia el fenómeno, con el interés de entender dicho fenómeno y permitir la posible simulación digital a partir de la programación en un *software*. La ecuación (1) de la figura 10 explica matemáticamente la relación entre la presión, la tensión de membrana y el radio de curvatura. El radio de curvatura en una forma como está, es diferente en cada punto de la membrana, lo que ocasiona una red de puntos en la superficie con características geométricas y físicas diferentes. Por otro lado, la expresión (2) explica el equilibrio necesario para que no se generen arrugas.

$$p = \frac{t_1}{r_1} + \frac{t_2}{r_2} \quad (1)$$

$$\min n(p) \geq 0,2 \max n(p) \quad (2)$$

Al final de la figura 10 se presentan en orden cronológico parte del proceso de exploración de la técnica, la cual no se realizó sistemáticamente vinculando todas las variables, sino realizando combinaciones que pudieran arrojar resultados bien diferentes entre sí. La primera fotografía presenta el marco y las cuerdas que generan tensión; luego, el proceso de ubicar el globo dentro de la red y el marco; y por último, algunos modelos o salidas de los experimentos.

4 Técnica: Células ligeras			
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Inflar	Globos de látex, marcos y cuerdas	Presión interna	<p>A. TIPO DE GLOBO Grande Mediano Alargado</p> <p>B. PRESIÓN Alta Media Baja</p> <p>C. RESTRICCIÓN En red con marco Líneas sin marco Tensionado con marco</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$p = t1 / r1 + t2 / r2 \quad (1)$		Dobles curvaturas positivas o geometrías esferoides	
$\min n(p) \geq 0, 2 \cdot \max n(p) \quad (2)$			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>p= presión t= tensión de membrana r= radio de curvatura</p>	<p>(Otto, 2011) (Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001) (Patiño, Arango & Jaramillo, 2015) (Sastre, 2012)* (Eggers, 1977)*</p>		

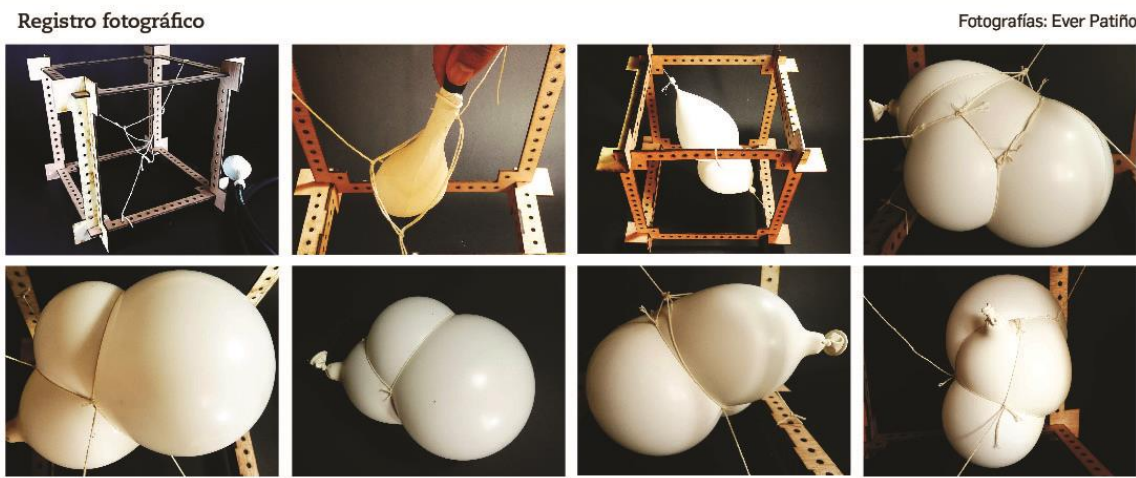


Fig. 10. Caracterización de la técnica (4) “células ligeras”. Fotografías: Ever Patiño

Asimismo, en la figura 11 se presenta otro ejemplo, la caracterización de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”. Las primeras fotografías muestran el proceso de entrecruzamiento de las restricciones lineales para luego hacer uso del equipo de termoformado y calentar las láminas de poliestireno. La ecuación describe la modificación por la gravedad de una malla de cadenas; en este caso se usa como analogía de los puntos sobre la superficie de la lámina plástica que se desplazan en el eje z, por la acción de la gravedad y la temperatura.

En la figura 12, se presenta la caracterización de la técnica (14) “partículas de arena y vibración”. La técnica describe el proceso de generación de figuras de Chladni (Gander & Kwok, 2012) por la acción de la vibración que produce un generador de frecuencias sobre una placa metálica. La ecuación explica el movimiento en un período de tiempo de una partícula de arena en los ejes “X”, “Y” y “Z”, por la acción de una fuerza originada por el sonido.



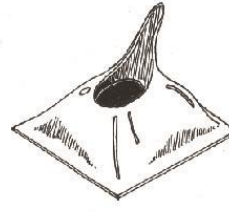
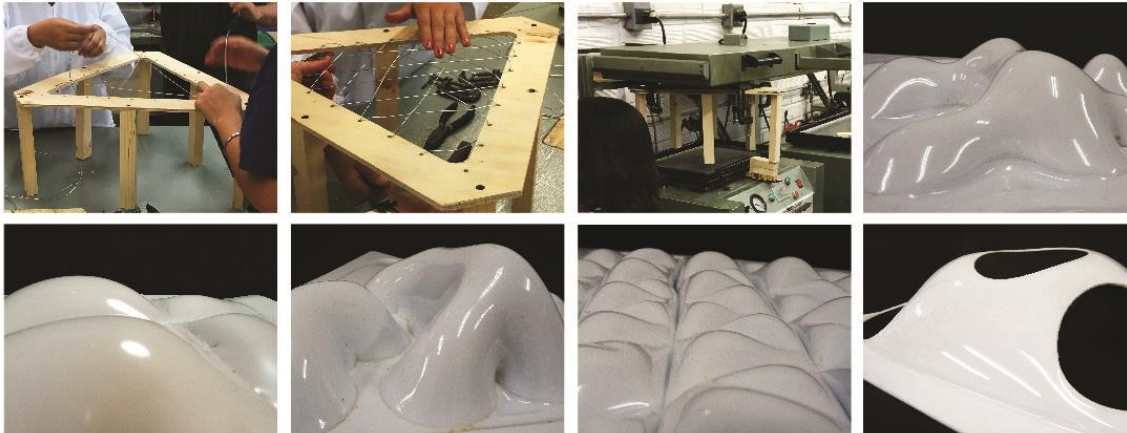
24 Técnica: Películas plásticas y gravedad			
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Tensionar	Láminas plásticas, restricciones rígida y calor	Gravedad y estado plástico	<p>A. CALIBRE POLIESTIRENO Grande (3mm) Mediano (2mm) Pequeño (1mm)</p> <p>B. TIEMPO Alto (2.30min) Medio (2 min) Bajo (1.30 min)</p> <p>C. RESTRICCIÓN Líneas simétricas Líneas asimétricas Perforaciones</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$E_d(c_j, s_j^{ab}, t_j^a, X^a, X^b, F^a) = 0 \quad (1)$		Dobles curvaturas positivas y negativas que generan curvas catenarias y superficies orgánicas.	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>E=equilibrio c=catenaria s=longitud t=tensión j=cable X=coordenadas F=cargas externas a=nodo b=nodo</p>	(Arbeláez & Patiño, 2010 (Such, et. al., 2009)*)	<p>Punto de calor → *</p> 	
Registro fotográfico		Fotografías: Ever Patiño y José Agudelo	
			

Fig. 11. Caracterización de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”. Fotografías: Ever Patiño y José Agudelo.

14 Técnica: Partículas de arena y vibración

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Arena, placa metálica, parlante, amplificador, generador de frecuencias	Vibración por cambio de frecuencias	<p>A. FIGURA Cuadrado Triángulo Pentágono</p> <p>B. FRECUENCIA Alto (1101-1300Hz) Medio (901-1100Hz) Bajo (750 - 900Hz)</p> <p>C. MATERIAL Arena Sólidos no newtonianos</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$F(x, y, t) = -Lz \quad (1)$		Redes regulares y semirregulares		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>F= fuerza x= coordenada y= coordenada z= coordenada t= tiempo L= operador diferencial espacial</p>	<p>(Gaß, 2016) (Steward & Golubitsky, 1995) (Gander & Kwok, 2012)*</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

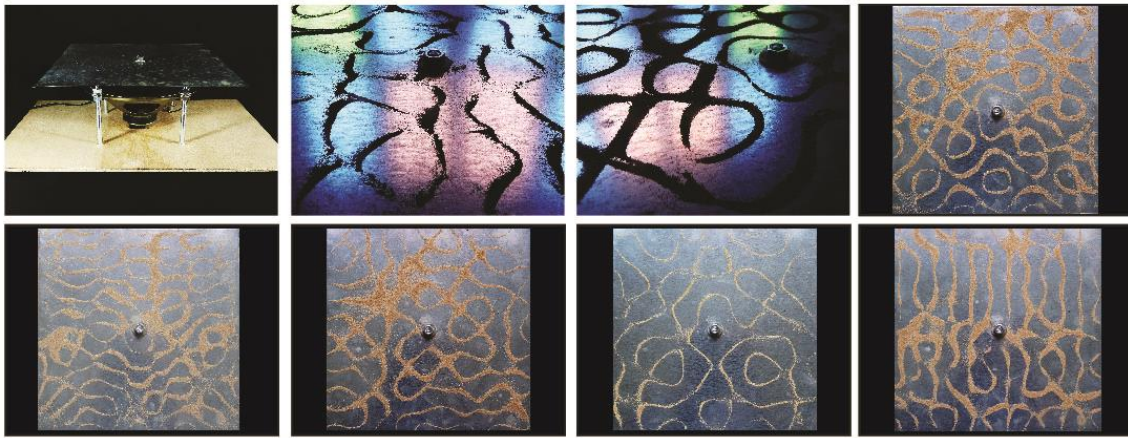


Fig. 12. Caracterización de la técnica (14) “Partículas de arena y vibración”.

Fotografías: Ever Patiño.

Finalmente, como parte de la caracterización de las técnicas se presentan en la figura 13 las ecuaciones matemáticas del principal proceso físicos asociado a las propiedades de las morfologías posibles con cada técnica. El alcance de la presente investigación limita el número de ecuaciones que se describen por cada una de las técnicas, puesto que la descripción matemática de todos los fenómenos vinculados a sólo una técnica, podría ser, per se, un proyecto de investigación individual. En este caso se están utilizando ecuaciones existentes para explicar procesos físicos complejos que vinculan más variables que las relacionadas en las ecuaciones.

Es por esto que en la figura 13 se agrupan las ecuaciones, estableciendo relaciones matemáticas entre diferentes técnicas, que permiten, entre otras cosas, comprobar la agrupación propuesta al iniciar la construcción del repertorio. En la figura 13 se encuentra la ecuación, sus parámetros y nomenclatura, su descripción general y su relación con la técnica, y la referencia de la ecuación para posteriores consultas.

El objetivo de las ecuaciones es aumentar la comprensión de los procesos físicos que permitirían programarlos en un software, y realizar simulaciones digitales para comprobar teóricamente el fenómeno. Esto posibilitaría, entre otras cosas, dibujar las ideas de diseño de producto en un entorno digital que contenga la información matemática estudiada.

	Ecuaación del principal fenómeno físico asociado a la morfología	Parámetros	Descripción de la ecuación	Referencias	
Inflar	1	$p = t1 / r1 + t2 / r2$ (1)	p = presión t = tensión de membrana	(1) Relación de la presión con la tensión de membrana y el radio de curvatura en todos los puntos de la superficie.	
	2	$min n(p) \geq 0,2 \cdot max n(p)$ (2)	r = radio de curvatura	(2) Relación entre la presión mínima y máxima para que no se generen arrugas.	
	3				
	4				
	5	$N_f = \left(\frac{N}{A}\right)^{3/2}$ (1)	N_f =Densidad celular N =# de células A =Área	(1) Relación de la densidad celular con el número de células en un área determinada. Todo resultante de la reacción química.	(Eggers, 1977) (Sastre, 2012) (Raofian, et. al., 2018)
Agrupar	6	$\Phi = \tan^{-1} [2H/(DA - d)]$ (1)	Φ =Ángulo de reposo H =Altura DA = Diámetro montículo d = Diámetro de salida	(1) Se describe el ensayo de vaciar arena sobre una superficie plana por un embudo de diámetro específico de salida, y su relación con la altura, el ángulo de reposo y el diámetro del montículo.	(Rodas & Rousé, 2010)
	7	$A = g_{L/1}^1 \cdot g_{L/2}^2 \cdot g_{L/4}^3 \cdot g_{L/8}^4$ (1)	A =Árbol g =Generación L =Longitud inicial	(1) Relación entre las longitudes de las ramas (subíndice), el número de ramas (superíndice), en un árbol de 4 generaciones de ramas, simétrico y con un patrón de crecimiento de 2.	El autor basado en (Le Noble, et. al., 2001)
	8	$l_{ij} = \frac{ b_i }{ I_i }$ (1) $l_{ji} = \frac{ b_j }{ I_j }$ (2) $e_{ij} = e_{ij} $ (3) $t_{ij} = \text{sgn}(\hat{e}_{ij} \cdot \hat{t}_{ij})$ (4)	b =Longitud barra r =radio e =Excentricidad l =Relación de acoplamiento t =Posición arriba/abajo	(1-4) Las 4 ecuaciones describen las relaciones básicas entre la longitud de las barras, la relación de acoplamiento, la posición y la excentricidad de una estructura de 3 barras.	(Parigi & Kirkegaard, 2014)
	9	$q_{1,2} \left[\sin\theta - \sin\left(\theta + \frac{2\pi j}{v}\right) \right] = 0$ (1)	q =Fuerza de densidad θ =Rotación relativa v =Caras del polígono j =Entero más pequeño que v	(1) Enfoque de equilibrio para encontrar la forma estable (=0) de un sistema simétrico en rotación.	(Connelly & Terrell, 1995)
	10	$d_i = \frac{5\sqrt{3}a_{c-c}}{\pi} (n^2 + nm + m^2)^{1/2}$ (1)	d =Diámetro esfera a =Longitud arista nm =Triángulos	(1) Describe la relación de la arista de los pentágonos y hexágonos con el diámetro de la esfera circunscrita en un icosaedro truncado formado por triángulos	(Dresselhaus, Dresselhaus & Eklund, 1996)
	11				
	12	$\vec{F} = Q_0 \vec{v} \times \vec{B}$ (1)	F =Fuerza magnética Q_0 =Carga positiva v =Velocidad B =Inducción magnética	(1) Describe el movimiento de una carga positiva, en relación con la velocidad y la fuerza que es perpendicular al plano donde están los vectores de velocidad e inducción magnética.	(Barco, Rojas & Restrepo, 2012)
	13				
	14	$F(x, y, t) = -Lz$ (1)	F =Fuerza x, y, z =Coordenadas t =Tiempo L =Operador diferencial espacial	(1) Describe el movimiento de una partícula en x, y, z por la acción de una fuerza, en un período de tiempo específico.	(Gander & Kwok, 2012)
	15	$F = m1_{\phi}^0; m2_{2\phi}^{L/2}; m3_{3\phi}^L; m4_{4\phi}^{Lx1.5}$ (1)	F =Fila m =módulo ϕ =1.618 L =longitud del módulo	(1) Progresión aritmética de una fila de módulos de longitud fija, que rotan en relación con el número áureo (subíndice) y se desplazan la mitad de su longitud (superíndice)	Del autor (2018)
Deconstruir	16	$\Delta x = v_o t + \frac{1}{2} at^2$ (1)	Δx =Desplazamiento v_o =Velocidad inicial a =Aceleración t =Intervalo de tiempo	(1) Relación del desplazamiento y de la velocidad de un cuerpo, en un intervalo de tiempo, con una aceleración constante producto de la gravedad. No describe el torque del ladrillo.	(Feynman, Leighton, & Sands, 1987)
	17	$\epsilon_{AB} = \frac{A'B' - AB}{AB}$ (1)	ϵ =Deformación A =Punto B =Punto	(1) Describe la deformación por alargamiento a acortamiento de dos puntos de un sólido en tensión.	(Cervera & Blanco, 2002)
	18	$\sigma_i = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_i + \nu \epsilon_2)$ (1)	σ =Tensión principal E =Módulo de Young ϵ =Tensiones ν =Coeficiente Poisson	(1) Relación de las diferentes tensiones que actúan en una superficie y ocasionan las arrugas.	(Magenat-Thalmann, 2002)

Fig. 13. Agrupación y descripción de las ecuaciones matemáticas asociadas al principal proceso físico de cada técnica. Autoría propia.

	Ecuación del principal fenómeno físico asociado a la morfología	Parámetros	Descripción de la ecuación	Referencias	
Deconstruir	19	$q_s = A \cdot \Omega_e^B$ (1)	q_s = Descarga sedimentos A, B = Condiciones de flujo y sedimento Ω_e = Variable efectiva	(1) Relación del lecho aluvial con la sedimentación, es decir agua y partículas. (Shih, Yang & Velleux, 2006)	
	20	$q_L = C_L \Delta p^n$ (1)	q_L = fuga volumen de aire C_L = coeficiente de fuga Δp = diferencia de presión n = flujo de aire	(1) Relación entre la presión y la tasa de flujo de aire de fuga definida por la ley de potencia entre la tasa de flujo de aire y la diferencia de presión a través de una forma. (Carrie & Wouters, 2012)	
	21	$K = \sigma_a \sqrt{\pi a}$ (1)	K = factor de tensión σ_a = tensión lejos de grieta a = Longitud semi-grieta	(1) Relación entre la tensión y la longitud de la semi-grieta en una superficie infinita de grietas centrales. (Mínguez, 1994)	
Tensionar	22	$E_4(c_j, s_j^{ab}, t_j^a X^a, X^b, F^a) = 0$ (1)	E = equilibrio	(1) Relación del cable y un conunto de restricciones en los diferentes nodos para que la catenaria encuentre el equilibrio =0.	(Such, et. al., 2009)
	23		c = catenaria		
	24		s = longitud		
	25		t = tensión		
	25		j = cable		
	25	X = coordenadas			
25	F = cargas externas				
25	a, b = nodos				
26	$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right)$ (1)	γ = tensión superficial Δp = diferencia de presión R = radio de curvatura	(1) Relación de la diferencia de presión, la tensión superficial y los radios de curvatura de los ejes paralelos a la superficie	(de Gennes, Brochard-Wyart & Quere, 2004)	
27	$E_x = \frac{A_x}{i_x s} E, E_y = \frac{A_y}{i_y s} E,$ (1)	E = Módulo de Young	(1) Relación en un material orthotropico elástico, del módulo de Young, un grosor equivalente a una membrana, las áreas de los cables y las distancias axiales paralelas a los ejes X y Y.	(Beatini & Royer-Carfagni, 2016)	
28		s = Grosor			
29		A = Área de cable			
30		i = Distancia axial			
30		x = Ejes			
31	$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j A_j \cos(\omega_j t + \Phi_j)$ (1)	x = Movimiento ω = Frecuencias propias Φ = Fases iniciales A = Vibración C = Amplitudes relativas n = Grados de libertad t = tiempo	(1) Descripción del movimiento armónico complejo o curva de Lissajous y su relación con las frecuencias, las fases, la vibración, las amplitudes relativas, grados de libertad y tiempo	(Feynman, Leighton, & Sands, 1987)	
Solidificar	32-36	$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \sigma$ (1)	ΔG = Variación total energía libre r = Radio Δg_v = Volumen σ = energía superficial	(1) Descripción de la solidificación de un líquido en forma de esfera, es decir variación total de energía libre y su relación con el radio de la esfera, su volumen y su superficie.	(Askeland, 1998)
	37	$\alpha = \pi(n - 2)/(2n)$ (1)	α = Ángulo de la diagonal de los rectángulos. n = # de rectángulos	(1) Descripción del desarrollo de un cilindro con el patrón yoshimura rectangular. Se relaciona el ángulo de la diagonal de los rectángulos con el # de rectángulos necesarios.	(Belcastro & Veenstra, 2009)
Doblar	38	$u(x, y) = \left(x, \frac{y}{\sqrt{2}}, \frac{y}{\sqrt{2}} \right)$ (1)	u = Superficie x, y = coordenadas	Descripción de la inmersión de una superficie plana en un espacio tridimensional a través de un dobléz de 90 grados.	(Dacorogna, Marcellini & Paolini, 2010)
	39	$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{\tan(\alpha(x))}{2 \cdot \frac{dx}{ds}} K_D(x) \cdot (\cot\beta_L(x) - \cot\beta_R(x))$ (1)	α = Ángulo de dobléz x = longitud superficie K = curvatura arista β = Ángulo entre la línea tangente a la curva y las líneas que se hacen luego del dobléz.	(1) Descripción de la derivada del ángulo de dobléz de dos caras de una superficie, utilizando una superelipse como arista y relacionando la longitud de la superficie y el ángulo entre la línea tangente a la curvatura y las líneas que se hacen luego del dobléz.	(Miyashita, 2015)
	40	$(\underline{K}_e + \underline{K}_u + \underline{K}_g) \cdot \underline{u} = \underline{F}$ (1)	F = Fuerza u = Distancia K_e = Rigidez elástica K_u = Matriz de rigidez K_g = Rigidez geométrica	(1) Descripción del estado de tensión del pandeo, previo al estado de equilibrio. Se relaciona la fuerza, la distancia y los tres componentes de rigidez.	(Lienhard, 2014)

Fig. 13. (Continuación). Agrupación y descripción de las ecuaciones matemáticas asociadas al principal proceso físico de cada técnica. Autoría propia.

4.3. Exploración cuantitativa y cualitativa de una de las técnicas (Objetivo específico B. Construir repertorio y objetivo específico C. Proponer pautas)

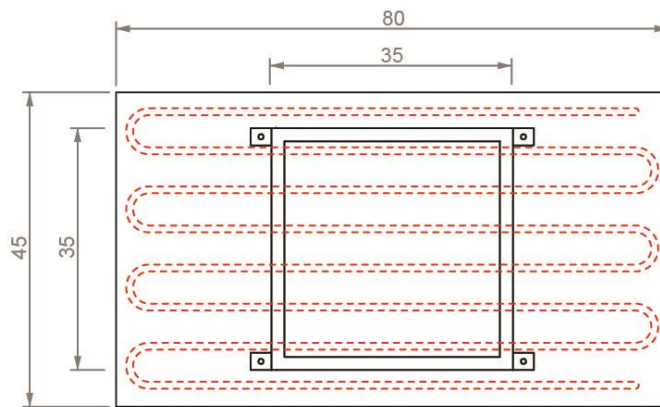
Dependiendo del proyecto, el diseñador deberá profundizar en las propiedades formales y estructurales antes de comenzar con la exploración creativa. En este caso, se seleccionó la técnica (24) “películas plásticas y gravedad” para ejemplificar el proceso y que el diseñador tenga un referente del procedimiento que debe realizar si necesita estudiar con antelación, y de manera rigurosa, las propiedades físicas de la técnica. Esta selección se hizo por la escasa aplicación que hasta ahora tiene la técnica, es decir pocos referentes bibliográficos, pero así mismo por la alta posibilidad de generar formas novedosas². Para ello se hizo de manera cuantitativa (i) la selección del material, luego un análisis geométrico, en este caso (ii) un análisis de deformación, y por último, (iii) un análisis estructural. Posteriormente, se realizó el acercamiento cualitativo, se realizó (iv) generando una variedad de formas con la técnica.

4.3.1. Selección del material para la técnica

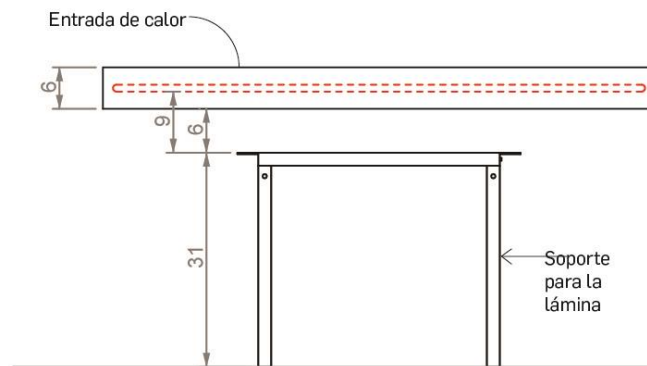
Para identificar el material polimérico con un mejor comportamiento a la deformación por una fuente de calor, se desarrolló un experimento con un diseño multifactorial con tres materiales laminares que se pudieran deformar con un equipo convencional de termoformado de construcción local (no tiene marca) como el que se ve en la figura 14. El experimento incluía como variables fijas el espesor de 2mm, la temperatura de 140°C y las características de la fuente de calor (ver figura 14). Las variables independientes fueron el material, el tipo de restricción, y el tiempo desde que la lámina llegaba a los 140°C. Los factores de ruido como el clima y el posible recalentamiento del equipo se disminuyeron realizando una muestra en orden aleatorio de los experimentos. Por último, las variables dependientes,

² Cronológicamente, esta exploración cuantitativa y cualitativa de la técnica se hizo posterior a la estimación cualitativa de aplicabilidad de las 40 técnicas del repertorio. En esta estimación, como se verá más adelante, la técnica (40) “películas plásticas y gravedad” obtuvo valoraciones positivas en la eficiencia, el nivel creativo y en la facilidad de aprendizaje. Esto, sumado a los pocos referentes bibliográficos encontrados y a la alta posibilidad de generar formas novedosas, fueron las razones de su elección. El resultado se ubicó en esta sección para darle mayor continuidad al texto, estableciendo una secuencialidad con los objetivos.

o las variables de respuesta que se analizaron para seleccionar el material fueron la altura de la deformación (H) y lo efectos no deseados en la geometría.



Vista superior de la entrada de calor / Medidas en cm



Vista frontal de la entrada de calor / Medidas en cm

Fig. 14. Características generales de la fuente de calor del equipo para termoformar. Fotografías y dibujos:
Ever Patiño.

Los tres materiales con los que se experimentó fueron: poliestireno cristal, poliestireno y acrílico cristal. El tipo de restricción fueron dos: sin ningún tipo de apoyo, o con un apoyo en cruz en el medio de la lámina. Los tiempos con los que se realizaron los experimentos fueron 45 y 75 segundos. El policarbonato y el polipropileno se consideraron inicialmente por sus propiedades de deformación similares frente a una fuente de calor, pero se descartaron por el costo elevado. La resistencia del equipo puede alcanzar 290°C, por tanto, el tiempo de los experimentos se tomó desde que la lámina alcanza en su centro 140°C. Esta es la temperatura que se tomó como base, teniendo en cuenta la temperatura de termoformado de los polímeros en cuestión: en un rango entre 135°C – 170°C para el acrílico, 140°C – 170°C para el poliestireno (Plastiglas, 2018). Es de anotar, que debido a la irregularidad de los espesores de las láminas y el tipo de fuente de calor, en este caso una resistencia superior en forma de “S”, la temperatura en todas las zonas de la lámina es desigual, y además el equipo no permite estabilizar la temperatura, por tanto después de alcanzar los 140°C, la temperatura seguía subiendo en relación con el tiempo que duraría el experimento.

En total, como se ve en la figura 15, se hicieron 12 experimentos en orden aleatorio, donde se intercalaba el material, el tipo de restricción y el tiempo. En los experimentos con el poliestireno cristal se presentaron diferentes efectos no deseados, como geometrías alabeadas y curvaturas discontinuas, que en conjunto con la altura de deformación, de hasta 16.6 cm sin restricciones, provocaron fracturas visibles a la vista. En los experimentos con el poliestireno, el material se deformó de una manera continua sin generar defectos perceptibles a la vista; sin restricciones alcanzó una altura superior a los otros dos materiales: 20.2cm.

Por último, en los experimentos con el acrílico, el material alcanzaba un estado viscoso pero no era vencido por la gravedad. Después de 70 segundos el material pierde estabilidad física y se generan burbujas internas. El defecto de las burbujas puede ser debido a las irregularidades en el espesor de la lámina, a diferencias considerables de temperatura en las diferentes zonas, o por la presencia de una alta humedad. En conclusión, se seleccionó la lámina de poliestireno por el comportamiento del material frente al calor, por la continuidad de la geometría y por su propiedad de alcanzar alturas mayores a los otros materiales sin fracturarse.



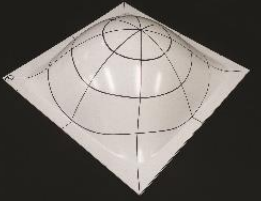
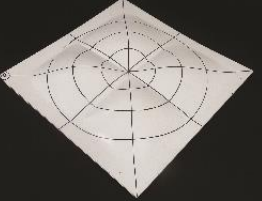


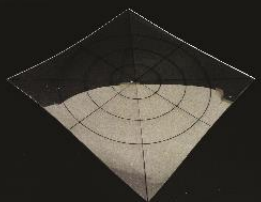
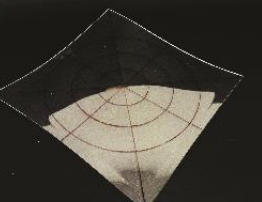
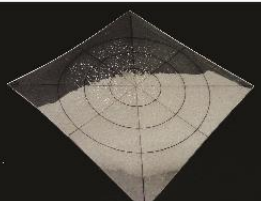
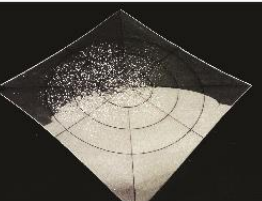
Material	Tiempo	Sin apoyo	Con apoyo
		Poliestireno cristal	
Poliestireno		 H=16.6cm / Curvatura uniforme	 H=16.5cm / Fractura
Poliestireno		 H=10.8cm / Curvatura uniforme	 H=2.6cm / Curvatura uniforme
Poliestireno		 H=20.2cm / Curvatura uniforme	 H=7.8cm / Curvatura uniforme
Acrílico cristal		 H=0cm / Alabeado	 H=0cm / Alabeado
Acrílico cristal		 H=0cm / Alabeado y burbujas	 H=0cm / Alabeado y burbujas

Fig.15. Experimentos para seleccionar el material de la técnica (24) películas plásticas y gravedad.

Fotografías: Ever Patiño.

4.3.2. Análisis de la deformación de los resultados de la técnica

Luego de la selección del material fue necesario realizar pruebas para entender el comportamiento de la forma frente a la temperatura del poliestireno. En términos generales, los polímeros, como es el caso del poliestireno, cambian su comportamiento cuando la temperatura aumenta o cuando aumenta la escala del tiempo del experimento. En temperaturas bajas se espera que el poliestireno se comporte parecido al vidrio, con un módulo de Young alto, es decir, en estado de rigidez asociada a pequeños desplazamientos de las moléculas. Por el contrario, a altas temperaturas, se espera que el poliestireno se comporte de manera viscosa, con un módulo de Young bajo, es decir, con deformaciones elásticas similares al caucho debido a la flexibilidad de las cadenas moleculares (Ward & Sweeney, 2012).

En la práctica, mientras se aumenta la temperatura de la lámina, hay varias transiciones entre el estado de rigidez y el de viscosidad, pero hay una transición primaria comúnmente llamada Transición vítrea que implica un gran cambio en el módulo de Young. A la temperatura que la produce se le denomina t_g (*Glass-transition temperature*). El cambio en la viscosidad por la temperatura, se puede explicar con la ecuación (3), en donde n es viscosidad, aT factor de cambio de temperatura, t temperatura del polímero y t_g la temperatura de transición vítrea (Ward & Sweeney, 2012):

$$aT = \frac{nt}{t_g} \quad (3)$$

Igualmente, la relación del Módulo de Young con tiempo de relajación del comportamiento viscoelástico se puede ver en la ecuación (4), donde t es tiempo, n es viscosidad y E es el módulo de Young (Ward & Sweeney, 2012):

$$t = \frac{n}{E} \quad (4)$$

Con el objetivo de controlar ese proceso de deformación causado por cambios en el comportamiento viscoelástico, se realizaron dos pruebas de deformación que permitieran evidenciar los cambios geométricos en la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”. Para las pruebas se utilizó la misma lámina de 2mm de poliestireno, la misma fuente de calor, y el mismo período de tiempo: 80 segundos después de alcanzar 140°C en el centro.

En la figura 16 se puede ver la prueba de deformación circular, en ella se utilizó un molde con un círculo troquelado, intentando recrear un proceso homogéneo. La figura muestra la lámina con 3

zonas y 8 ejes de análisis sin el efecto del aumento de la temperatura, y las mismas zonas y ejes en el modelo deformado. Midiendo los ejes se puede comprobar que entre más cerca esté la zona del centro menor es la deformación. Y entre más se aleja la zona del centro, mayor es la deformación, llegando a deformarse hasta un 110,2% de su longitud inicial. Por el contrario, el espesor de las zonas del poliestireno disminuye entre más lejos estén del centro de la lámina, disminuyendo el espesor hasta en un -59,09%.

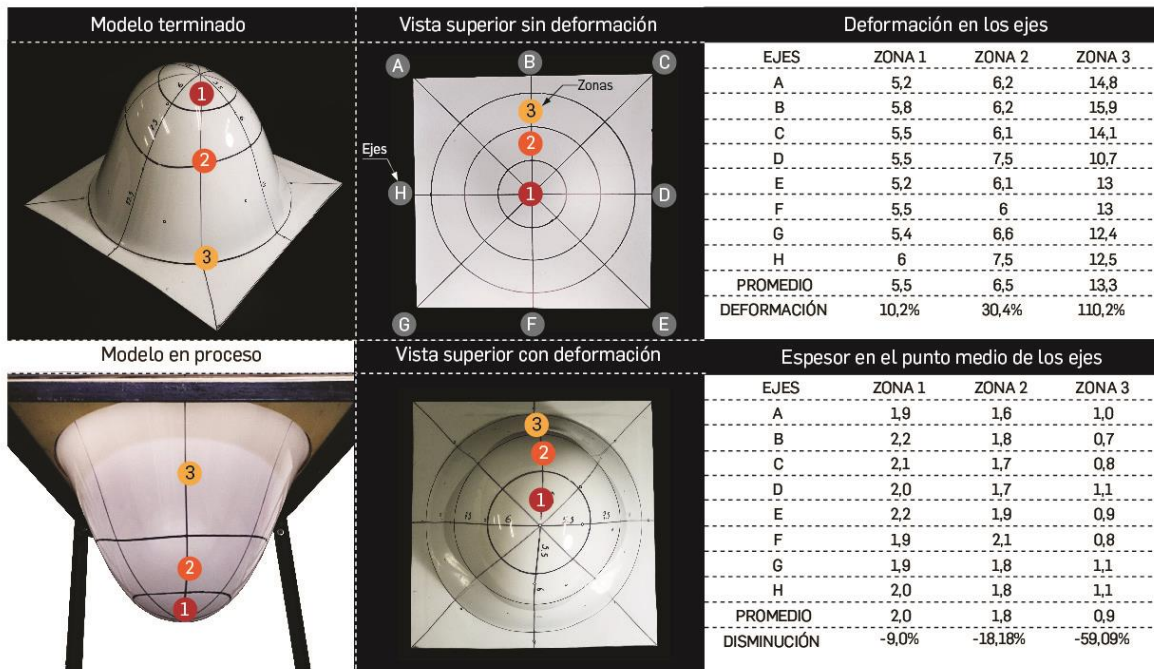


Fig. 16. Prueba de deformación circular. Fotografías: Ever Patiño.

En la figura 17 se puede ver la prueba de deformación irregular; en ella se utilizó un molde con troquel irregular para determinar las semejanzas y diferencias con la prueba de deformación circular. Al contrario de la prueba anterior, en esta, la zona 1, más cercana al centro, se deformó más que las otras dos zonas. La zona 3 quedó por fuera del área de influencia de la gravedad, pero dicha zona presentó sólo hasta un 20,5% de deformación. Esto se debe a que existen dentro de la misma zona puntos muy alejados de la zona de apoyo, y otros muy cercanos, haciendo que la deformación se adapte a este cambio de tensiones. Asimismo, en los espesores, hay cambios, pero no alcanzan a superar el -22,7%, muy por debajo de la prueba circular. Esto se debe a que hay menos peso que puede ser influenciado por la gravedad.

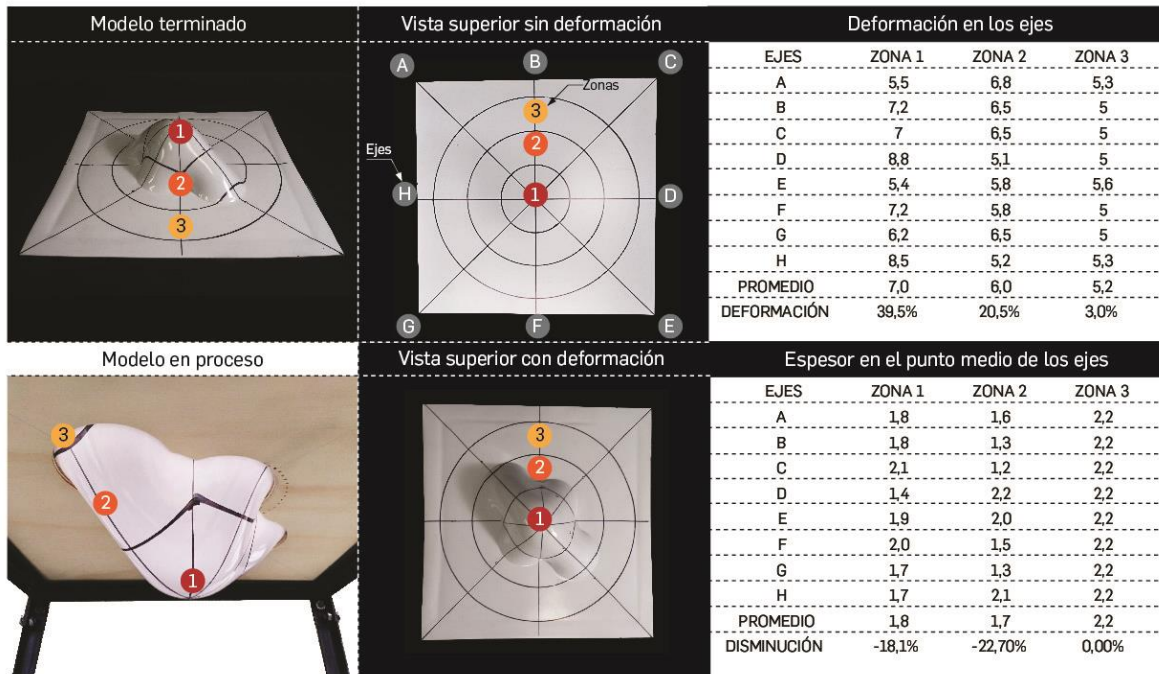


Fig. 17. Prueba de deformación irregular. Fotografías: Ever Patiño.

En la figura 18, se puede entender mejor este proceso de deformación. El primer punto de la lámina que es influenciado por la gravedad es el punto c, que es el punto más alejado de la superficie de apoyo. En la superficie de apoyo se genera un anclaje debido a la madera troquelada y a una lámina metálica tipo prensa, que se puede ver en las figuras 14 y 21, que sujeta la lámina de poliestireno desde la parte superior. En este anclaje se presenta N , como la tensión normal, perpendicular a la superficie de apoyo. Entre mayor sea la superficie que está por fuera del área de apoyo, mayor es el peso, y mayor es la tensión. Igualmente, la tensión de cada punto es el resultado de la tensión de la gravedad z , la tensión del anclaje superior t_1 , y la tensión del peso del material inferior t_2 . Entre más alto se encuentre el punto, es decir, más cercano a la superficie de apoyo, mayor es la tensión t_2 . En una forma como la de la figura 17, las tensiones son muy heterogéneas lo que complejiza su análisis, pero en una forma como la de la figura 16, las tensiones son más homogéneas y regulares, haciendo que el comportamiento se pueda predecir más fácilmente.

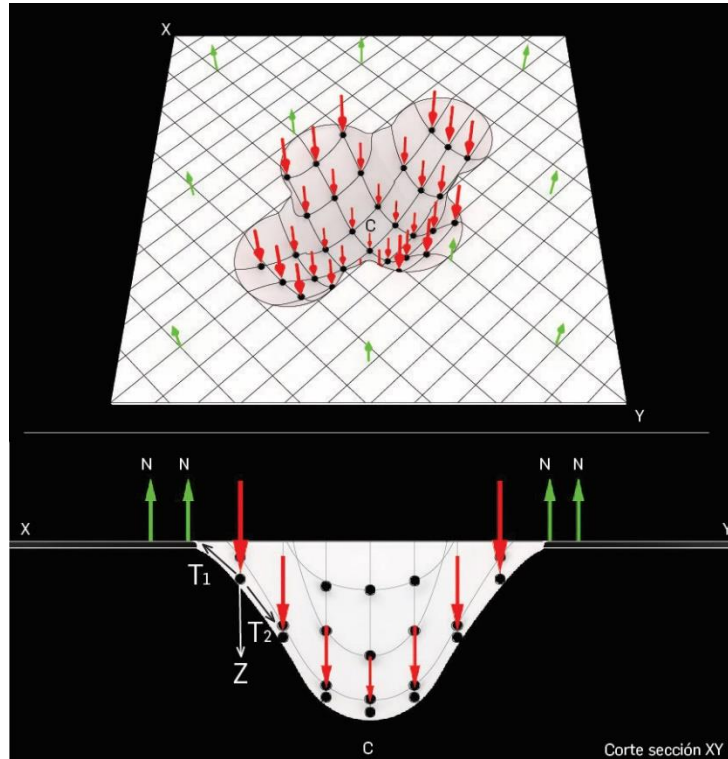


Fig. 18. Análisis físico de las tensiones y la influencia de la gravedad, en una película plástica con suministro de calor en la parte superior, y anclaje en el área plana. Autoría propia.

4.3.3. Análisis estructural de los resultados de una de las técnicas

Luego de entender el comportamiento del material frente al aumento de la temperatura, y sus cambios en la rigidez, fue necesario comprobar la capacidad estructural de la técnica. Teóricamente, las películas plásticas o telas elásticas que son haladas por la gravedad, generan curvas catenarias, descritas matemáticamente para la técnica (24) “películas plásticas y gravedad” en la figura 11. Para probar empíricamente esta proposición se escanearon las dos pruebas anteriores de deformación, y se cortaron las superficies con el software *Rhinoceros*. Por medio del *plugin Grasshopper*, que tiene programado el algoritmo que representa la fuerza de gravedad homogénea en una línea cualquiera, se modelaron las curvas catenarias entre los dos puntos que son extremos de los cortes. La longitud que se le dio a la catenaria fue la más cercana a la curva de cada corte. En la figura 19 y 20 se pueden ver los cortes con la relación gráfica de la catenaria. En los dos casos, se comprueba que las curvas originadas no son exactamente catenarias, es decir, que no tienen un comportamiento estructural igual a la catenaria cuando es invertida y es sometida a una fuerza de compresión, siendo geoméricamente la curva de la figura 19 similar a la catenaria, acercándose al modelo matemático ideal; y la curva de la prueba de deformación irregular de la figura 20 diferente a la geometría de la catenaria. A futuro

entonces, se podría modelar el tipo de curva que se genera empíricamente, a través de la modelación matemática de los diferentes factores anteriormente descritos. Esto sería un aporte a la modelación computacional de la forma generada bajo condiciones físicas reales, lo cual, a su vez, posee varios intereses. Primero, la simulación digital de procesos industriales; y segundo, la modelación y generación computacional de formas que imiten ciertas irregularidades que tendrían si hubiesen sido producidas físicamente.

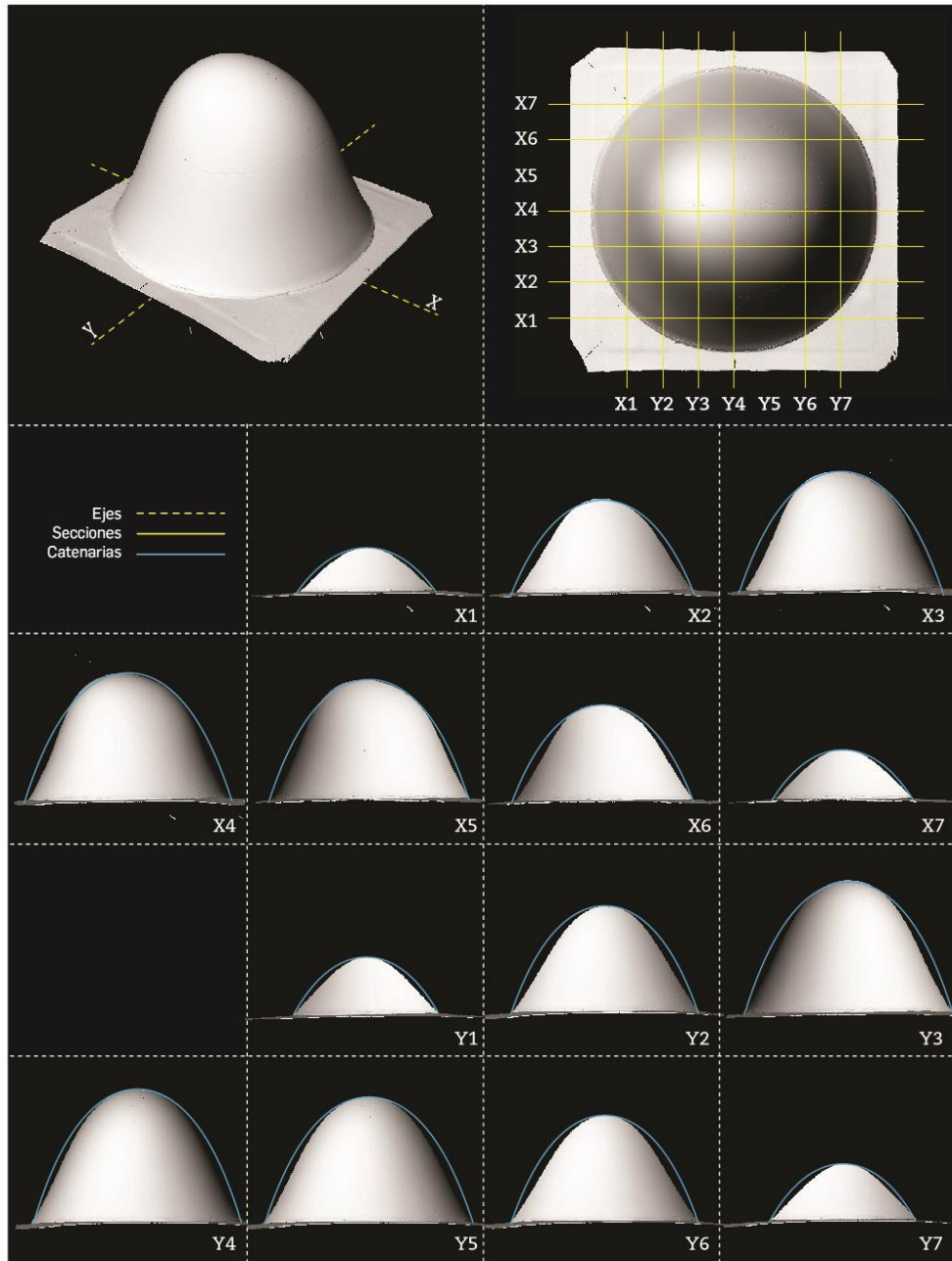


Fig. 19. Análisis estructural de la prueba de deformación circular.

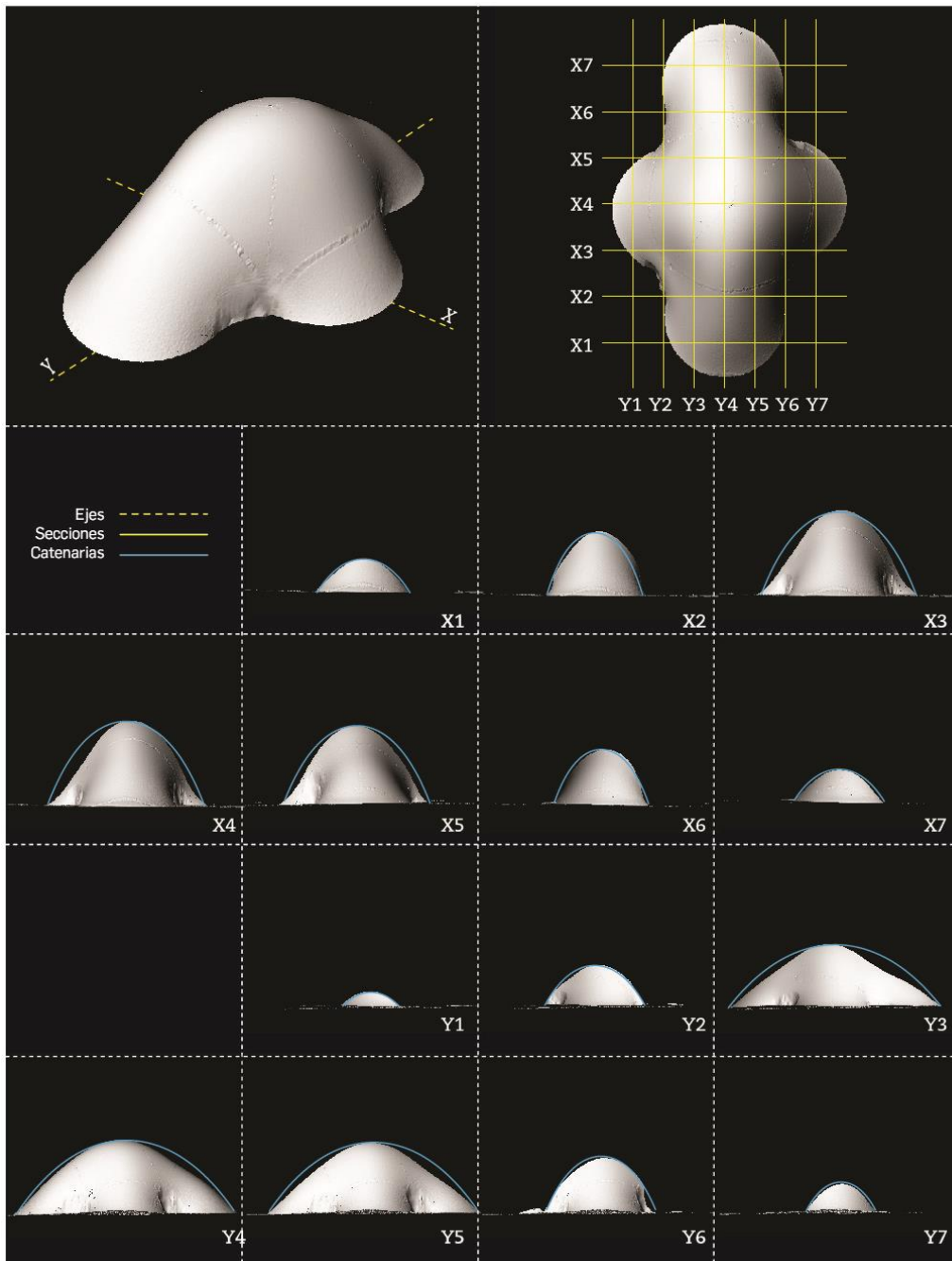


Fig. 20. Análisis estructural de la prueba de deformación irregular.

4.3.4. Generación de variedad de formas con la técnica

Posterior al análisis de deformación, y al análisis estructural del uso de la técnica (24) “película plásticas y gravedad”, específicamente utilizando poliestireno y temperatura, se estableció un esquema de experimentación semiestructurada con las variables promisorias que emergieron en la construcción del repertorio y en el análisis anterior. En este caso, semiestructurado, se entiende como la propuesta teórica de las posibles relaciones entre todas las variables independientes, pero la ejecución empírica de sólo unas relaciones.

Esto quiere decir que para en un experimento de 4 variables independientes, cada una con un promedio de 7 niveles, se tendrían más de 16.000 combinaciones posibles (4^7), que además se tendrían que evaluar cuantitativamente con las variables dependientes. Pero como no es el interés del procedimiento encontrar la mejor forma, o la variable que inflencie en mayor grado los resultados, se decidió establecer un enfoque cualitativo de exploración para ejecutar sólo las combinaciones que mostraran alguna posibilidad de variar significativamente los resultados. Esto se hizo con el objetivo de ampliar el espacio de exploración con los recursos que se tenían disponibles, es decir, aumentar la posibilidad de encontrar resultados diferentes entre sí en la generación de la forma, con poca inversión de tiempo e insumos materiales. Desde un enfoque cualitativo, cada vez que se comenzaba una combinación, se hacía a partir de los resultados de la combinación anterior.

En la figura 21 se puede ver el esquema de experimentación, con un ejemplo en línea punteada de la combinación de las variables independientes para un resultado particular que se ve en la parte inferior de la figura. Igualmente, se explica de manera gráfica el uso del soporte de la lámina de poliestireno que se muestra en la figura 9. Las variables independientes son entonces: (A) Tiempo, (B) Tipo de lámina, (C) Contorno, (D) Apoyo, (E) Corte y (F) Agrupación. Debido a los resultados en el análisis estructural, y lo alejados que estaban los modelos de las curvas catenarias, los niveles de cada una de las variables se establecieron con el objetivo de realizar una exploración de tipo formal y generar variedad de formas, mas no para realizar una exploración estructural.

En el ejemplo graficado en la figura 21 está la siguiente combinación: $A_c+B_b+C_b+D_c$. Esto quiere decir que para el primer modelo se utilizaron las siguientes especificaciones:

- A. Se calentó 60 segundos luego de que alcanzara los 140°
- B. Se usó una lámina de poliestireno de 2mm con un corte radial
- C. Se utilizó un contorno circular que limitar la deformación
- D. Se empleó un apoyo lineal en cruz para restringir igualmente la deformación.

Para el segundo modelo, se le realiza un corte siguiendo la geometría resultante de la deformación del modelo anterior y se le agrupa con una geometría similar para que se configure como un sólido o volumen tridimensional. Es decir que se le adiciona a la combinación Ea y Fb.

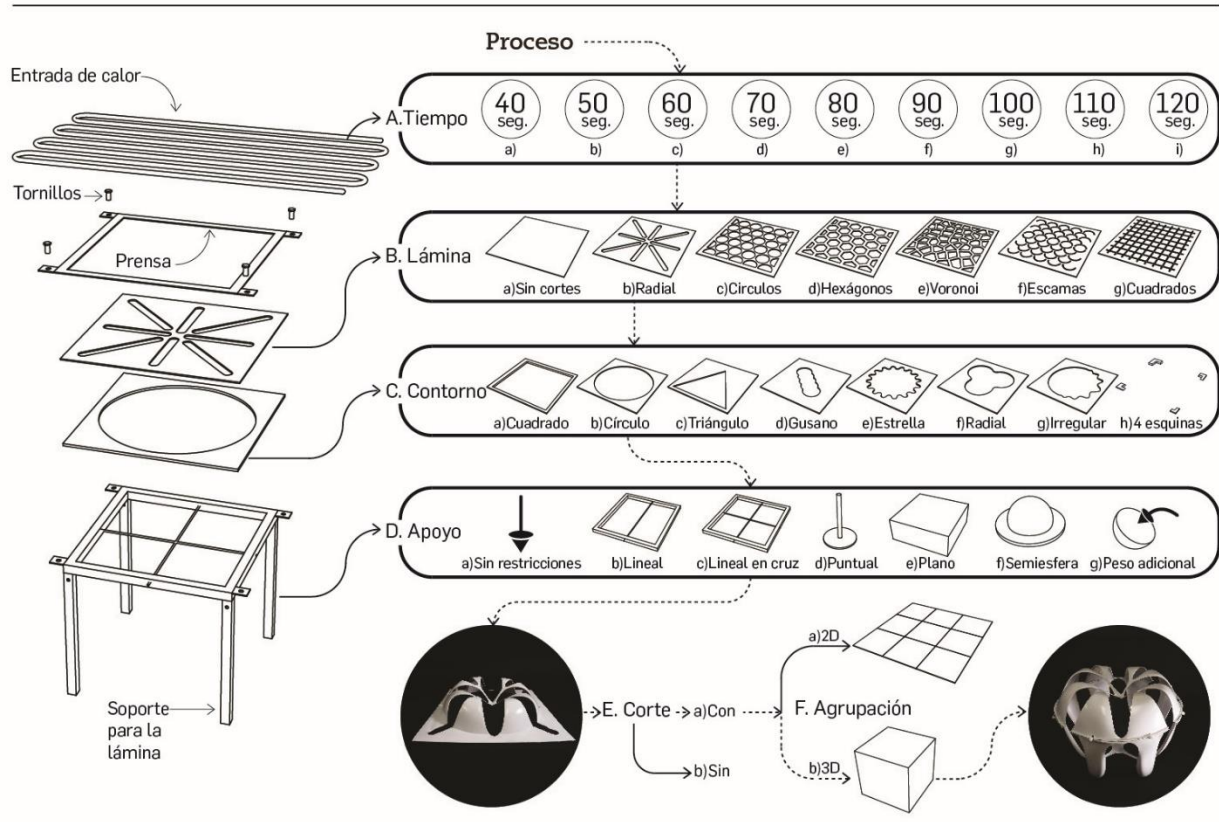


Fig. 21. Esquema del proceso de experimentación semiestructurada con la técnica (24) películas plásticas y gravedad. Dibujos y fotografías: Ever Patiño.

En la figura 22 se observan los resultados del esquema de experimentación semiestructurada. La variable (E) Corte, se definió para cambiar la percepción del resultado, para cambiar de una superficie, a un sólido tridimensional, que si bien, geoméricamente sólo se le sustrajo un área plana, permite percibir el objeto de manera diferente. En la práctica, se cortaron los modelos por la línea de deformación que estableció la variable (C) Contorno, o por la unión de esta línea con la geometría de las perforaciones de la variable (B) Lámina. Por otro lado, en la variable (F) Agrupación, cuyos modelos se pueden ver en la figura 22 en los resultados 17 al 24, se observan la utilización de simetrías y repeticiones para agrupar en un plano, es decir, agrupación 2D; y para agrupar con simetrías y repeticiones en un espacio tridimensional, es decir, agrupación 3D.

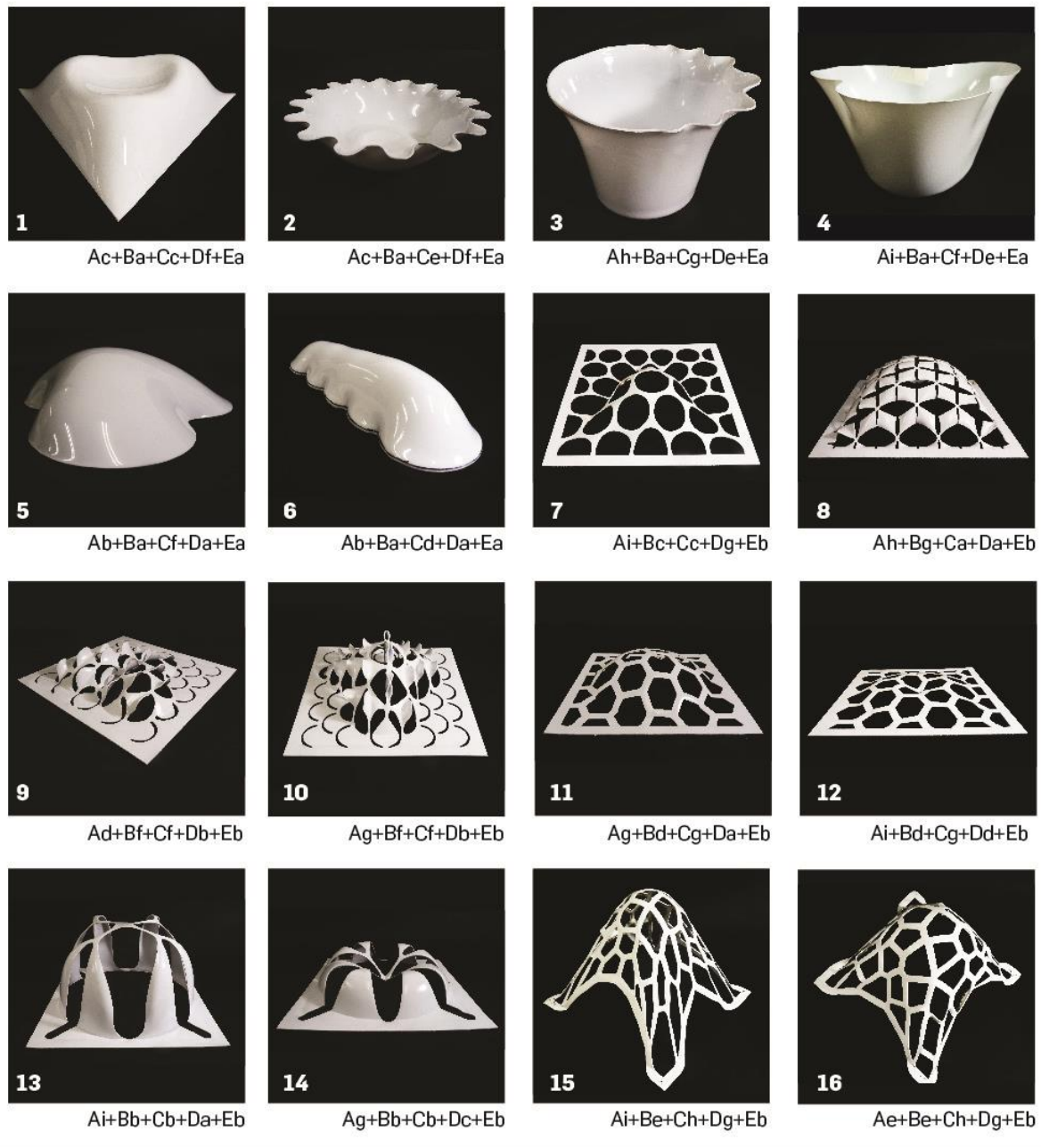


Fig. 22. Resultados de la exploración semiestructurada con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

Fotografías: Ever Patiño.

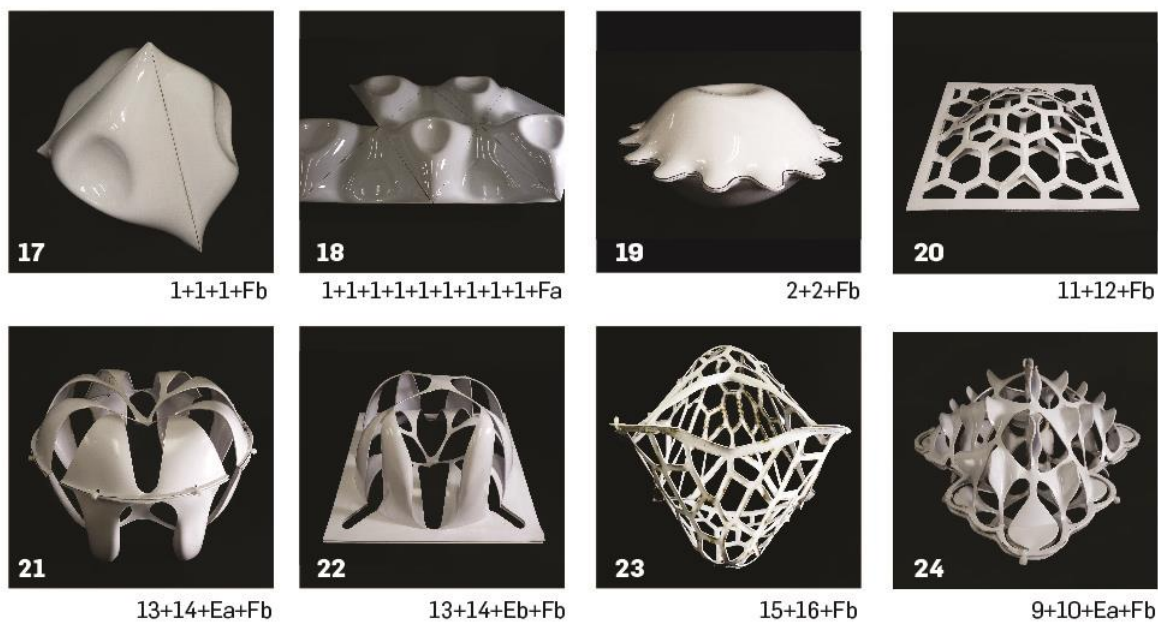


Fig. 22. (Continuación). Resultados de la exploración semiestructurada con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”. Fotografías: Ever Patiño.

Por ejemplo, en resultado número 17 de la figura 22, se utilizan tres modelos del resultado número 1 para agruparse tridimensionalmente como un tetraedro, es decir: $1+1+1+Fb$. Igualmente, en el resultado número 18 se utilizan 9 modelos del resultado 1 para generar una agrupación en un plano y ocupar un espacio bidimensional, es decir: $1+1+1+1+1+1+1+1+Fa$.

En los resultados se evidencia una variedad geométrica superior a la variedad lograda en los modelos desarrollados en la construcción del repertorio. En otras palabras, los resultados son diferentes geoméricamente entre sí. Esto aporta pruebas de las posibilidades creativas de esta técnica según Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003), y la relación dependiente, en la fase de generación de la forma, entre la cantidad de ideas, la variedad de ideas y la novedad de las ideas.

4.4. Estimación cualitativa de aplicabilidad en el diseño de productos de las 40 técnicas del repertorio (Objetivo específico C. Proponer pautas)

Luego de caracterizar las técnicas fue necesario establecer criterios que permitieran sugerir respuestas alrededor de las pregunta de investigación: (i) ¿Cómo soportar el proceso de generación de la forma en el diseño de producto usando el *form-finding* analógico? Y (ii) ¿Cómo soportar el proceso creativo

del diseño de producto haciendo uso del *form-finding* analógico? Para ello fue necesario subdividirla en preguntas encaminadas a aclarar cualitativamente lo que busca el diseñador al momento de seleccionar una nueva herramienta que le ayude en el proceso de representación y de generación de la forma.

El diseñador, ya sea experto o novato, estudiante o profesor, debe saber si la técnica funciona, es decir ¿la técnica es aplicable, se puede usar? ¿Es **eficaz** en qué? Ahora el sujeto sabe que la técnica funciona, pero se preguntará ¿el uso de la técnica qué ventajas presenta? En otras palabras, ¿la técnica es **eficiente** para qué y con respecto a qué? Igualmente, al estar enmarcada en una actividad creativa, las técnicas deben potencializar y no restringir el ejercicio creativo del diseñador. Es decir, el diseñador se preguntará sobre si los modelos resultantes de la experimentación con la técnica presentan **efectividad de la ideación** (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Y por último, el diseñador se preguntará sobre la dificultad de aprender y dominar la técnica. En otras palabras, la **facilidad de aprendizaje** que presenta la técnica.

4.4.1. Eficacia de las técnicas

La eficacia se define en el lenguaje cotidiano como la capacidad de lograr el efecto que se espera (RAE, 2018), en este caso, que la técnica se pueda usar para generar ideas de diseño. Para valorarla cualitativamente, se les pidió a un grupo de 4 estudiantes que experimentaran con cada técnica y luego de manera independiente y por medio de la asociación, dibujaran bocetos rápidos donde representaran en aplicaciones de diseño lo que acababan de ver (ver figura 23). Cada estudiante se encargaba de manera individual de una técnica. Los resultados se agrupaban siguiendo las categorías de productos de diseño de la figura 23, basadas en las categorías utilizadas en dos concursos de diseño reconocidos internacionalmente, y se contabilizaban con el fin de sugerir relaciones entre las categorías de diseño de productos y las técnicas del repertorio. En total se desarrollaron 289 bocetos, cuyos resultados se consignaron en la matriz gráfica de categorías de productos contra todas las técnicas de la figura 24 y 25, en la donde se identifican las categorías en las que se desarrollaron los bocetos y se cuantifican con un código de color y tamaño. Un resumen de la cuantificación de una de las técnicas se puede ver en la figura 26 (en el anexo 2 se pueden ver los bocetos desarrollados para algunas técnicas). Si bien los resultados no son concluyentes, proponen un camino de valoración por medio de la asociación a partir de estímulos visuales.

	MUEBLES PARA INTERIOR Sillas, mesas, camas, armarios, sofás, reposapiés, cajonera, nocheros, gabinetes, barras.		VEHÍCULOS A TRACCIÓN/ PROPULSIÓN HUMANA Y SUS PARTES Bicicletas, embarcaciones.
	ENVASES Empaques para alimentos, botellas, bolsas, embalajes.		ACCESORIOS PARA COCINA Y MESA Ollas, cuchillos, cucharas, tenedores, bandejas, bowls, paneras, vasos, tasas.
	ACCESORIOS DE VESTUARIO Y COMPLEMENTOS Bolsos, maletas, gafas, relojes, sombreros, calzado, sombrillas, joyería.		EQUIPAMIENTO MÉDICO Productos clínicos de diagnóstico, equipamiento para emergencia, equipamiento para laboratorio.
	ILUMINACIÓN Y COMPLEMENTOS Lámparas de escritorio, de pie, de pared, de techo, materas, jarrones.		ACCESORIOS PARA COCINA Y BAÑO Fregadero, lavamanos, grifos, duchas, sanitarios, bidets.
	ELECTRODOMÉSTICOS, LÍNEA BLANCA Microondas, nevera, lavadora, plancha, ventilador, cafetera, licuadora.		ACCESORIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN Fachadas, baldosas, cubiertas, superficies, puertas, ventanas, divisiones.
	DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y DIGITALES Computadores, celulares, sistemas de sonido, televisores, tabletas.		EQUIPAMIENTO PARA DEPORTE Balones, discos, skateboards, rodilleras, elementos de protección.
	VEHÍCULOS A MOTOR Y SUS PARTES Carros, motocicletas, trenes, botes, barcos, buses, aviones.		HERRAMIENTAS DE MANO Martillos, taladros, herramientas para el jardín, sierras.
	MAQUINARIA PESADA Máquinas para la agricultura, la minería, la pesca, la construcción.		JUGUETES Y OCIO Instrumentos musicales, juguetes para niños, juguetes para adultos.
	JUGUETES PARA MASCOTAS Accesorios para el acuario, gatos, perros, roedores.		MATERIALES Y SUPERFICIES Revestimientos de suelo, materiales antideslizantes, maderas compuestas, suelos, tapetes, vidrio, laminados compuestos.
	MOBILIARIO URBANO Señalización, bolardos, bancas, paraderos.		

Fig. 23. Categorías de diseño de productos basada en la clasificación propuesta por los concursos de diseño: *A' Design Award & Competition* (2018) y *RedDot Design Award* (2018). Autoría propia.

Las tres categorías que presentaron mayor número de bocetos como respuesta a las asociaciones fueron: (i) iluminación y complementos, como lámparas de escritorio, de pie, de pared, jarrones, macetas y accesorios de decoración (74 bocetos); (ii) muebles para interior, como sillas, mesas y sofás (71 bocetos); e (iii) insumos para la construcción, como fachadas, baldosas, cubiertas, puertas y

divisiones (35 bocetos). En un segundo lugar, se encuentran 4 categorías con un número importante de asociaciones: (iv) mobiliario urbano, como señalización, bancas, paraderos y bolardos (27 bocetos); (v) accesorios de vestuario y complementos, como bolsos, sombreros, calzado, maletas, sombrillas y joyería (24 bocetos); (vi) accesorios para cocina y mesa, como ollas, bandejas, bowls, y paneras (20 bocetos); y por último, (vii) juguetes y ocio, como instrumentos musicales y juguetes para niños (13 bocetos). En general, se puede concluir, que la mayoría de asociaciones se encuentran en las categorías de diseño de producto donde tradicionalmente se presenta mayor variedad y exploración geométrica, como: sillas, lámparas y accesorios. Se podría realizar una prueba similar con otro tipo de estímulos, cómo referentes naturales, por ejemplo, para verificar si las asociaciones en las categorías tienen una relación directa con el estímulo o son independientes del estímulo. Es decir, verificar si los sujetos siguen haciendo mayor número de bocetos en las mismas categorías mencionadas o éstas cambian según el estímulo.

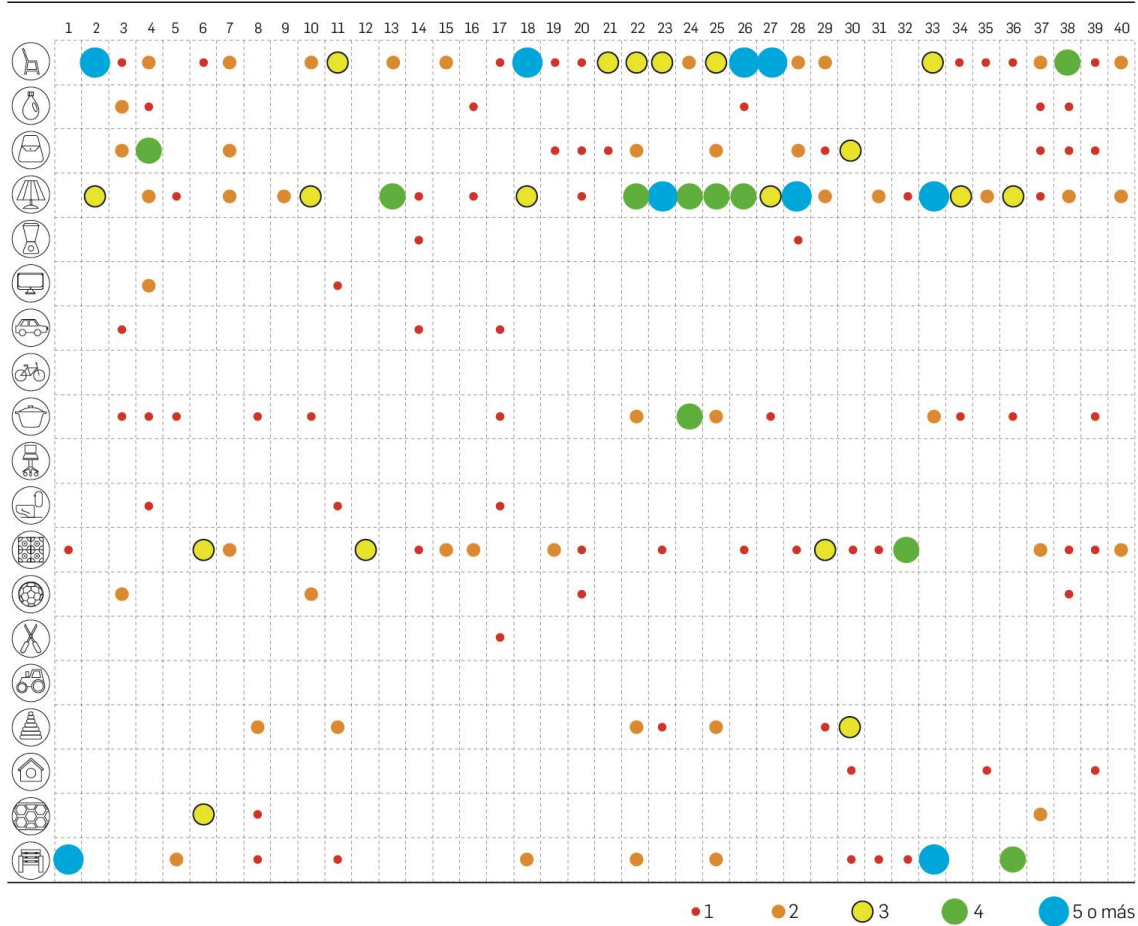


Fig. 24. Matriz gráfica de las categorías de productos de diseño vs todas las técnicas, donde se consignan el número de bocetos desarrollado. Autoría propia.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
	5	1	2		1	2				2	3		2		2		1	5	1	1	3	3	3	2	3	5	5	2	2					3	1	1	1	2	4	1	2		
		2	1													1										1													1	1			
		2	4			2													1	1	1	2			2			2	1	3								1	1	1			
	3		2	1		2		2	3				4	1		1		3		1		4	5	4	4	4	3	5	2		2	1	5	3	2	3	1	2		2			
														1															1														
			2								1																																
		1											1				1																										
		1	1	1			1		1								1				2		4	2		1						2	1		1				1				
			1								1						1																										
	1				3	2						3		1	2	2			2	1			1			1		1	3	1	1	4					2	1	1	2			
		2								2											1																				1		
																	1																										
							2				2											2	1		2					1	3												
																															1						1				1		
					3		1																																	2			
	5			2		1				1								2				2		2		2				1	1	1	5			4							
	5	8	9	13	4	7	8	8	2	8	8	3	6	4	4	4	5	10	4	5	4	15	10	10	15	11	9	11	9	9	4	6	15	5	4	9	9	10	5	6			

Fig. 25. Matriz con los valores numéricos de los bocetos desarrollados en cada técnica para cada categoría de productos. Autoría propia.

Por otro lado, tres de las categorías no presentaron ningún boceto por asociación. Estas tienen en común pertenecer a contextos especializados, con objetivos funcionales que priman sobre los atributos geométricos, y con formas prototípicas con poca variación histórica: (i) vehículos a tracción o propulsión humana, (ii) equipamiento médico y (iii) maquinaria pesada. Las demás categorías de productos de diseño presentaron entre 1 y 8 bocetos por asociación. Igualmente, ninguna técnica presentó un número importante de bocetos en varias categorías de productos.

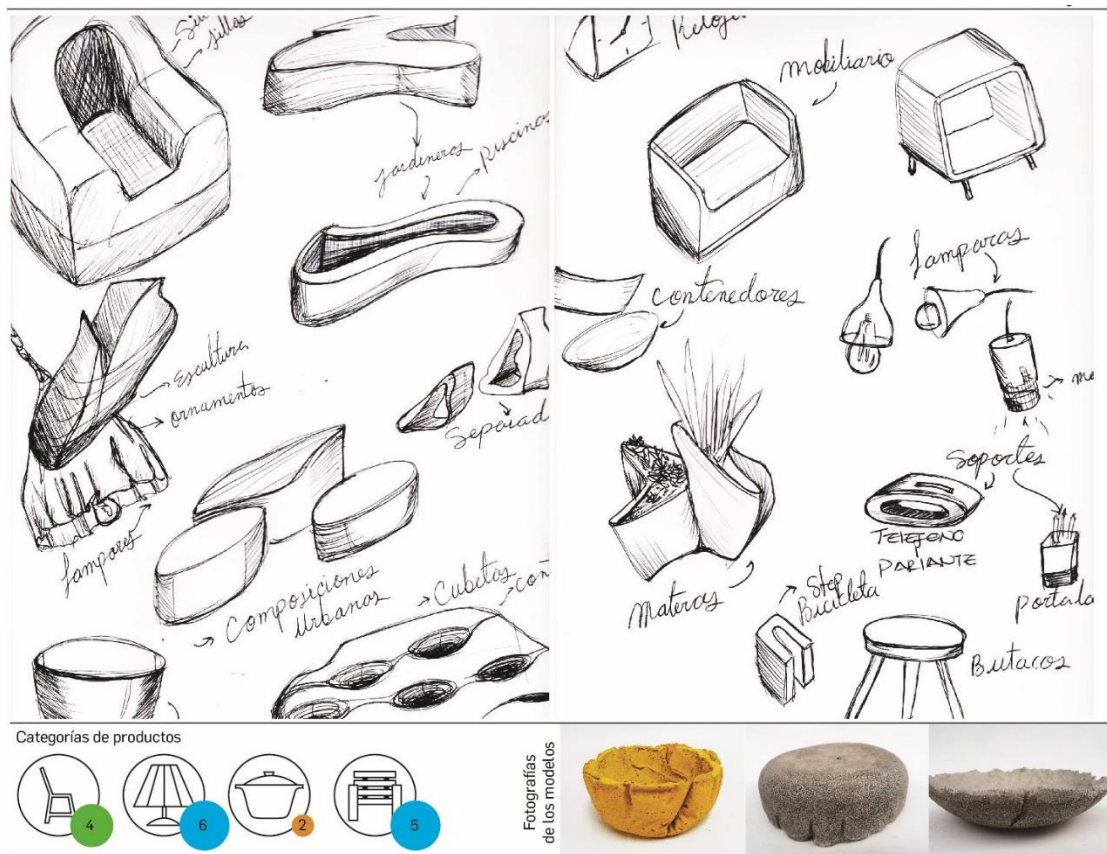


Fig. 26. Estimación de la eficacia a partir de las categorías de productos. Técnica (33) moldes flexibles y concreto. Bocetos y fotografías de Camila Aguirre.

4.4.2. Eficiencia de las técnicas

La valoración de la eficiencia de las técnicas para desarrollar ideas de diseño se hizo de dos maneras. Primero, por la posibilidad que tienen las técnicas de maximizar y/o minimizar características geométricas, estructurales o procedimentales, siguiendo el procedimiento propuesto por el método TRIZ (Chai, Zhang & Tan, 2005). Segundo, por la relación del costo con el beneficio (De Angeli, Lynch, & Johnson, 2002), que es el nivel de inversión económica necesario para utilizar las técnicas y el nivel de inversión de mano de obra, representado en el número de acciones que efectúa el diseñador.

El primer tipo de eficiencia se registró en la matriz de la figura 7. Con base en la revisión bibliográfica se clasificaron las técnicas según las variables que se podían maximizar y/o minimizar, tomados como

la capacidad de aumentar o disminuir propiedades hasta un punto máximo o mínimo. En maximizar se encuentra la resistencia estructural, tomada como la capacidad de maximizar las propiedades mecánicas sin, por ejemplo, utilizar más material o sin cambiar a un material de más altas prestaciones mecánicas; maximizar el volumen, que es la propiedad de contener el mayor volumen con la menor área superficial; y maximizar el empaquetamiento, que es la propiedad de ocupar un volumen dejando el mínimo de espacios vacíos (Devlin, 2000). De la misma manera, en minimizar se encuentra el peso, que es la propiedad de disminuir el peso del objeto sin afectar las propiedades estructurales; la longitud, que es la propiedad de unir diferentes puntos en el espacio con la mínima distancia posible; y por último, los recursos, que es la propiedad de disminuir tiempo, costos y mano de obra en el proyecto (ver figura 27).

De las 40 técnicas, seis presentan, según la bibliografía, entre cuatro y cinco posibilidades para maximizar y minimizar: (2) “modelo de empaquetamiento de burbujas”, (3) “aparatos para crear la forma de estructuras neumáticas”, (4) “células ligeras”, (24) “películas plásticas y gravedad”, (28) “jabón y superficies mínimas” y (34) “impresora de cerámica catenaria”. Por ejemplo, las técnicas (2), (3) y (4) pertenecen al grupo Inflar, y tienen la particularidad, por la elasticidad de la membrana y la presión interna, de generar superficies de mínima área superficial y por tanto, de mínimo peso. Igualmente, encierran con esa área el mayor volumen, y las dobles curvaturas generadas se pueden comportar, si se encuentran en estado rígido, como una cáscara estructural (Otto, 2011; Otto & Rasch 2001).

Para ilustrar mejor este tipo de eficiencia, la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, tiene la característica de generar dobles curvaturas por la acción de la fuerza de la gravedad. Teóricamente, esto genera cáscaras estructurales con presencia de curvas catenarias que permiten disminuir peso sin afectar la estructura, pero ya se mostró que empíricamente se generan otro tipo de curvas con características geométricas similares (ver § 4.3.3). Además, las curvaturas disminuyen área superficial y aumentan el volumen contenido. Por último, la técnica permite construir formas que se pueden convertir en moldes para vaciar cerámica o concreto, disminuyendo los recursos necesarios para esta operación (Bradley & Gohnert, 2016; Arbeláez y Patiño, 2010).

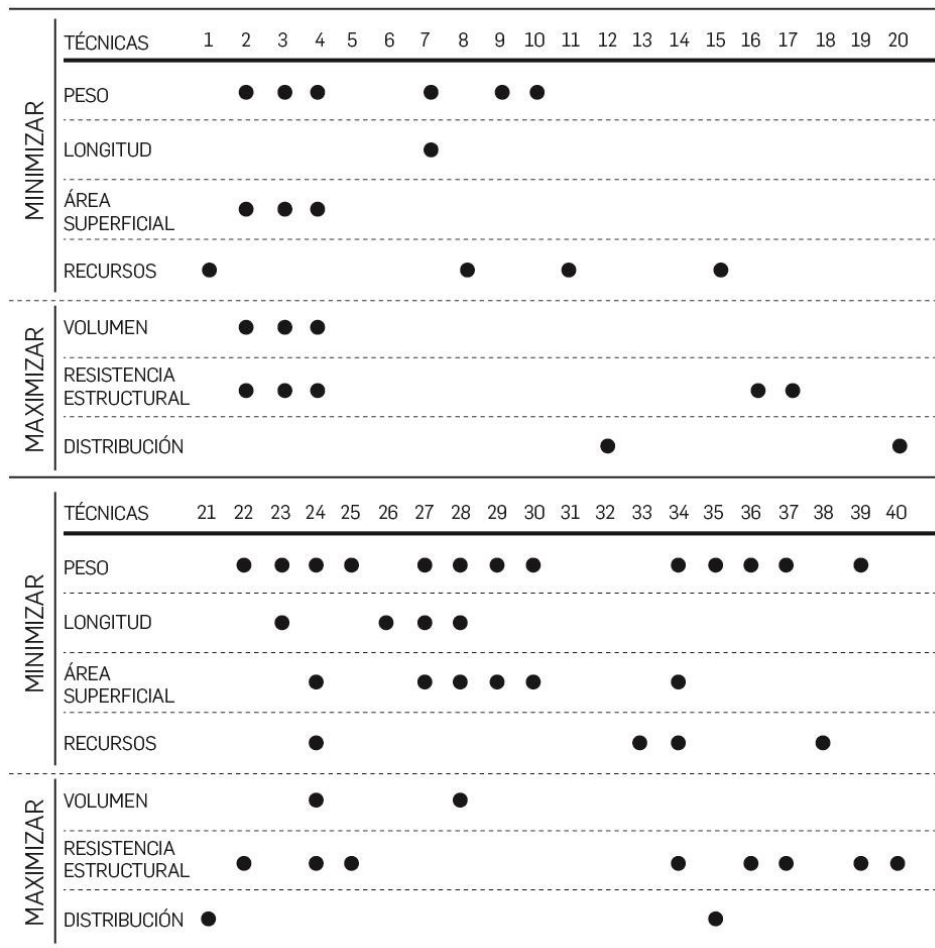


Fig. 27. Matriz de las variables a maximizar y/o minimizar vs todas las técnicas. Autoría propia.

Para el segundo tipo de eficiencia se extrajo la información del registro que hicieron los auxiliares de investigación al construir los modelos. La matriz de la figura 28 da cuenta del nivel de inversión económica necesaria para fabricar un modelo y una aproximación al número de acciones que el diseñador debe efectuar para fabricarlo, como movimientos de las manos en el espacio, cortes, pegas y sujeciones. Estos resultados sugieren diferencias significativas entre las técnicas que el diseñador deberá sopesar para seleccionarlas, o para determinar si el tipo de representación que propone el *form-finding*, es decir el modelo físico, y su costo asociado, se puedan adaptar a su proyecto de diseño. Por ejemplo, para hacer un modelo con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, son necesarios entre 2.001COP y 4.000COP. De manera similar se necesitan realizar entre 11 y 20 acciones, entre: cortar el material, ubicar el material, cerrar la prensa, encender el equipo, instalar las restricciones y cortar el resultado. Es decir que tiene una valoración intermedia en el costo, y positiva en el número de acciones.

No obstante, en general, si se observa el código de color y de tamaño de la figura 22, se encuentra un estimado que tiende a ser positivo; la mayoría de las técnicas tienen un costo inferior de \$ 4.000 COP por modelo, con menos de 40 acciones. Es decir, que la relación del costo económico y de recursos (acciones) con el beneficio sugiere que son técnicas aptas para el trabajo creativo en la fase de generación de la forma, ya que es un costo similar al necesario para construir modelos convencionales tridimensionales en cartón, madera y alambre. Asimismo, en relación con el número de acciones, son en general técnicas con un nivel de auto-organización alto, ya que si aumentan las acciones, aumenta la manipulación que el diseñador debe hacer en la fase de generación de la forma y disminuye la auto-organización de la técnica.

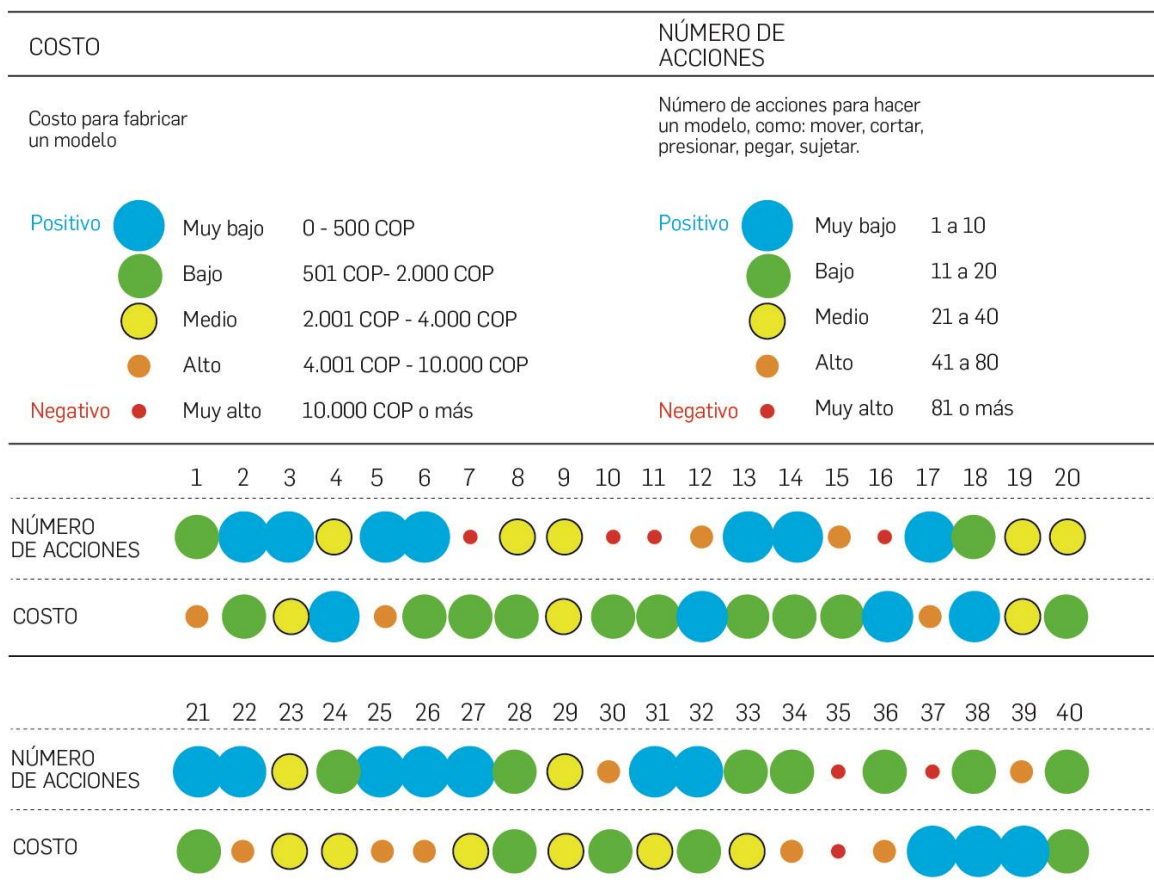


Fig. 28. Matriz entre la inversión económica y la inversión en mano de obra vs todas las técnicas.

4.4.3. Efectividad cualitativa de la ideación

Se utilizan las métricas que proponen Shah y Vargas-Hernandez (2003) para medir cuantitativamente la efectividad de la ideación en la representación manual 2D: cantidad, calidad y variedad; pero en este caso se proponen para estimar cualitativamente la efectividad de la ideación, evaluando los resultados o modelos tridimensionales de las técnicas de *form-finding*; no se utiliza la calidad pues esta se valoró cualitativamente en la eficacia de la aplicabilidad. Shah y Vargas-Hernandez (2003) sostienen que entre más ideas se generen en un corto periodo de tiempo, más posibilidades existen de generar ideas con mayor nivel creativo. Por otro lado, si se generan muchas ideas, pero éstas no presentan cambios sustanciales entre ellas, se disminuye igualmente la posibilidad de la generación de ideas con alto nivel creativo. Por último, si se generan muchas ideas, con diferencias geométricas entre sí, pero no son novedosas en un dominio específico de conocimiento, es decir, son formas convencionales o típicas, podrían no tener aplicabilidad en el diseño de producto.

Por medio de un grupo focal integrado por los 4 estudiantes de Diseño industrial de 6° semestre se valoraron los tres criterios en las 40 técnicas de la siguiente manera:

- Cantidad: número de modelos físicos realizados por hora. Esta información se tomó del instrumento de registro de la exploración empírica de las técnicas de la figura 6, de la cual se puede ver un ejemplo en el anexo 3.
- Variedad: número de categorías geométricas donde se ubican los modelos físicos. Para esto se utilizó la clasificación geométrica de Arbeláez & Patiño (2010) de la figura 29, donde se clasifican las formas según el tipo de línea que las generan, recta o curva, y se proponen categorías bidimensionales y tridimensionales basadas en descripciones geométricas. Entre más categorías geométricas estén presentes en los modelos físicos hay más variedad en el resultado creativo.
- Novedad: Es el nivel de diferenciación de los resultados de la técnica en relación con los resultados de todo el grupo de técnicas. En este caso se podría medir en relación con un dominio de conocimiento más amplio, como por ejemplo, todas las formas de los productos de diseño a nivel mundial, pero por razones de alcance se determinó la novedad en relación con el repertorio. Entre menos categorías similares tengan los modelos resultados de la técnica, mayor es su novedad en relación con las otras técnicas caracterizadas.

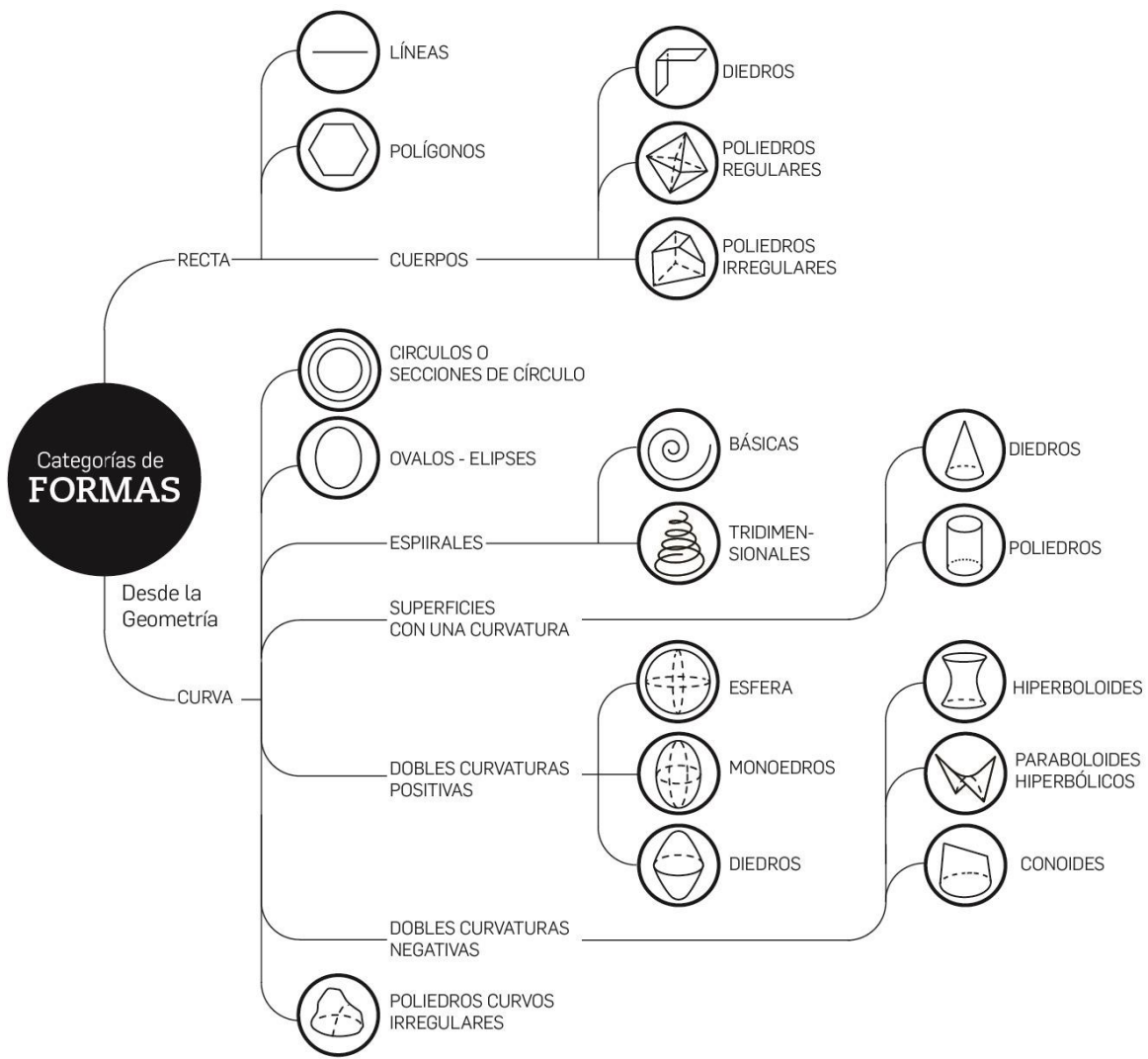


Fig. 29. Clasificación geométrica de formas basada en Arbeláez & Patiño (2010). Dibujo de Sara Restrepo Osorio y Ever Patiño.

En la figura 30 se puede ver el consolidado de la efectividad de la ideación contra todas las técnicas, el cual sirve para valorar la relación del costo con el beneficio de manera individual según el proyecto, no para concluir cuál técnica posibilita resultados más o menos creativos. Por ejemplo, las técnicas que tuvieron una mayor valoración positiva fueron: (6) “pilas de arena”, (24) “películas plásticas y gravedad” y (27) “jabón y sistemas de trayectoria mínima”. Esto quiere decir, que el diseñador en el proceso de generación de la forma puede generar en una hora más modelos, o bocetos físicos tridimensionales, que con las otras técnicas. Además estos modelos tienen una alta variedad entre sí, porque no comparten características geométricas y presentan alta novedad porque no tienen tantas

técnicas similares dentro del repertorio. En la figura 31 se observa un radar donde se gráfica como ejemplo la estimación de la efectividad de la ideación de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”. Se ve entonces, cómo la técnica tiene una valoración positiva, ya que se puede construir 5 o más modelos por hora; sus características geométricas se ubican en 4 categorías, como: dobles curvaturas positivas, paraboloides hiperbólicos, conoides y poliedros curvos irregulares; y finalmente, no tiene otra técnica que se le parezca.

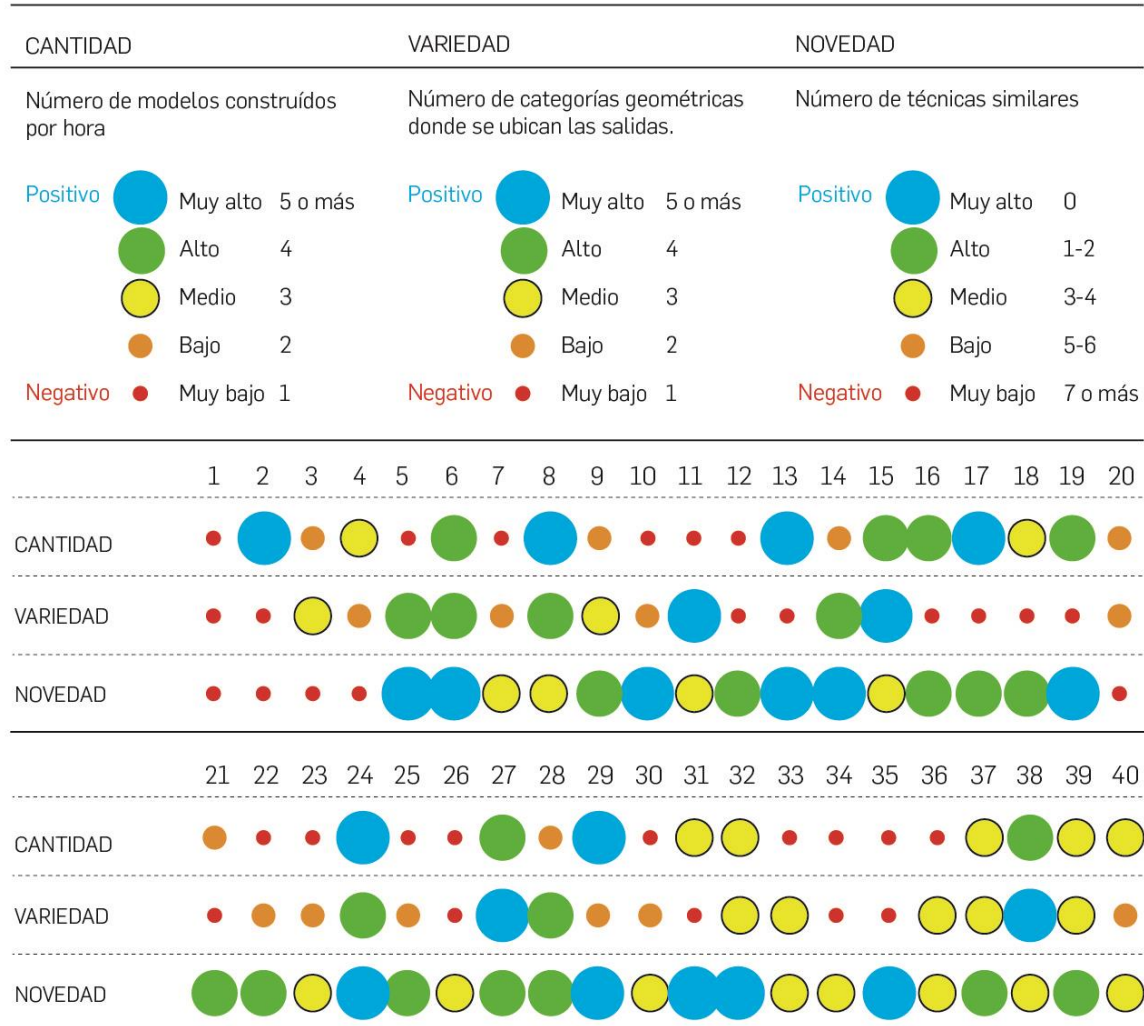


Fig. 30. Matriz de estimación de la efectividad cualitativa de la ideación vs técnicas. Basada en Shah y Vargas-Hernandez (2003).

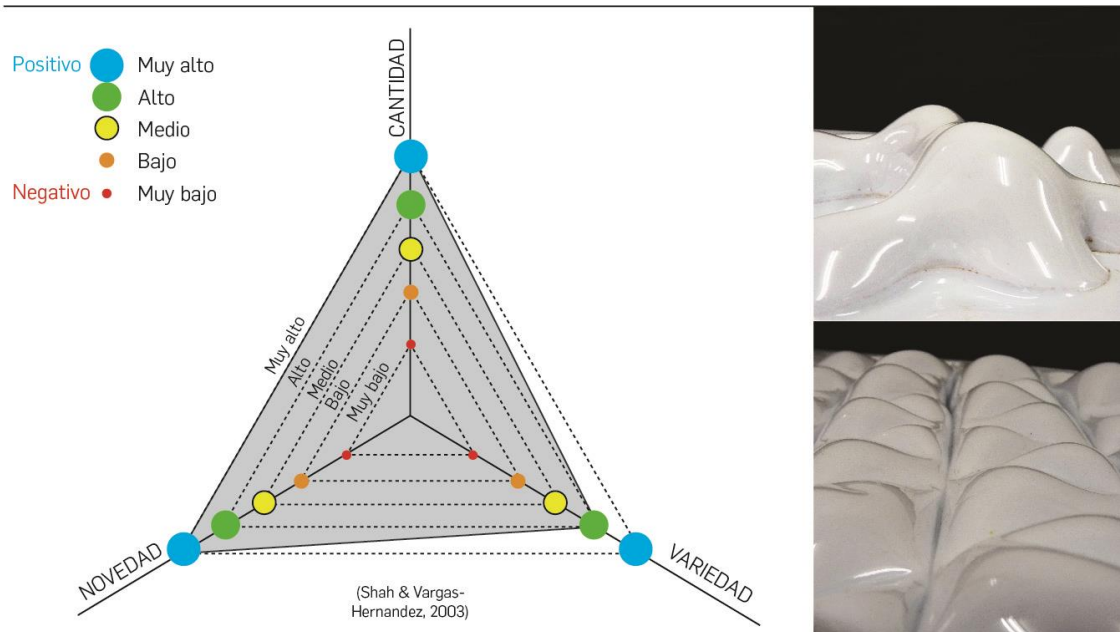


Fig. 31. Radar de la estimación de la efectividad de ideación en la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

4.4.4. Facilidad de aprendizaje de las técnicas

Si el proceso de aprendizaje no es fluido, éste se ve menguado por la insatisfacción causada (Green & Jordan, 2003; Wixon & Wilson, 1997). Así entonces, las técnicas deben facilitar el aprendizaje y permitir que el diseñador las aprenda y las domine para aumentar la creatividad en la fase de generación de la forma. La estimación de la dificultad o facilidad de aprendizaje, se realizó basándose en discusiones con el mismo grupo focal que construyó el repertorio, y utiliza los siguientes criterios que mencionan Abran y otros (2003) como determinantes en el proceso de enseñanza y aprendizaje:

- Conocimientos previos: tipo de conocimientos que se debe tener para utilizar la técnica. Siendo lo más negativo, para este caso un conocimiento especializado y lo más positivo no necesitar ningún tipo de conocimiento previo. Entre menos conocimientos previos se necesite, menor será la dificultad de aprendizaje.
- Razonamiento visual: nivel necesario de representación mental e inteligencia espacial para utilizar la técnica. Igualmente, entre mayor razonamiento visual, mayor será la dificultad de aprendizaje. Al ser compleja la valoración de este criterio, se les preguntó a los estudiantes

sobre la relación de lo que se imaginaban iba a ser el resultado de la técnica luego de realizar una acción, y lo que realmente resultaba. Si había una alta compatibilidad entre lo que se imaginaba y lo que resultaba de la técnica, el razonamiento visual necesario para la técnica era bajo.

- Complejidad en la manipulación: es la precisión y/o velocidad en la manipulación, y/o ejecución de acciones simultáneas. Entre mayor complejidad en la manipulación, será mayor la dificultad de aprendizaje.

En la figura 32 se puede ver la matriz del consolidado de la dificultad de aprendizaje vs las técnicas, con comentarios de los estudiantes en la parte inferior, registrados mientras se valoraba la complejidad en la manipulación. De manera general, la matriz evidencia que son técnicas fáciles de aprender, es decir, que no son necesarios muchos conocimientos previos técnicos y especializados, no se necesita un alto razonamiento visual para su operación, y la manipulación, en términos generales, es sencilla. Así, por ejemplo, se presentan diez técnicas con valoración positiva muy baja en los tres criterios: (2) “modelo de empaquetamiento de burbujas”, (6) “pilas de arena”, (18) “arrugas y papel”, (23) “sistemas de vías optimizadas”, (24) “películas plásticas y gravedad”, (26) “sustancias viscosas y tensión”, (27) “Jabón y sistemas de trayectoria mínima”, (28) “Jabón y superficies mínimas”, (36) “inversión de formas de yeso suspendidas” y (40) “cintas y listones de doblado activo”. Igualmente, estas diez técnicas presentan valoración positiva en el número de acciones, es decir, que hay una relación directa, entre el número de acciones, la auto-organización y la facilidad de aprendizaje.

Asimismo, a partir del código de color y tamaño se puede observar en la figura 32, que en general, desde una valoración cualitativa son técnicas fáciles de aprender con valoraciones positivas bajas y muy bajas. Sólo tres técnicas tienen dos o tres criterios con valoraciones negativas altas o muy altas: (9) “sistemas tensegrity prismáticos”, (10) “tejidos geodésicos” y (37) “plegados con patrón Yoshimura. Estas tres técnicas tienen en común la complejidad matemática de los procesos físicos asociados a sus geometrías.

En la figura 33 se puede ver un radar que resume como ejemplo la dificultad de aprendizaje de la técnica: (24) “películas plásticas y gravedad”.

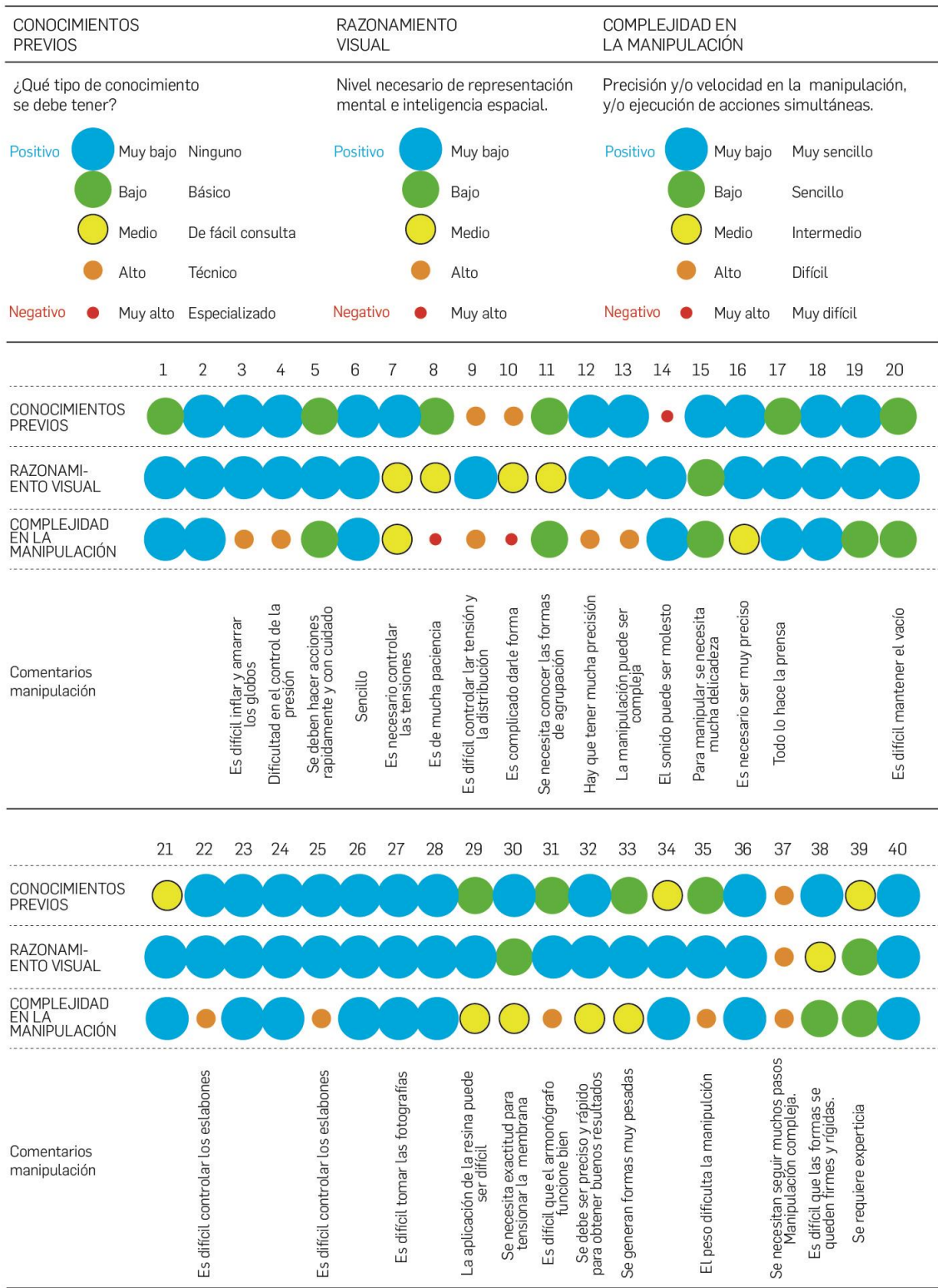


Fig. 32. Matriz dificultad de aprendizaje vs técnicas con comentarios realizados por los integrantes del grupo focal.

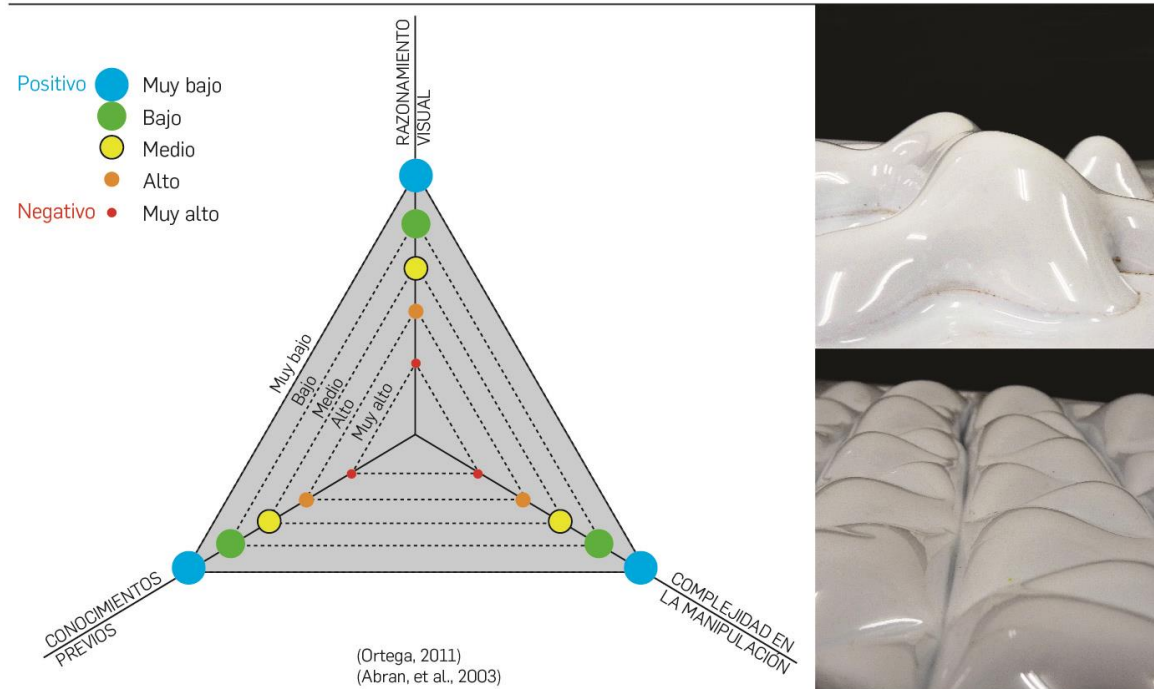


Fig. 33. Estimación de la dificultad de aprendizaje de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”.

4.5. Medición cuantitativa de la efectividad de ideación de una de las técnicas (Objetivo C. Proponer pautas)

Antes de proponer pautas metodológicas para la aplicación de técnicas de *form-finding* en el diseño de producto, a partir de la estimación de su potencial aplicación y la identificación de los elementos creativos promisorios, se utilizó el protocolo para medir la efectividad de la ideación que proponen Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003). Se evaluaron los resultados de una sesión de generación de ideas de un grupo control (GC) sometido a un estímulo visual convencional y un grupo experimental (GE) sometido a un estímulo visual que utilizó los modelos resultados de la técnica seleccionada.

Los dos grupos fueron citados en salones independientes, de aproximadamente 25m², con paredes blancas, amoblados con mesas de madera de 60cm x 200 cm para cada participante, sillas plásticas y tablero (ver figura 34). Los participantes ubicaron todas sus pertenencias en sillas alejadas para evitar interferencias de otros estímulos visuales y se realizó la sesión con los siguientes pasos:

- Presentación del experimento como una sesión de generación de ideas a partir de estímulos.
- Entrega del formato A (ver anexo 4), donde los asistentes firmaron el consentimiento de manejo de datos e indicaron cual es el estado de ánimo con el que más se identifican en ese momento, según la escala pictórica *Pick-A-Mood* (Desmet, Vastenburg & Romero, 2016). Podrían indicar más de un estado de ánimo (ver figura 35).
- Entrega de 20 formatos B de bocetación (ver anexo 5) a cada estudiante, lápiz, sacapuntas, lapicero, borrador y papel (ver figura 35). A los estudiantes del GC se les entregó de manera individual el *board* de sillas, y al GE el *board* con fotos de la técnica (ver figura 36).
- Se les indicó a los sujetos que se familiarizaran por 5 minutos con las imágenes suministradas.
- Presentación enunciado 1: Diseñar en 20 minutos tantas sillas tipo poltrona como les sea posible, que puedan ser fabricadas industrialmente. Se podían basar o no en las imágenes suministradas. Se debía hacer una propuesta de silla por formato, donde se expliquen con palabras clave las características más relevantes de las sillas (ver figura 37).
- Se recogieron los resultados y en el grupo control el *board* de sillas.
- Se entregó en el GC el *board* de las mesas, y se da 5 minutos para que el GC se familiarice con las imágenes, y para que el GE descanse.
- Presentación enunciado 2: Diseñar en 20 minutos tantas lámparas de piso para espacios interiores como les sea posible, que puedan ser fabricadas industrialmente. Se podían basar o no en las imágenes suministradas. Se debía hacer una propuesta de lámpara por formato, donde se expliquen con palabras clave las características más relevantes de las lámparas.

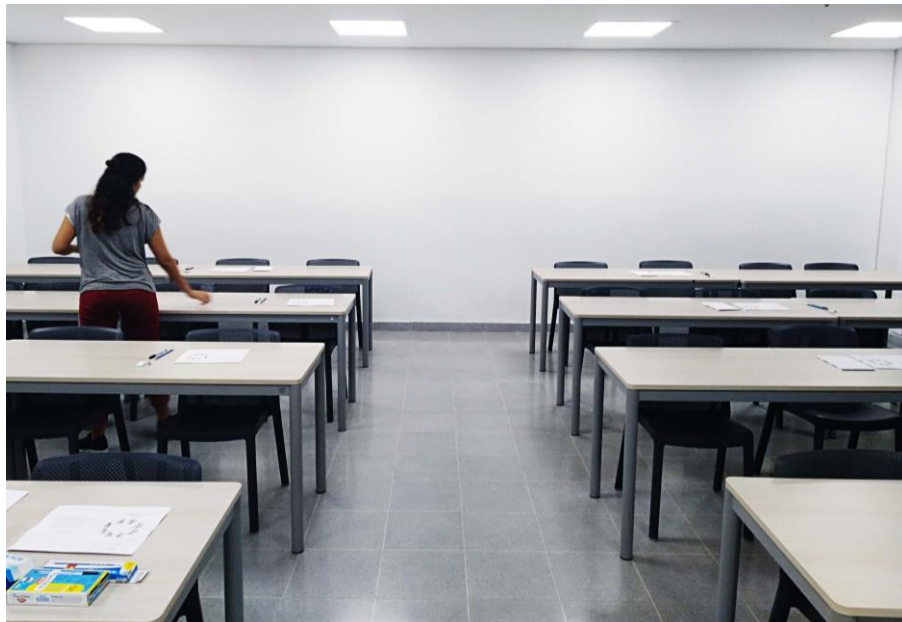


Fig. 34. Espacio para la sesión experimental. Fotografía: Ever Patiño.

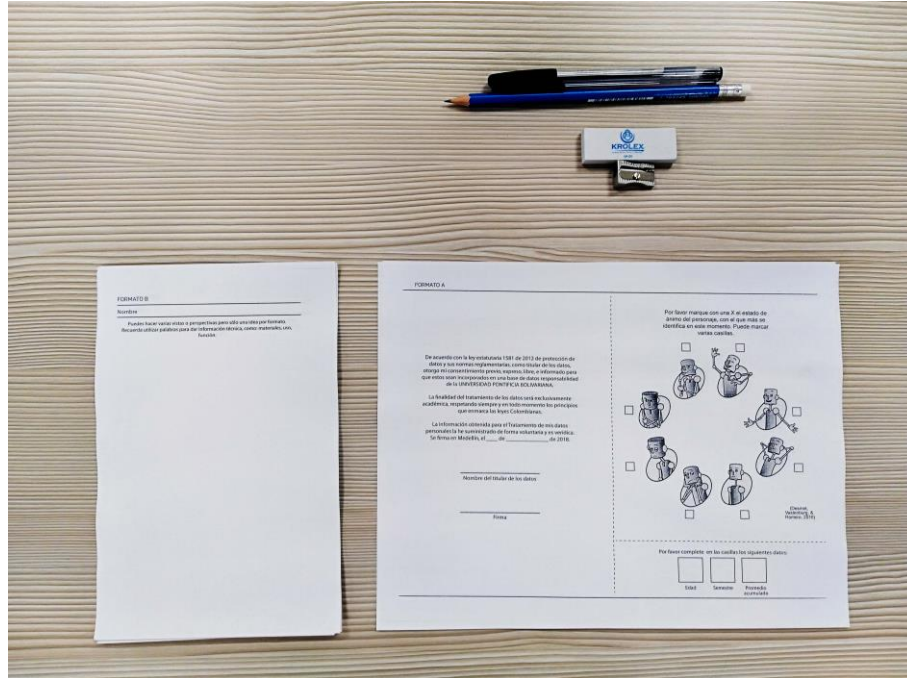


Fig. 35. Materiales y herramientas: Lápiz, borrador, sacapuntas, lapicero, Formato A y Formato B para los bocetos. Fotografía: Ever Patiño.



Fig. 36. (a) Board para el Grupo Experimental y (b) (c) Boards para el Grupo Control (RedDot Design Award, 2018; A' Award Design & Competition; 2018).

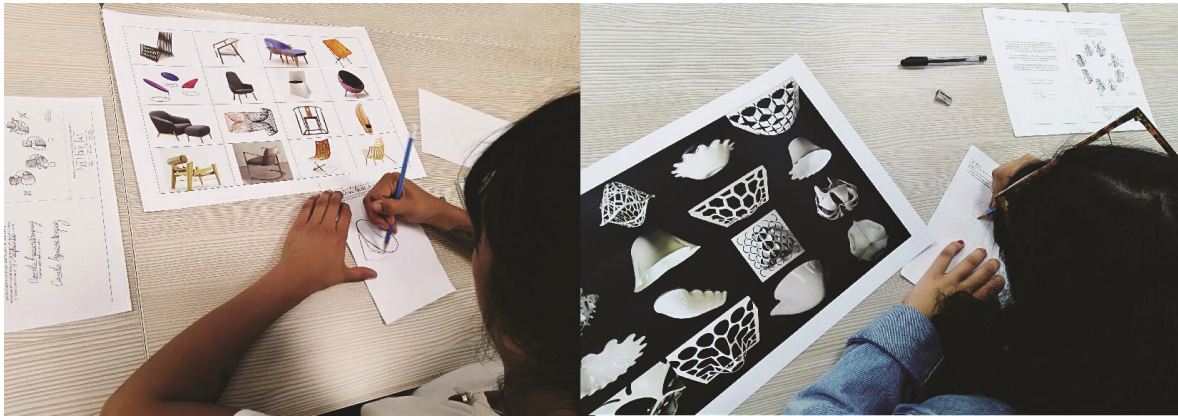


Fig. 37. Proceso de generación de ideas. Fotografías: Ever Patiño.

4.5.1. Proceso de evaluación

Se utilizaron los cuatro criterios que proponen Shah, Smith & Vargas-Hernandez (2003) para medir la efectividad de la ideación en la fase de generación de la forma: cantidad, novedad, variedad, y calidad. Para evitar la introducción de sesgos, los nombres de los sujetos fueron borrados y reemplazados por un código.

Como se dijo anteriormente, la **cantidad** es el número de ideas generadas por sujeto. Es importante, porque generar más ideas aumenta la posibilidad de generar mejores ideas (Cross & Cross, 1996; Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Para evaluarla se contaron el número de ideas por sujeto, y se promediaron por enunciado y por grupo en la figura 38.

La **novedad** se define como lo inusual de una idea en relación con otras (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Para evaluarla se dividió el problema de cada enunciado atributos f1, f2 y f3, y a estos se les definió un peso dentro en relación con lo usual o inusual de la respuesta. En las figuras 39 y 40 se pueden ver los atributos, sus pesos en relación con la importancia dentro del enunciado. Así por ejemplo, para la silla tipo poltrona se determinaron los atributos:

- Tipo de estructura para la carga a compresión (patas tipo columnas ortogonales u oblicuas, placas o superficies ortogonales, placas o superficies oblicuas, otra)
- Tipo de asiento (superficie plana, con una curvatura, dos curvaturas, otro)
- Tipo de espaldar (superficie plana, con una curvatura, dos curvaturas, otro)

Igualmente, para la lámpara de piso se determinaron los atributos:

- Tipo de pantalla o difusor (cilíndrica o cónica, prismática, esfera, otra)
- Tipo de unión pantalla-base (columnas rectas ortogonales, columnas rectas oblicuas, tubería curva sin cambios en la sección, otra)
- Tipo de base (circular o cuadrada plana, irregular plana, prismática, otra)

El cálculo de la novedad de cada idea se hace con base en la siguiente ecuación (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003):

$$M_1 = \sum_{j=1}^m f_j \sum_{k=1}^n p_k \quad (5)$$

Dónde M es la novedad de la idea, m son las funciones y atributos, n es el nivel, f_j es el peso de cada función, y p_k es el peso de cada nivel. Por ejemplo, para el boceto de la figura 41, la pantalla es una esfera, por tanto su calificación es 7; no tiene definida la unión pantalla-base, por tanto su calificación es 10; y su base tampoco está definida porque hace parte de todo el sistema, su calificación es 10. Entonces:

$$M_1 = 7*(0,4) + 10*(0,3) + 10*(0,3)$$

$$M_1 = 8,8$$

Esta calificación se suma con la novedad de los otros bocetos del sujeto y se divide por el número de bocetos del mismo sujeto.

		Silla tipo poltrona				Lámpara de piso			
		Cantidad	Novedad	Variedad	Calidad	Cantidad	Novedad	Variedad	Calidad
Grupo Control	Sujeto 1	3	3	8,8	9	6	5,5	7,2	9
	Sujeto 2	7	6,7	8,2	8,7	8	5,2	6,9	7,4
	Sujeto 3	3	3	2,8	10	4	6,5	5,6	8,5
	Sujeto 4	3	4	4,8	10	7	3,6	4,9	7,4
	Sujeto 5	5	5,7	5,6	7,6	6	8,8	6,3	6,2
	Sujeto 6	3	2,3	7,1	9	4	7,2	6,9	9,3
	Sujeto 7	5	8,3	8,1	7,6	6	8,6	6,1	6,2
	TOTAL	4,1	4,7	6,5	8,8	5,9	6,5	6,3	7,7
Grupo Experimental	Sujeto 8	8	7,2	2,7	3,3	6	7,8	7,1	5,7
	Sujeto 9	4	5,9	6	7,8	7	8,8	4,7	6,7
	Sujeto 10	2	8,2	3	6	3	9,3	6,1	10
	Sujeto 11	3	4,6	6	9	3	9,1	6	8
	Sujeto 12	2	8,2	3	1	4	9,8	5,9	5
	Sujeto 13	4	5,7	4,2	5,5	3	7	4,8	8
	Sujeto 14	5	7,8	5,1	6,4	5	9	4,7	5,4
	TOTAL	4	6,8	4,3	5,6	4,4	8,7	5,6	7,0

Fig. 38. Resultados del nivel creativo del grupo experimental (GE) y el grupo control (GC) en cada uno de los enunciados.

J	Peso	Atributos	$S_1=1$	$S_1=3$	$S_1=7$	$S_1=10$
f_1	0.4	Tipo de estructura para la carga de compresión	Patatas tipo columnas ortogonales u oblicuas	Placas o superficies ortogonales	Placas o superficies oblicuas	Otra
f_2	0.3	Tipo de asiento	Plano	Una curvatura	Dos curvaturas	Otro
f_3	0.3	Tipo de espaldar	Plano	Una curvatura	Dos curvaturas	Otro

Fig. 39. Atributos para la silla tipo poltrona con sus respectivos pesos en la puntuación global.

J	Peso	Atributos	$S_1=1$	$S_1=3$	$S_1=7$	$S_1=10$
f_1	0.4	Tipo de pantalla o difusor	Cilíndrica o cónica	Prismática	Esférica	Otra
f_2	0.3	Tipo de unión pantalla-base	Columna recta(s) ortogonal	Columna recta(s) oblicuas.	Tubería curva sin cambios en la sección	Otra o Ninguna
f_3	0.3	Tipo de base	Circular o cuadrada plana	Irregular plana	Prismática	Otra o Ninguna

Fig. 40. Atributos para la lámpara de piso con sus respectivos pesos en la puntuación global.

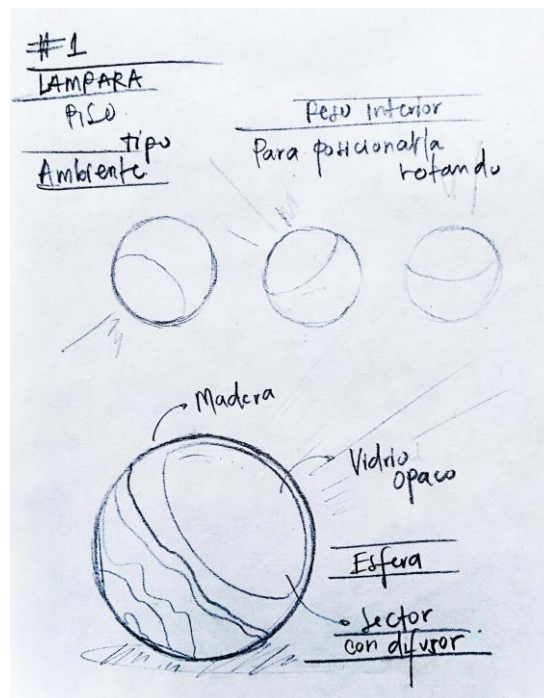


Fig. 41. Boceto de lámpara 1 del sujeto 1 del GC.

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, **la variedad** es la medida de la exploración durante el proceso de generación de ideas. Ideas similares indican baja variedad, y por lo tanto, menor probabilidad de encontrar mejores ideas (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Para medirla, se evaluó cómo cada idea satisface cada función, pero teniendo en cuenta que la medida se aplica a cada grupo de ideas de los estudiantes, no a una idea individual. Se realizó un árbol de funciones por cada función definida, para cada grupo de ideas de cada estudiante como el de la figura 42. Es decir, para evaluar la silla tipo poltrona, se debió hacer un árbol de tipo de estructura para la carga de compresión; otro para el tipo de asiento, y otro para el tipo de espaldar. El total de la variedad que se consignó en la figura 38 para cada enunciado y para cada grupo, es el promedio de las variedades de cada sujeto.

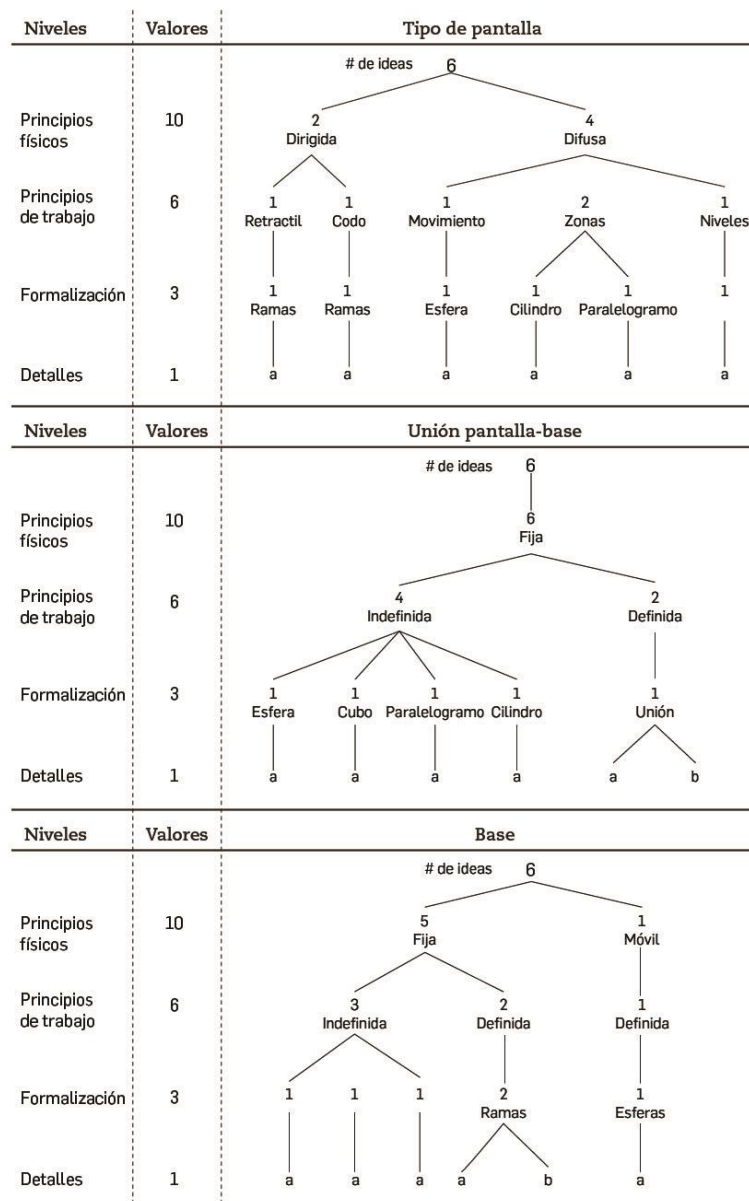


Fig. 42. Árboles de funciones de los bocetos del sujeto 1 GC para las lámparas de piso.

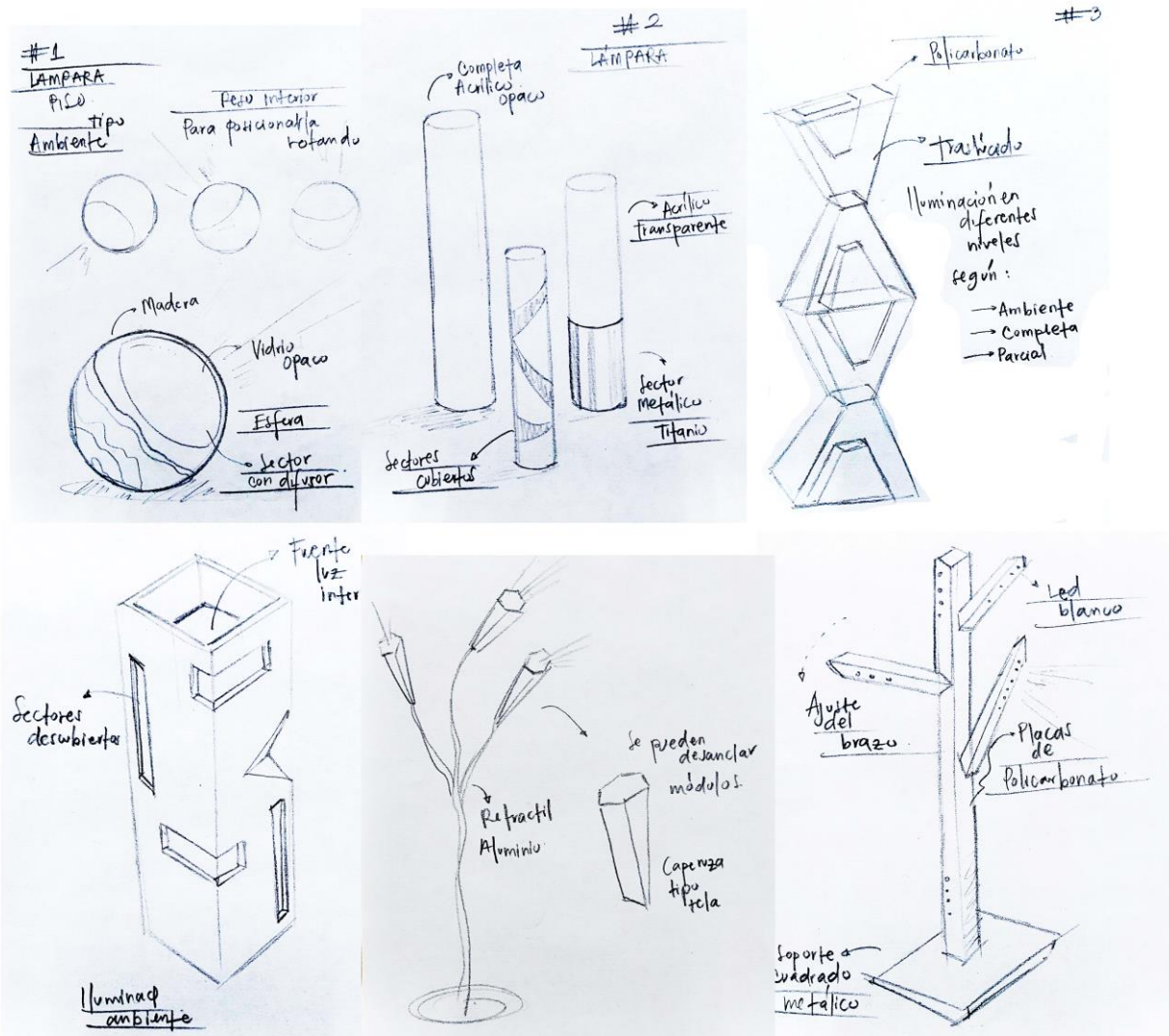


Fig. 43. Bocetos del sujeto 1 GC para las lámparas de piso.

El cálculo de la variedad de cada idea se hace con base en la siguiente ecuación (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003):

$$M_3 = \sum_{j=1}^m f_j \sum_{k=1}^4 S_k B_k / n \quad (6)$$

Dónde M es la variedad de un grupo de ideas, m número total de funciones, n es número total de ideas, f_j es la función o atributo, S_k es el número de ramas por nivel, B_k es el puntaje por nivel, y 4 es el número de niveles en el que se subdivide el árbol: principios de físicos, principios de trabajo, formalización y detalles. Por ejemplo, para el grupo de bocetos de la figura 43 (ver en el anexo 6 más

grupos de bocetos), en el árbol de la función de tipo de pantalla, en el primer nivel tiene 2 ramas, en el segundo nivel tiene 5 ramas, en el tercer tienen 2 ramas porque las ramas que no se dividen y se mantienen iguales no se cuentan, y en el 4 nivel no tiene ramas. Para la función de unión pantalla-base, en el primer nivel tiene no se divide, así que tiene 0, en el segundo nivel tiene 2 ramas, en el tercer nivel tienen 4 ramas porque la otra rama no presentó división, y en el cuarto nivel tiene 2 ramas, porque las otras no se cuentan porque no se dividen. Y por último, para la función de la base, en el primer nivel tiene 2 ramas porque las otras dos no se cuentan, y en el cuarto nivel tiene 2 ramas porque las otras cuatro no se cuentan. Entonces:

$$f_{j1} = [(2 * 10) + (5 * 6) + (2 * 3) + (0 * 1)] * 0,4$$

$$f_{j1} = 22,4$$

$$f_{j2} = [(0 * 10) + (2 * 6) + (4 * 3) + (2 * 1)] * 0,3$$

$$f_{j2} = 7,8$$

$$f_{j3} = [(2 * 10) + (2 * 6) + (3 * 3) + (2 * 1)] * 0,3$$

$$f_{j3} = 12,6$$

Por tanto, la variedad del sujeto 1 en las propuestas de las lámparas es:

$$M_3 = (22,4 + 7,8 + 12,6)/6$$

$$M_3 = 7,2$$

Por último, **la calidad** es la medida de factibilidad de una idea, es decir, el nivel de viabilidad de la idea relacionada con el rendimiento de la propuesta, como tiempo, peso y energía (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Para este caso, se definió únicamente: que las ideas tengan potencial de ser fabricadas industrialmente. Se establece la escala de 1 a 10, siendo 10 la propuesta con potencial de fabricarse más fácilmente, es decir con menos inversión en tecnologías de producción, materiales, tiempo y costos, y 1 la más compleja porque la información visual y textual, no es suficiente para establecer la posible inversión de recursos y tiempo. Se calificó cada propuesta con los criterios de la figura 44, seleccionando el criterio que daba cuenta del tipo de material o proceso que se utilizaría en mayor porcentaje dentro de la propuesta. Al final se sumaron los resultados de cada propuesta y se dividen por el número de ideas generadas por cada estudiante, para dar un valor de calidad en la figura 38.

Crterios	Valoración
Emplea en mayor porcentaje materiales en presentación estándar, como tubos, láminas, tableros. Y los transforma con maquinaria y herramientas estándar como dobladoras, sierras y termoformadoras.	10
Emplea materiales fundidos, forjados o inyectados. Y máquinas como dobladoras por vapor, troqueladoras inyectoras, sopladoras, rotomoldeadoras y forjadoras.	7
Emplea materiales con propiedades especiales (sensoriales, inteligentes, biodegradables). Y los transforma con maquinaria estándar o máquinas especiales.	5
Emplea tecnologías de fabricación digital como: maquinaria de control numérico, impresoras 3d o brazos robóticos.	3
No hace evidente el posible material o proceso de manufactura	1

Fig. 44. Criterio de calidad de las propuestas en relación con su factibilidad productiva.

4.5.2. Análisis de los resultados de la prueba

Los resultados del Grupo Control, tanto en las ideas de las sillas tipo poltrona como, en las ideas de las lámparas de piso, son más altos en la Cantidad, en la Variedad y en la Calidad (ver figura 45). Los resultados del Grupo Experimental sólo son superiores en la Novedad. Esto sugiere que los estímulos convencionales utilizados en el GC, es decir, los *boards* de lámparas y sillas ganadoras de concursos posibilitan una mayor fluidez en la ideación. Además, el *board* se convierte en una revisión del estado del arte, que permite al sujeto, encontrar diferentes arquetipos o arquitecturas de lámpara o silla, y utilizarlos para mejorar la variedad, y como dicen Goldschmidt y Sever (2010), ampliar el conjunto de soluciones. Asimismo, la emulación consciente o inconsciente, de los principios de fabricación de los objetos de los *board*, le permitieron al sujeto aumentar el potencial de fabricación industrial de las propuestas, es decir, su utilidad (Sternberg, O'Hara & Lubart, 1997), y en definitiva su calidad.

Al contrario, el *board* de estímulos existentes, influyó de manera negativa al GC, ya que como dicen Purcell y Gero (1996), posiblemente fijó imágenes en la memoria a corto plazo, facilitó la imitación y disminuyó la novedad. Por otro lado, en el GE, el *board* de los estímulos resultados de la experimentación con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, influenciaron de manera positiva, el resultado del proceso creativo (Gonçalves, Cardoso & Badke-Schaub, 2016), en la medida que se utilizaron estímulos con formas novedosas y los sujetos posiblemente las utilizaron por asociación, y las mezclaron con ideas que tenían consignadas en la memoria (Goldschmidt, 2014; Singh & Gu, 2012; Johnson, et al., 2009), alejando las ideas generadas de los arquetipos y arquitecturas tanto de sillas como de lámparas (ver figura 46).

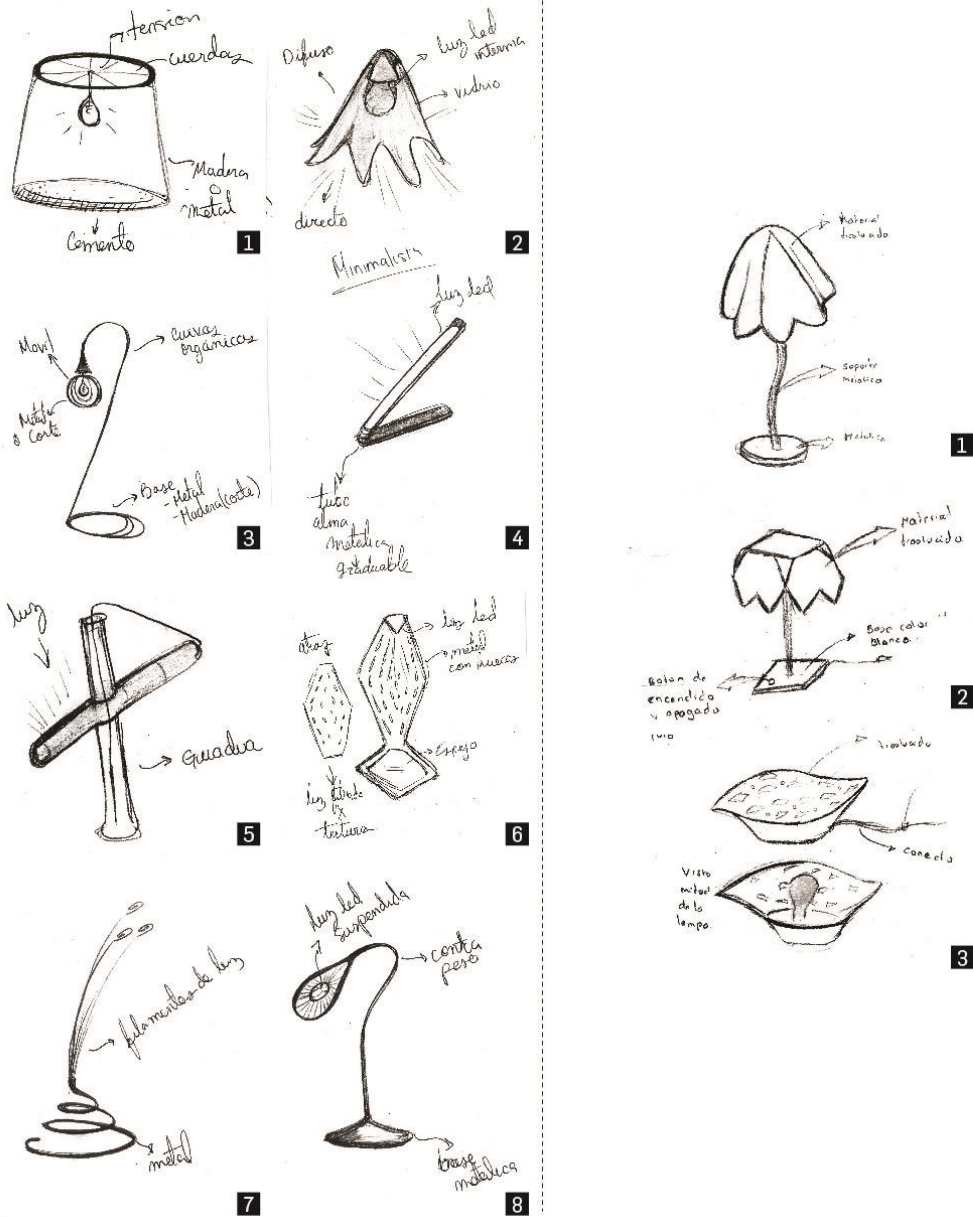


Fig. 45. Algunos bocetos de lámparas del GC y el GE para evidenciar la influencia positiva en la variedad y la cantidad de las propuestas del GC. Dibujos del sujeto 2 y 13.

Los resultados del GE, también sugieren, que la complejidad geométrica de los resultados de la técnica (24) limitó la fluidez en el proceso de dibujo, apuntando a la posibilidad de una relación estrecha entre la efectividad de ideación y el tipo de representación en el proceso de generación de la forma. En este caso, posiblemente el dibujo, debido a la alta complejidad geométrica de las formas, no haya sido el tipo de representación idónea para este tipo de técnica, siendo de pronto más adecuado

un tipo de representación donde un nivel técnico avanzado de dibujo no sea necesario, y sí lo sea la fotografía, el collage, o la fabricación de maquetas o modelos. Esta conclusión también podría ser generalizable a las técnicas de repertorio que posibiliten la generación de geometrías complejas y hagan necesario tener habilidades de dibujo y poseer un alto nivel de razonamiento visual medio y alto, como las técnicas consignadas en la figura 32.

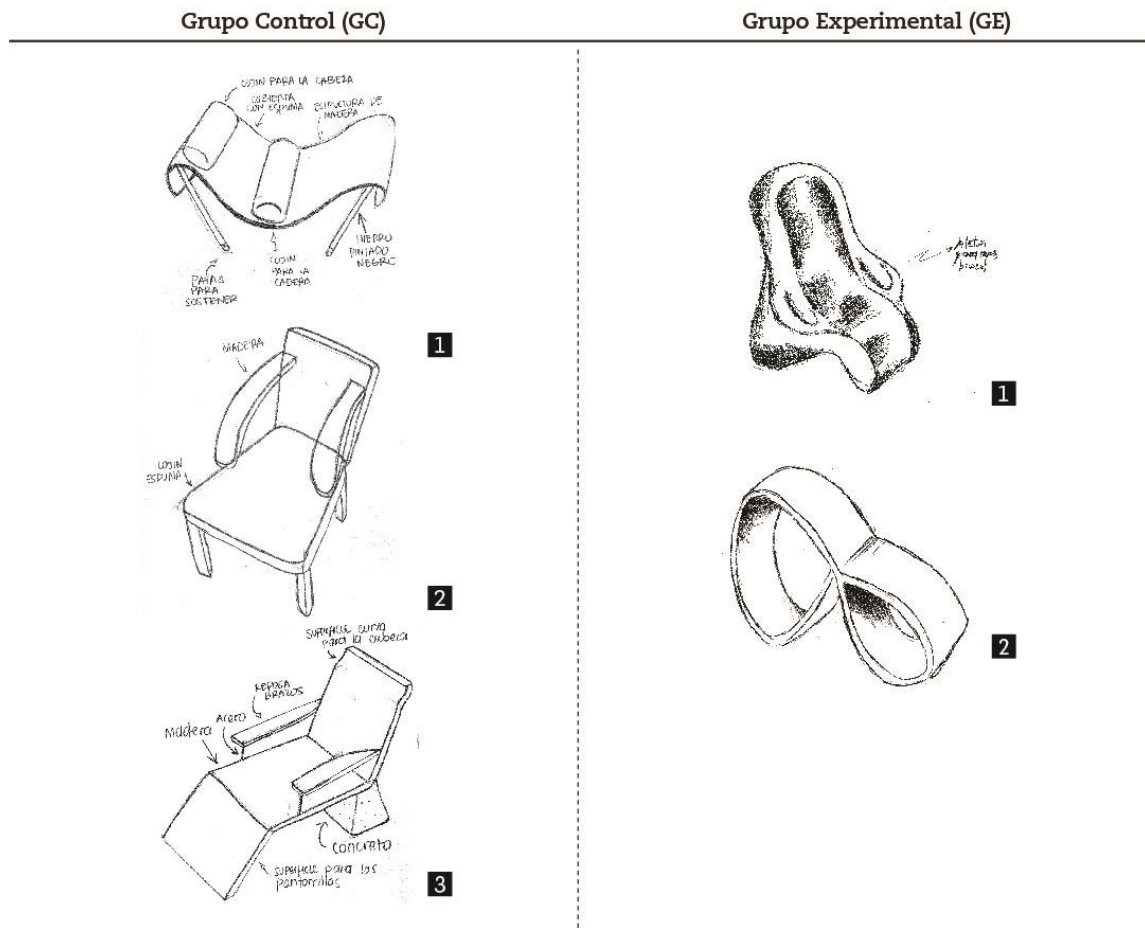


Fig. 46. Algunos bocetos de sillas del GC y el GE para evidenciar la influencia positiva en la novedad de las propuestas del GE. Sujeto 3 y 12.

4.6. Descripción de pautas metodológicas que permitirán la aplicación de las técnicas (Objetivo específico C. Proponer pautas)

A partir de la estimación de la potencial aplicación de las 40 técnicas de *form-finding* y la identificación de los elementos creativos promisorios encontrados en las secciones anteriores se describen a continuación las pautas metodológicas que debe tener en cuenta el diseñador experto o novato para navegar por el repertorio:

- Antes de comenzar a utilizar el repertorio, el diseñador debe preguntarse sobre la capacidad que tiene éste de aplicarse en el proyecto de diseño que está desarrollando, es decir, se preguntará sobre la **eficacia**. Sobre todo si puede ayudar en la resolución del problema de diseño. Para esto puede hacer uso de la figura 24 y seleccionar de la matriz gráfica de las categorías de productos de diseño vs todas las técnicas, aquella técnica que tenga mayor posibilidad de aplicación, pues aunque los resultados no son concluyentes pueden dar indicios de la aplicabilidad (ver § 4.4.1).
- Luego el diseñador indagará sobre las ventajas que presentaría el uso de las técnicas, es decir, sobre la **eficiencia**. Para ello, puede usar la matriz de las variables a maximizar y/o minimizar vs todas las técnicas de la figura 27 y la matriz de la inversión económica y la inversión en mano de obra vs todas las técnicas de la figura 28 para seleccionar la o las técnicas que le puedan aportar al proyecto y que esté en consonancia con el presupuesto (ver § 4.4.2).
- De manera paralela el diseñador podrá navegar por el repertorio, para seleccionar las técnicas que en el proceso de ideación puedan aumentar la novedad, la variedad y la cantidad de ideas. Pues cómo se ha visto, estas características están relacionadas directamente con el proceso creativo. Para ello, puede utilizar la matriz de la **efectividad de ideación cualitativa** vs todas las técnicas de la figura 30, para seleccionar la o las técnicas con una mejor valoración (ver § 4.4.3).
- Asimismo, al diseñador le será útil seleccionar una técnica que sea fácil de aprender y de dominar para que el proceso de diseño pueda ser ágil y continuo. Para ello puede utilizar la matriz de **dificultad de aprendizaje** vs todas las técnicas de la figura 32 (ver § 4.4.4).
- Por último, es importante que el diseñador tenga claridad en que las técnicas tienen diferentes características per se, que sólo logran su potencial cuando son exploradas a profundidad, y utilizadas de una manera que estimulen la creatividad (ver § 4.5).

4.7. Formulación de las hipótesis que se deducen de los conceptos y resultados promisorios (Objetivo específico D. Desarrollar hipótesis)

Para identificar conceptos promisorios se desarrollaron mapas conceptuales que vincularon los resultados de la construcción del repertorio y a la proposición de pautas metodológicas para aplicación de las técnicas. Posteriormente, se realizó un mapa unificado para relacionar resultados y conceptos e identificar hipótesis promisorias de ser estudiadas. Todo esto con el fin de representar visualmente la mayor cantidad de relaciones que se desprendieran de toda la investigación.

4.7.1. Esquema resultado de la construcción del repertorio

Posteriormente a la construcción del repertorio, y a la agrupación, caracterización y fabricación de modelos, se profundizó en la definición del *form-finding* a la luz de los resultados obtenidos. Es importante aclarar que la búsqueda de información para la construcción del repertorio, incluyó resultados para términos similares, como *Generative design*, pero se utilizaron aquellos donde el autor vinculara propiedades equivalentes a la definición de *form-finding*: estrategias basadas en reglas y principios físicos que propician procesos de transformación a partir de la interrelación entre la forma, la estructura y el material (Motro, 2009; Li, Borgart & Wu, 2017; Agkathidis, 2013). En la figura 47 se puede ver una síntesis gráfica de la profundización de la definición. En el centro se encuentra el objetivo primario que es la búsqueda de la forma, que en un primer momento, por su nombre, establece diferencias semánticas con la generación de la forma. Alrededor se encuentran tres elementos fundamentales que el diseñador debe poner a interactuar entre sí: (i) las propiedades técnicas del material, que incluyen las propiedades mecánicas, químicas, magnéticas y acústicas (Valencia, 2010); (ii) las propiedades geométricas, como tamaño, proporción, superficie, textura y simetría, que posee tanto el material, como la forma que se está buscando; y (iii) procedimientos basados en reglas, es decir, la interacción manual o automática de los dos elementos anteriores a partir de algoritmos de diferente complejidad.

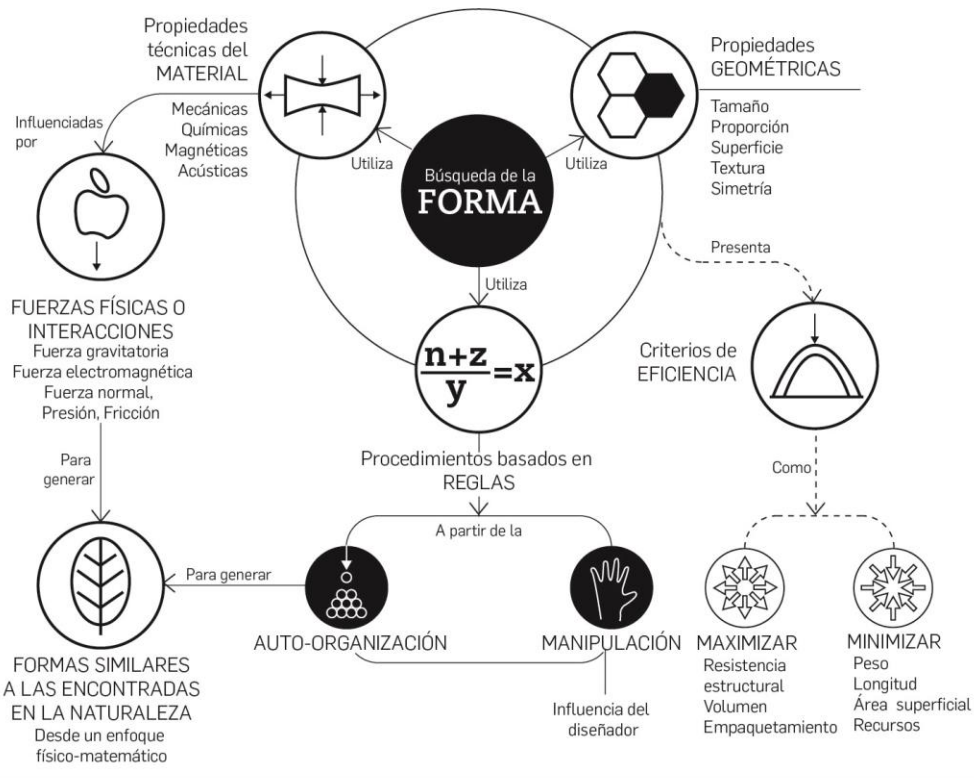


Fig. 47. Mapa conceptual de la profundización de la definición del término *Form-finding*. Autoría propia.

Ahora bien, todas las técnicas estudiadas presentan procedimientos basados en reglas, pero estas se utilizan vinculando las acciones del diseñador con procedimientos automáticos de auto-organización. Esta relación, entre lo manual y la auto-organización se presenta a diferentes niveles, tendiendo unas técnicas hacia lo manual y otras hacia la auto-organización. A pesar de esto, es por la influencia de la auto-organización, que las fuerzas o interacciones físicas, como la gravedad y el electromagnetismo pueden interactuar dentro de la tríada “propiedades técnicas del material”, “propiedades geométricas” y “procedimientos basados en reglas”. Esto ocasiona, desde un enfoque físico-matemático, formas similares a las encontradas en la naturaleza, puesto que las mismas fuerzas que han actuado sobre ella, actuará en diferente intensidad en la búsqueda de formas (Bejan, 2013; Thompson, 1942; Wagensberg, 2014; Otto, 2011). Por ejemplo, en el crecimiento de la célula animal y vegetal hay un hinchamiento de una membrana elástica por diferentes tipos de fluidos, y es por la interacción de la elasticidad del material, con la propiedad geométrica de la esfera, y el aumento controlado de la presión, que origina el crecimiento de un tejido y de un organismo donde predominan formas de doble curvaturas positivas o esferoides (Patiño, Arango, Jaramillo, 2015). Este mismo crecimiento se puede emular, con uno o varios globos elásticos, inflados con aire como el procedimiento utilizado en la técnica (4) “células ligeras” de la figura 10.

Por otro lado, en la interacción entre los tres elementos, se presenta de manera frecuente la búsqueda de respuestas a criterios de eficiencia propios de la ingeniería. Algunas técnicas tienen la propiedad de maximizar la resistencia estructural, el volumen, y la distribución, y otras de minimizar el peso, la longitud, el área superficial y los recursos.

4.7.2. Esquema resultado de la proposición de pautas metodológicas para la aplicación de las técnicas

Luego de finalizar la estimación del potencial de aplicación y la identificación de elementos creativos promisorios desde los enfoques cualitativo y cuantitativo se desarrolló un mapa que sintetizara de manera gráfica los resultados. En la figura 48 se puede ver la estimación de potencial rodeado por los cuatro criterios de análisis: (i) eficacia, (ii) eficiencia, (iii) efectividad de ideación, y (iv) facilidad de aprendizaje.

De la eficacia, que es la posibilidad de aplicación a diferentes categorías de diseño de producto, se visualizaron seis categorías con mayor presencia en bocetos: muebles para interior, mobiliario urbano, iluminación y complementos, accesorios de vestuario y complementos, accesorios para la construcción y accesorios para la cocina y mesa. Es decir, categorías donde los estudiantes asociaban

más rápidamente las formas que resultaban luego de la experimentación con las técnicas. La eficacia está relacionada directamente con la calidad en la medición de la efectividad de ideación, pues ésta es la viabilidad o el nivel de utilidad que puedan tener; y además se relaciona con la valoración de eficiencia, como la posibilidad de maximizar y/o minimizar recursos, puesto que se podría responder con estas características a algún objetivo de diseño definido con anterioridad.

Igualmente, la valoración de la eficiencia se demostró con el análisis cuantitativo de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, y se expuso que es necesario una comprobación empírica de los principios de maximización o minimización, ya que es posible que desde la bibliografía se justifique teóricamente algún principio, pero éste haya sido utilizado con la técnica para un objetivo particular y al momento de ampliar la exploración o cambiar el objetivo de diseño, el principio de eficiencia pierda validez.

Desde la eficiencia, en la relación del costo con el beneficio, la valoración cualitativa sugiere que en la mayoría de las técnicas hay que invertir máximo \$4.000 pesos colombianos para realizar un modelo, y que en la mayoría de técnicas, para realizar ese modelo son necesarias menos de 20 acciones; estas dos características podrían favorecer el aprendizaje y por consiguiente su aplicación en el proyecto de diseño.

Por otro lado, en la medición cuantitativa de la efectividad de ideación, tres técnicas obtuvieron mejor puntaje en la novedad, la cantidad y la variedad, presentando influencia de la alta auto-organización. De la misma manera, en la valoración cuantitativa del nivel creativo de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, se obtuvo una valoración alta a la novedad, sugiriendo el potencial de aplicar esta característica al proyecto de diseño. Igualmente, esta valoración sólo fue posible al ampliar la exploración y entender física y matemáticamente el funcionamiento de la técnica, para mejorar la curva de aprendizaje de la misma. La baja valoración de la técnica (24) “películas plásticas y gravedad” en la cantidad, la calidad y la variedad sugiere la utilización de otras técnicas de representación.

Por último, la valoración cualitativa de la facilidad de aprendizaje indica que en general son técnicas de fácil aprendizaje, con una buena relación costo beneficio. Diez técnicas obtuvieron una puntuación muy alta en los tres criterios, y cinco de ellas pertenecen al grupo de Tensionar, donde es evidente nuevamente la auto-organización por gravedad o por tensión superficial

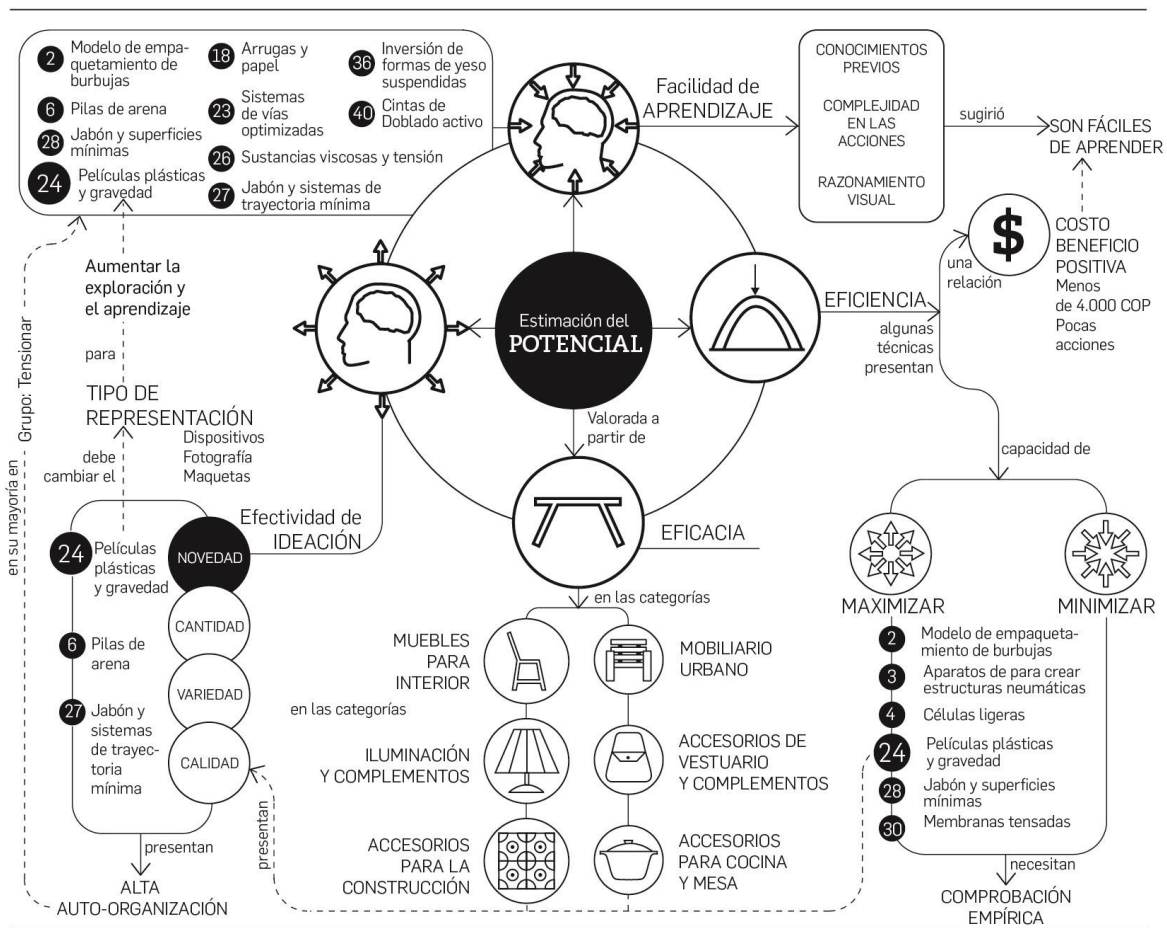


Fig. 48. Mapa conceptual estimación de potencial de aplicación al diseño de producto. Autoría propia.

4.7.3. Presentación de hipótesis

En la figura 49 se evidencia las relaciones promisorias, indicando con un color específico las hipótesis que se enuncian a continuación y que se puede tomar como base para futuras investigaciones descriptivas, experimentales y/o explicativas. Los conceptos, resultados y conclusiones son las pruebas que corroboran y dan indicios del rigor en el planteamiento de las hipótesis, y que pueden ayudar a futuro a rechazarlas o aceptarlas. El esquema reúne los dos esquemas anteriores, con el interés de representar gráficamente los resultados y explicitar sus relaciones.

- Hipótesis 1: la auto-organización en el *form-finding* está mediada siempre en mayor o menor medida por la manipulación que realiza el diseñador, e influye en la efectividad de ideación de las técnicas. Esta hipótesis es importante porque la auto-organización es una ayuda adicional que el diseñador tienen en el proceso de ideación; si éste realiza muchas acciones

y manipula en alta medida la técnica, puede afectarse la variedad, la cantidad y la novedad de los resultados.

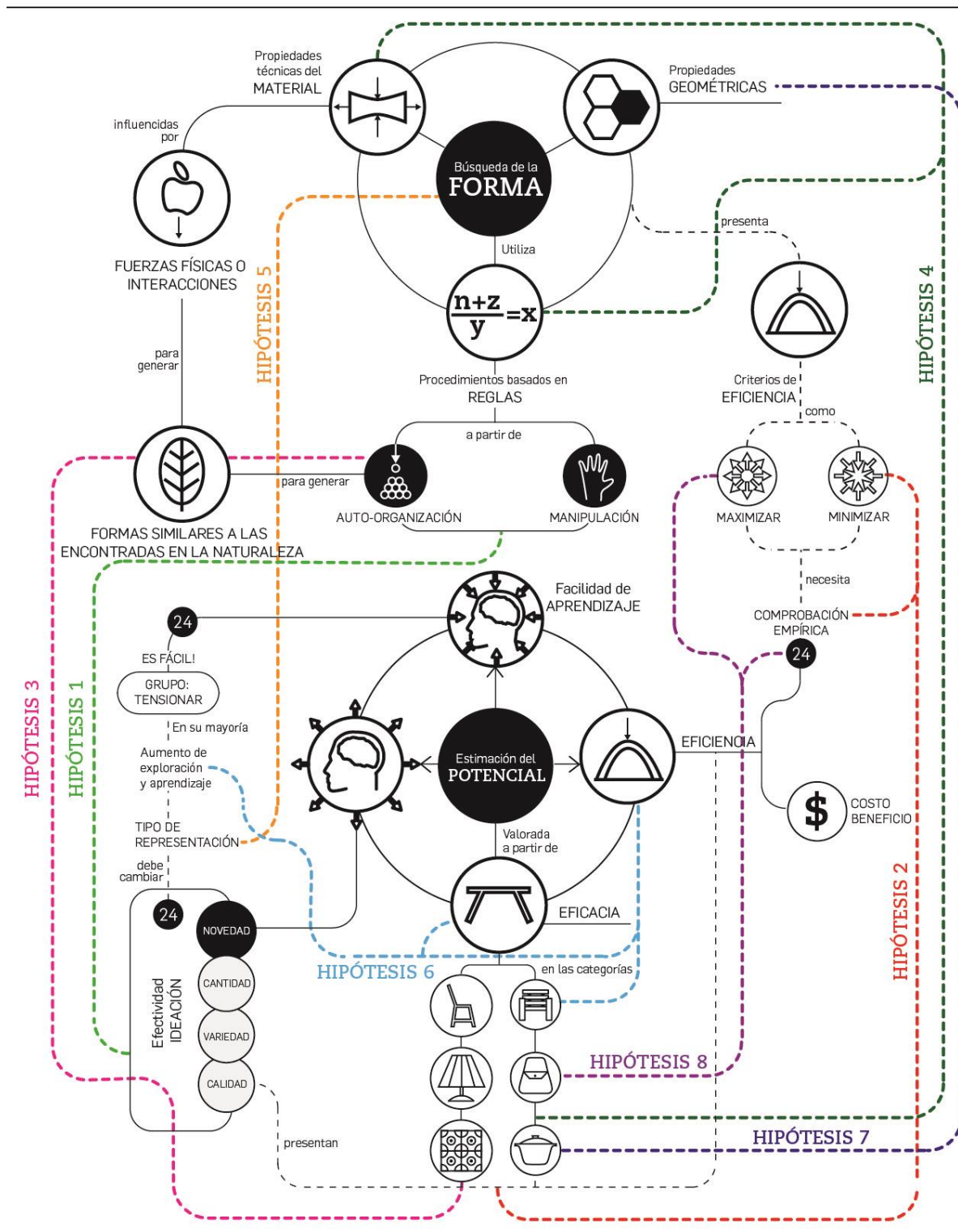


Fig. 49. Mapa conceptual de relaciones promisorias e hipótesis. Autoría propia.

- Hipótesis 2: los criterios de eficiencia –maximizar y minimizar- establecen otra clasificación de las técnicas del repertorio, que necesitan una comprobación empírica de acuerdo a los objetivos del proyecto de diseño. Entre mayor sea la posibilidad de maximizar y/o minimizar mayor será el potencial de aplicación en la generación de la forma del diseño de productos. Por ejemplo, al desarrollar muebles para interior como una silla, el diseñador puede seleccionar técnicas que disminuyan el área superficial para buscar soluciones para el asiento y el espaldar; y a su vez puede seleccionar técnicas que maximicen la capacidad estructural para buscar soluciones para las patas.
- Hipótesis 3: entre mayor es la auto-organización, mayor es la posibilidad de generar formas similares a los patrones geométricos encontrados en la naturaleza, y mayor es la probabilidad de que se conviertan en un soporte o ayuda adicional para la aplicación en el diseño de producto.
- Hipótesis 4: los requerimientos u objetivos de diseño deben traducirse de manera puntual en procedimientos basados en reglas, en propiedades técnicas del material y en propiedades geométricas para así establecer un procedimiento de experimentación contextualizado, y aclarar en el proceso de generación de la forma que requerimiento entra primero y en qué medida se afectan entre ellos. Por ejemplo, al desarrollar una mesa para un usuario específico, el diseñador podría establecer que una variable como la fuerza tensión, en la técnica (30) “membranas tensadas”, está relacionada directamente con la antropometría del sujeto; en ese caso, sería una variable que se debería controlar inicialmente frente a otras que no aporte en términos de usabilidad.
- Hipótesis 5: para utilizar el *form-finding* como herramienta creativa es necesario utilizar tipos de representaciones diferentes al boceto a mano, como fotografía y collage o maquetas rápidas que permitan representar rápidamente geometrías complejas.
- Hipótesis 6: entre más aumente la exploración estructurada o semi-estructurada de las técnicas mayor será la posibilidad de encontrar aplicaciones creativas, eficaces y eficientes para el diseño de productos.
- Hipótesis 7: profundizar en las propiedades geométricas de las técnicas, como proporción, simetría, y dimensiones aumenta la posibilidad de encontrar formas que mejor se adapten a un proyecto particular de diseño.
- Hipótesis 8: se puede profundizar en la técnica (24) “películas plásticas y gravedad” para determinar su capacidad estructural, controlarla analógica y computacionalmente y utilizarla en los proyectos de diseño de producto.

5. Conclusiones

Ante los problemas definidos en la investigación, sobre el desconocimiento de los elementos que definen la relación entre el diseño de producto y el *form-finding*, y la manera como se establece dicha relación, se concluye que hay dos grandes elementos: (i) soportar la generación de la forma y (ii) soportar el proceso creativo, es decir, en ayudar a que la forma generada responda a los requerimientos. Por otro lado, la ayuda que presta la investigación a estos dos grandes elementos es a partir de (i) la construcción del repertorio ordenado sistemáticamente y (ii) de la aplicar una técnica utilizando los hallazgos de los estudios de estimación.

Asimismo, los resultados y la metodología de esta investigación se pueden utilizar de diferentes maneras. En primer lugar, el repertorio puede ser usado por diseñadores expertos e inexpertos: (i) como herramienta creativa para generar estímulos que propicien la búsqueda de formas novedosas, (ii) como herramienta analógica para comparar y seleccionar la técnica más idónea para su proyecto, (iii) para comprender los procesos analógicos, facilitando el uso o la programación de una herramienta digital. Por otro lado, por su característica exploratoria, el repertorio puede ser utilizado por investigadores de las áreas del diseño industrial y la ingeniería de diseño de productos para (i) definir con mayor precisión el potencial del *form-finding* en el diseño, y (ii) facilitar la creación de instrumentos necesarios para estudios empíricos concluyentes. Igualmente, los docentes de estas mismas áreas podrán utilizarlo dentro del aula de clase para (i) desarrollar la habilidad para razonar visualmente y (ii) potenciar la habilidad de indagar de manera ordenada en busca de respuestas a preguntas previamente definidas.

En segundo lugar, los resultados y las metodologías cualitativas y cuantitativas que se utilizaron para estimar el potencial de aplicación en el diseño industrial, pueden servir: (i) como base para investigaciones cognitivas sobre el uso de estímulos, (ii) como referente para investigaciones de la aplicación del *form-finding* en el diseño industrial, (iii) para establecer posibilidades manuales de experimentación, paralelas al diseño generativo digital; y por último, las hipótesis planteadas pueden servir (iv) para iniciar proyectos investigación, formulando preguntas y objetivos que se desprendan de éstas.

En definitiva, el repertorio, la metodología y los resultados, sirven para ayudar a determinar con algunas pruebas cualitativas y cuantitativas, desde un enfoque exploratorio, cuáles pueden ser los límites conceptuales y procedimentales de la relación *form-finding* y diseño industrial, pues como se evidenció, este límite se encontraba todavía sin suficiente exploración.

5.1. Limitaciones

Dentro de las limitaciones que tiene el proyecto se encuentra la ausencia de una valoración empírica de todas las técnicas, en relación con sus propiedades matemáticas y físicas, y su potencial de aplicación en el diseño. Esto se justifica por el alcance del proyecto, pero deja vacíos que deben ser llenados para fijar límites en el *form-finding*, y posibilitar su aplicación en el diseño de producto. Igualmente, aunque se establecieron mecanismos de valoración, la relación de los requerimientos y los objetivos del proyecto de diseño, con las características de las técnicas sigue siendo un asunto difuso que genera problemas al momento de seleccionar el *form-finding* como una herramienta útil para el diseño de producto. Por ejemplo, si se debe diseñar una silla para un entorno doméstico, se tiene información de las técnicas que podrían maximizar la capacidad estructural y minimizar el peso, pero éstas han sido utilizadas sobre todo en arquitectura, y se debe hacer una comprobación empírica de estas propiedades. Igualmente, no se sabría con claridad cómo traducir los requerimientos que hacen de una silla, un objeto doméstico, en variables de exploración dentro de la técnica.

En ese mismo orden de ideas, al usar las técnicas, al diseñador se le dificulta definir cuándo parar la exploración. Puede parar cuando ya cumpla un tiempo excesivo de exploración o cuando encuentre formas atractivas, pero en general, la falta de claridad de la relación de los requerimientos con las características de la técnica, ocasiona que la relación de las formas exploradas con las formas requeridas sea también difusa.

5.2 Trabajo futuro

El repertorio es un referente para que cualquier disciplina o profesión creativa, como la arquitectura, las artes visuales, el diseño industrial y el diseño de productos, lo sigan ampliando y lo utilicen de diferentes maneras. El repertorio podría crecer con experimentación con alimentos, con técnicas manuales u oficios artesanales, con técnicas utilizadas por los diseñadores que no están documentadas, con fenómenos físicos visibles a escalas microscópicas, con nanotecnología, con otros principios físicos de alta complejidad, con el uso de nuevos materiales a partir de materias primas naturales, como hongos, celulosa, y/o polímeros naturales, y con variación de las técnicas ya existentes o combinaciones entre ellas.

Por ejemplo, el grupo de técnicas del repertorio “Solidificar” puede utilizarse en conjunto con las otras técnicas con el objetivo de rigidizar los resultados o establecer procesos de manufactura de objetos terminados. Es decir, no solamente encontrar la forma que pueda ser replicada por procesos

otros procesos de manufactura, sino utilizar las técnicas de solidificar como proceso de fabricación de productos de diseño.

Igualmente, aunque el proyecto se centra en el *form-finding* analógico, se hizo evidente en la construcción del repertorio, que la tendencia en el estudio e investigación de esta herramienta, sobre todo en arquitectura y el diseño estructural, se encuentra en la combinación de lo analógico, como procedimientos para entender y comprobar la técnica, y los procesos computacionales de generación formal y de fabricación digital. También hay un creciente interés, en estudiar procesos de deconstrucción biológica y física, como la degradación y la fragmentación, para encontrar técnicas que puedan utilizarse en el diseño de estructuras. Asimismo, el diseño de producto puede servir como puente para establecer otros usos creativos del *form-finding*.

De otra parte, los resultados obtenidos con la técnica (24) “películas plásticas y gravedad”, establecen por sí mismos, un campo fructífero de estudio, para explorar, por un lado, otras posibilidades de la deformación plástica por temperatura, como el uso de tensiones controladas en otras direcciones, el uso de agua para deformar, el uso de otros polímeros o la combinación de varios. Por otro lado, para encontrar posibilidades de aplicación en el diseño de producto, específicamente, utilizar la novedad de las formas que resultan de la técnica, como objetivo de diseño. La exploración con la técnica (24) también sugiere que la relación entre tipos de representación, estímulos y efectividad de ideación, establece problemas que siguen sin resolverse y que pueden facilitar el tránsito del diseñador por la fase de generación de la forma.

Finalmente, del proyecto se desprenden preguntas de diferente nivel, además de las que son intrínsecas a las hipótesis planteadas, que son por sí solas resultados de una investigación exploratoria y que encierran el fundamento creativo del proyecto, como: ¿Las técnicas son solamente procesos de búsqueda de formas o hay posibilidad de desarrollar las técnicas como procesos de manufactura? ¿El desarrollo de dispositivos como el soporte metálico diseñado para la técnica (24) ayuda en la exploración, y en la parametrización del experimento? O ¿restringe la exploración creativa? ¿Se puede medir el nivel de imitación de las formas de la naturaleza? ¿Cómo sería un método que vincule los requerimientos del proyecto con las características del *form-finding*? Y en definitiva, ¿Se puede establecer una ruta por el repertorio, que le permita al diseñador navegar por él, sin influenciar negativamente los resultados creativos? O ¿Cómo sería un método para usar el repertorio?

Referencias bibliográficas

- [1] Abran, A., Khelifi, A., Suryan, W., & Seffah, A. (2003). Usability meanings and interpretations in ISO standards. *Software quality journal*, 11(4), 325-338.
- [2] Ackerman, P. L. (1996). A theory of adult intellectual development: Process, personality, interests, and knowledge. *Intelligence*, 22(2), 227-257.
- [3] A' Design Award and Competition (2018) A' Design Award and Competition:
<http://www.competition.adesignaward.com/>
- [4] Agkathidis, A. (2013). *Diseño generativo: Procesos para concebir nuevas formas arquitectónicas*. Barcelona, España: Promopress.
- [5] Ahlquist, S., & Menges, A. (2012). Physical Drivers: Synthesis of Evolutionary Developments and Force-Driven Design. *Architectural Design*, 82(2), 60-67.
- [6] Ahlquist, S. (2014). Post-forming Composite Morphologies: Materialization and design methods for inducing form through textile material behavior. ACADIA 2014.
- [7] Ahlquist, S., & Planning, U. (2014) Knit Architecture. ACADIA 2016
- [8] Akner-Koler, C. (2012). Expanding the boundaries of form theory and practice: developing the model evolution of form. In: Nicolai Steino and Mine Özkaz (Ed.), *Shaping desing teaching*. (pp. 129 - 145). Denmark: Aalborg University Press.
- [9] Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmead, D., Tessier, A., Glueck, M., & Khan, A. (2009, January). Physics-based generative design. In *CAAD futures conference* (pp. 231-244).
- [10] Arbeláez, E., & Patiño, E. (2010). Generación y transformación de la forma. *Medellín: UPB*.
- [11] Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. International Thomson.
- [12] Abidín, S. B. Z. (2012). Practice-based design thinking for form development and detailing. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Norwegian University of Science and Technology.
- [13] Baker, S. (2004). Concrete Design Book on ROBUSTNESS. Concrete design competition.
- [14] Barco Ríos, H., Rojas Calderón, E., & Restrepo Parra, E. (2012). *Física: principios de electricidad y magnetismo*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.
- [15] Baxter, M. (1995). *Product Design: Practical methods for the systematic development of new products*. CRC Press.
- [16] Beatini, V., & Royer-Carfagni, G. (2016). Soap film analogy for anisotropically stretched membranes and cable nets. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1-14.
- [17] Bejan, A., & Lorente, S. (2013). Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *Journal of Applied Physics*, 113(15), 6.
- [18] Belcastro, S., Veenstra, T. (2009). Constructing Regular n-gonal Twist Boxes. In: Lang, R. (Ed.) *Origami 4*. CRC Press.
- [19] Bletzinger, K. U. (1998). *Form finding and optimization of membranes and minimal surfaces*. Institut für Baustatik.

- [20] Bletzinger, K. U., & Ramm, E. (2001). Structural optimization and form finding of light weight structures. *Computers & Structures*, 79(22), 2053-2062.
- [21] Bradley, R. A., & Gohnert, M. (2016). Three lessons from the Mapungubwe shells. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 58(3), 2-12.
- [22] Burry, J. & Maher, A. (2008). The Other Mathematical Bridge. *Nexus Network Journal of Architecture and Mathematics*. Vol. 10. N°1.179-194.
- [23] Cagan, J., & Vogel, C. M. (2002). *Creating breakthrough products: Innovation from product planning to program approval*. Ft Press.
- [24] Cagan, J., & Vogel, C. M. (2005). Integrated new product development. In *Design process improvement* (pp. 386-403). Springer, London.
- [25] Carrie, F. R., & Wouters, P. (2012). Building airtightness: A critical review of testing, reporting and quality schemes in 10 countries. *TightVent Europe. CIBSE (2000). Testing buildings for air leakage, CIBSE Technical Memorandum*, 23.
- [26] Catalano, C. E., Falcidieno, B., Giannini, F., & Monti, M. (2002). A survey of computer-aided modeling tools for aesthetic design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2(1), 11-20.
- [27] Celani, G. (2008). Enseñando diseño generativo: una experiencia didáctica. *XII Congreso Sigradi, Cuba*. Diciembre, 1-4.
- [28] Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. I. (2002). *Mecánica de estructuras*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- [29] Chase, S. C. (2005). Generative design tools for novice designers: Issues for selection. *Automation in Construction*, 14(6), 689-698.
- [30] Chai, K. H., Zhang, J., & Tan, K. C. (2005). A TRIZ-based method for new service design. *Journal of Service Research*, 8(1), 48-66.
- [31] Chen, J. L., & Liu, C. C. (2001). An eco-innovative design approach incorporating the TRIZ method without contradiction analysis. *The Journal of Sustainable Product Design*, 1(4), 263-272.
- [32] Ching, F. D., & Juroszek, S. P. (2010). *Design drawing*. John Wiley & Sons.
- [33] CONCRETECANVAS (2015). *Concrete Canvas: Design Furniture*, UK. www.concretcanvas.com
- [34] Connelly, R., & Terrell, M. (1995). Globally rigid symmetric tensegrities. *Structural Topology 1995 núm 21*.
- [35] Cross, N., & Roozenburg, N. (1992). Modelling the design process in engineering and in architecture. *Journal of Engineering Design*, 3(4), 325-337.
- [36] Cross, N., & Cross, A. C. (1996). Winning by design: the methods of Gordon Murray, racing car designer. *Design studies*, 17(1), 91-107.
- [37] Dacorogna, B., Marcellini, P., & Paolini, E. (2010). Origami and partial differential equations. *Notices of AMS*, 57(5), 598-606.
- [38] De Angeli, A., Lynch, P., & Johnson, G. I. (2002). CHAPTER SEVEN Pleasure versus Efficiency in User Interfaces: Towards an Involvement Framework. *Pleasure with products: Beyond usability*, 94.
- [39] De Barrera Jacqueline, Hurtado. "El proyecto de investigación." *Metodología de la Investigación Holística*.

- [40] De Gennes, P. G., Brochard-Wyart, F., & Quere, D. (2004). Capillarity and Wetting Phenomena: Drops. *Bubbles, Pearls, Waves*, 291.
- [41] De Micoli, S., Rinderspacher, K., Menges, A. (2018). Stone Morphologies: Erosion-Based Digital Fabrication Through Event-Driven Control. In *Humanizing Digital Reality*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2da Edición. Ediciones Quirón-Sypal. Caracas. Venezuela (2008).
- [42] De Rycke, K., Bergis, L., Jankowska-Kus, E. (2018). Free-Form Wooden Structures: Parametric Optimization of Double-Curved Lattice Structures. In *Humanizing Digital Reality*, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- [43] Deleuran, A. H., Tamke, M., & Thomsen, M. R. (2011, April). Designing with deformation: sketching material and aggregate behaviour of actively deforming structures. In *Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design* (pp. 52-59). Society for Computer Simulation International.
- [44] Desmet, P. M. A., Vastenburg, M. H., & Romero, N. (2016). *Pick-A-Mood manual: Pictorial self-report scale for measuring mood states*. Delft (NL): Delft University of Technology
- [45] Devlin, K. (2000). *The language of mathematics: making the invisible visible*. Macmillan.
- [46] Dickson, M. (2003). Frei Otto Researcher, Inventor and Inspired Instigator of Architectural Solutions. *AA FILES*, (50), 36-49.
- [47] Dincer, A. E., Tong, H., & Cagdas, G. (2012). An interaction form generation tool: EduDesign. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 51, 74-78.
- [48] Dino, I. (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *METU Journal of Faculty of Architecture*, 29(1), 207-224.
- [49] Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Eklund, P. C. (1996). *Science of fullerenes and carbon nanotubes: their properties and applications*. Elsevier.
- [50] Eastman, C. (2001). *New directions in design cognition: studies of representation and recall*. Elsevier.
- [51] Egenhofer, M. J. (2015). Qualitative spatial-relation reasoning for design. In *Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity* (pp. 153-175). Springer, Dordrecht.
- [52] Eggert, H. (1977). Acerca de la estática y el dimensionamiento de las estructuras soportadas por aire. In: Thomas Herzog (Ed.), *Construcciones neumáticas: Manual de arquitectura hinchable*. (pp. 164 – 182). Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A.
- [53] Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1987). *Física*. Addison-Wesley Longman.
- [54] Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative cognition: Theory, research, and applications*.
- [55] Finke, R. A. (1993). Mental imagery and creative discovery. *Advances in psychology*, 98, 255-285.
- [56] Fleischmann, M., Knippers, J., Lienhard, J., Menges, A., & Schleicher, S. (2012). Material behaviour: embedding physical properties in computational design processes. *Architectural Design*, 82(2), 44-51.
- [57] Fuller, R. B. (1982). *Synergetics: explorations in the geometry of thinking*. Estate of R. Buckminster Fuller.
- [58] Gander, M. J., & Kwok, F. (2012). Chladni figures and the Tacoma bridge: motivating PDE eigenvalue problems via vibrating plates. *SIAM Review*, 54(3), 573-596.
- [59] Gaß, S. (1990). Experiments – physical analog models in architectural design. In: Otto F (ed.) *Information of the Institute for Lightweight Structures: IL 25 Experiments*. Stuttgart, p. 288.

- [60] Gaß, S. (2016). Physical analog models in architectural design. *International Journal of Space Structures*, 31(1), 16-24.
- [61] Gabora, L. (2010). Revenge of the “neurds”: Characterizing creative thought in terms of the structure and dynamics of memory. *Creativity Research Journal*, 22(1), 1-13.
- [62] Gerber, D. J. (2012). PARA-Typing Informing Form and the Making of Difference Digital Design Pedagogy for the Prototyping of Performance and Material Affect. *International Journal of Architectural Computing*, 10(4), 501-519.
- [63] Gero, J. (1994). Towards a model of exploration in computer-aided design. *Formal design methods for CAD*, pp. 315–336.
- [64] Giovannini, J. (1999). Seat of authority. *I.D. Magazine*, Mayo, 44-47.
- [65] Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity research journal*, 4(2), 123-143.
- [66] Goldschmidt, G., & Smolkov, M. (2006). Variances in the impact of visual stimuli on design problem solving performance. *Design Studies*, 27(5), 549-569.
- [67] Goldschmidt, G.; Porter, W. (2004). *Design Representation*. London: Springer.
- [68] Goldschmidt, G., & Sever, A. L. (2011). Inspiring design ideas with texts. *Design Studies*, 32(2), 139-155.
- [69] Goldschmidt, G. (2014). Modeling the role of sketching in design idea generation. In *An Anthology of Theories and Models of Design* (pp. 433-450). Springer London.
- [70] Goldschmidt, G. (2015). Ubiquitous serendipity: Potential visual design stimuli are everywhere. In *Studying visual and spatial reasoning for design creativity* (pp. 205-214). Springer, Dordrecht.
- [71] Gonçalves, M., Badke-Schaub, P., & Cardoso, C. (2011). Searching for inspiration during idea generation. In *IASDR2011, the 4th world conference on Design Research*.
- [72] Gonçalves, M., Cardoso, C., & Badke-Schaub, P. (2013). Inspiration peak: Exploring the semantic distance between design problem and textual inspirational stimuli. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 1(4), 215-232.
- [73] Gonçalves, M., Cardoso, C., & Badke-Schaub, P. (2014). What inspires designers? Preferences on inspirational approaches during idea generation. *Design studies*, 35(1), 29-53.
- [74] Gonçalves, M., Cardoso, C., & Badke-Schaub, P. (2016). Inspiration choices that matter: the selection of external stimuli during ideation. *Design Science*, 2.
- [75] Grabska, E. (2015). The theoretical framework for creative visual thinking. In *Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity* (pp. 39-49). Springer, Dordrecht.
- [76] Green, W. S., & Jordan, P. W. (Eds.). (2003). *Pleasure with products: Beyond usability*. CRC press.
- [77] GT2P (2015). Great things to people. En: Catalina Plaza (Ed.), *Nuevos Creativos Chilenos Vol.1.* (pp.30-35). Santiago de Chile, Chile: Talleres Ograma.
- [78] Hannah, G. G. (2002). *Elements of design: Rowena Reed Kostellow and the structure of visual relationships*. Princeton Architectural Press.
- [79] Hennicke J, Matsushita K, Otto F et al. Grid Shells. In: Otto F. (ed.) *Information of the Institute for Lightweight Structures: IL 10 – grid shells*. Stuttgart, 1974, p. 346.

- [80] Hemberg, M., O'Reilly, U. M., Menges, A., Jonas, K., Goncalves, M., & Fuchs, S. (2006). Exploring generative growth and evolutionary computation for architectural design. *Art of Artificial Evolution*, Springer, Heidelberg.
- [81] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (1998). Metodología de la investigación. *México: Editorial McGraw Hill*, 15-40.
- [82] Hopf, A. (2009, September). Renaissance 2.0—Expanding the Morphologic Repertoire in Design. In *24th Cumulus Conference* (Vol. 24, No. 09, pp. 78-85).
- [83] Howard, T. J., Culley, S. J., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design studies*, 29(2), 160-180.
- [84] Huijben, F., & Van Herwijnen, F. (2007). Vacuumatics; shaping space by “freezing” the geometry of structures”. In *Proceedings of Tectonics Making Meaning conference*. Eindhoven.
- [85] Iwamoto, L. (2013). *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press.
- [86] Jannasch, E. (2016) Fit Forms and Free Forms of the Masonry Dome. *Nexus Network Journal*, 1-19.
- [87] Johnson, G., Gross, M. D., Hong, J., & Do, E. Y. L. (2009). Computational support for sketching in design: a review. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 2(1), 1-93.
- [88] Jirapong, K., Krawczyk, R. J., & Elnimeiri, M. (2002). Natural Forms As Virtual Architectures; en: *Proceedings of the 20th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 1-4. Warsaw, 2002.
- [89] Jordan, P. W. (1998). Human factors for pleasure in product use. *Applied ergonomics*, 29(1), 25-33.
- [90] Kitzinger, J. (1995). Qualitative research: introducing focus groups. *Bmj*, 311(7000), 299-302.
- [91] Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2012). Experiential learning theory. In *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp. 1215-1219). Springer US.
- [92] Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88-100.
- [93] Kumar, K. A., & Chani, P. S. (2017, January). Approaches to Parameterization in Architectural Design. In *International Conference on Research into Design* (pp. 629-641). Springer, Singapore.
- [94] Lang, R. J. (Ed.). (2009). *Origami 4: International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education Fourth*. CRC Press.
- [95] Lawson, B. (2006). *How designers think: the design process demystified*. Routledge.
- [96] Lebéé, A. (2015). From folds to structures, a review. *International Journal of Space Structures*, 30(2), 55-74.
- [97] Le Noble, F., Hacking, W., Slaaf, D., & Struijker-Boudier, H. (2001). Vascular development: design principles and morphometric analysis of a branched vascular tree. In *Branching in Nature* (pp. 257-280). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [98] Li, Q., Borgart, A., & Wu, Y. (2017). How to understand 'Structural Morphology'? *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 57(2).
- [99] Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C., & Knippers, J. (2013). Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4), 187-196.

- [100] Lienhard, J., & Knippers, J. (2013). Considerations on the scaling of bending-active structures. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4), 137-148.
- [101] Lienhard, J. (2014). *Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein*. Stuttgart: Universitat Stuttgart.
- [102] Manelius, A. M. (2012). Fabric Formwork. Investigations into Formwork Tectonics and Stereogeneity in Architectural Constructions. PhD Dissertation. The Royal Danish Academy of Fine Arts.
- [103] Massironi, M. (2001). *The psychology of graphic images: Seeing, drawing, communicating*. Psychology Press.
- [104] Marder, M. (1987). Soap-bubble growth. *Physical Review A*, 36(1), 438.
- [105] Markman, A.B. (2005). Representation Formats in Psychology. En: Nadel (2005).
- [106] Magnenat-Thalmann, N., Kalra, P., Leveque, J. L., Bazin, R., Batische, D., & Querleux, B. (2002). A computational skin model: fold and wrinkle formation. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 6(4), 317-323.
- [107] Maya, J., Patiño, E. (2018). Propiedades de las representaciones en diseño: una exploración interdisciplinaria de su rol funcional. Sometido a la revista KEPES en la fecha: 30 de abril de 2018.
- [108] McCormack, J., Dorin, A., & Innocent, T. (2004). Generative design: a paradigm for design research. *Proceedings of Futureground, Design Research Society, Melbourne*.
- [109] McKay, A., Chase, S., Garner, S., Jowers, I., Prats, M., Hogg, D., ... & Lim, S. (2009). Design synthesis and shape generation. In T. Inns (Ed.), *Designing for the 21st Century: Interdisciplinary Methods and Findings*. (pp. 304-321). Aldershot, UK: Gower Publishing Ltd.
- [110] McKim, R. H. (1980). *Thinking visually: A strategy manual for problem solving*. Lifetime learning publications.
- [111] Megahed, N. A. (2017). Origami Folding and its Potential for Architecture Students. *The Design Journal*, 20(2), 279-297.
- [112] Menges, A. (2005). Pluripotent Components and Polymorphous Systems: An Alternative Approach to Parametric Design. *AA Files*, (52), 63-74.
- [113] Mínguez, J. (1994). Foreman's crack growth rate equation and the safety conditions of cracked structures. *Engineering fracture mechanics*, 48(5), 663-672.
- [114] Miyashita, S., DiDio, I., Ananthabhotla, I., An, B., Sung, C., Arabagi, S., & Rus, D. (2015). Folding angle regulation by curved crease design for self-assembling origami propellers. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(2), 021013.
- [115] Morello, L., Rossini, L. R., Pia, G., & Tonoli, A. (2011). Graphic Representation Systems. *The Automotive Body*, 33-89. Springer.
- [116] Motro, R. (2009). An approach to structural morphology. *An Anthology of Structural Morphology*, 15.
- [117] Mougénot, C., Bouchard, C., & Aoussat, A. (2007). Creativity in design—how designers gather information in the “Preparation” phase. *Proceedings of IASDR'07*, 11-15.

- [118] Mougnot, C., Watanabe, K., Bouchard, C., & Aoussat, A. (2009). Visual materials and designers' cognitive activity: Towards in-depth investigations of design cognition. *International Association of Societies of Design Research, Seoul, South Korea*.
- [119] MRGD (2008). *MORPHE MRGD*, New York, E.E.U.U: Springer Wien New York.
- [120] Nabaei, S. S., Baverel, O., & Weinand, Y. (2013). Mechanical form-finding of the timber fabric structures with dynamic relaxation method. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4), 197-214
- [121] Nordin, A., Hopf, A., & Motte, D. (2013). Generative design systems for the industrial design of functional mass producible natural-mathematical forms. In *5th International Congress of International Association of Societies of Design Research. IASDR*. Retrieved from <http://lup.lub.lu.se/record/4113641/file/4113677.pdf>.
- [122] Ocvirk, O. G., Bone, R. O., Stinson, R. E., & Wigg, P. R. (2002). *Art fundamentals: theory and practice* Dubuque: Wm. C. Brown Company, Publishers.
- [123] Otto, F. (1971). Minimal nets, in B. Burkhardt (ed.), *ILI: Minimal nets*, Karl Krämer Verlag Und IL, Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, Stuttgart, 4-7.
- [124] Otto, F. (1988). IL 22 "Form". Institute for Lightweight Structures. Germany, 96 p.
- [125] Otto, F. (1995). *Pneu and bone*. Institute for Lightweight Structures.
- [126] Otto, F. (2001). Natural Constructions, a Subject for the Future. En: Frei Otto y Bodo (Ed.), *Finding Form: Towards an architecture of the Minimal* (pp. 15 – 22). Basel, Switzerland: Birkhauser.
- [127] Otto, F., Rasch, B. (2001). *Finding Form: Towards an architecture of the Minimal*. Alemania: Axel Menges
- [128] Otto, F. (2011). Forming Bubbles. En: Rudolf Finsterwalder (Ed.), *Form follows nature* (pp. 237-272). New York, E.E.U.U: Springer Wien New York.
- [129] Otto, F. (2011). Growing and dividing Pneus. En: Rudolf Finsterwalder (Ed.), *Form follows nature* (pp. 333-348). New York, E.E.U.U: Springer Wien New York.
- [130] Oxman, R. (1997). Design by re-representation: a model of visual reasoning in design. *Design studies*, 18(4), 329-347.
- [131] Oxman, N., & Rosenberg, J. L. (2007). Material-based Design Computation An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators. *International journal of architectural computing*, 5(1), 25-44.
- [132] Park, J. A., & Kim, Y. S. (2007). Visual reasoning and design processes. In *Int'l. Conf. on Engineering Design (ICED), Paris*.
- [133] Parigi, D., & Kirkegaard, P. H. (2014). The reciprocalizer: an agile design tool for reciprocal structures. *Nexus Network Journal*, 16(1), 61-68.
- [134] Patiño, E. Arango, M. Jaramillo, J. (2015). Biomimética o la traducción de los fenómenos biológicos al diseño. *Iconofacto*. Vol. 11. Número 16. Enero – Junio. 201 -212.
- [135] Patiño, E., & Maya, J. (2018, March). Construction of a Repertoire of Analog Form-Finding Techniques as a Basis for Computational Morphological Exploration in Design and Architecture. In *Computational*

- Intelligence in Music, Sound, Art and Design: 7th International Conference, EvoMUSART 2018, Parma, Italy, April 4-6, 2018, Proceedings* (Vol. 10783, p. 50). Springer.
- [136] Paul, C., Lipson, H., & Cuevas, F. J. V. (2005, June). Evolutionary form-finding of tensegrity structures. In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (pp. 3-10). ACM.
- [137] Pei, E., Campbell, I., & Evans, M. (2011). A taxonomic classification of visual design representations used by industrial designers and engineering designers. *The Design Journal*, 14(1), 64-91.
- [138] Pellegrino, S. (Ed.). (2014). *Deployable structures* (Vol. 412). Springer.
- [139] Pickover, C. A. (2009). *The math book: from Pythagoras to the 57th dimension, 250 milestones in the history of mathematics*. Sterling Publishing Company, Inc.
- [140] Post, R. A. G., Blijlevens, J., and Hekkert, P. (2013). Unity-in-variety in product design aesthetics, *In Proceedings of TeaP 2013*, Pabst science publishers, pp 217.
- [141] Pone, S., Colabella, S., D'Amico, B., Lancia, D., Fiore, A., & Parenti, B. (2013). Timber post-formed gridshell: digital form-finding/drawing and building tool. In *Proc. of the IASS Symposium, Wroclaw, Poland*.
- [142] Plastiglas (2018). Manual técnico termoformado. Plastiglas de México, S.A.
<http://www.plastiglas.com.mx/>
- [143] Purcell, A., & Gero, J. S. (1998). Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design studies*, 19(4), 389-430.
- [144] Quarante, D. (1992). Diseño Industrial 2, Elementos Teóricos, Enciclopedia del Diseño. *Barcelona: Ceac*.
- [145] RAE. (2018). *Real Academia de Española*. <http://www.rae.es/>
- [146] Rampino, L., & Gorno, R. (2011). Teaching Design & Engineering Students how to handle the Form Giving issue. In *DS 69: Proceedings of E&PDE 2011, the 13th International Conference on Engineering and Product Design Education, London, UK, 08.-09.09. 2011*.
- [147] Raoofian, I., Sherafat, Z., Zebarjad, S. M., & Sajjadi, S. A. (2018). Fabrication and Morphological Characterization of Polyurethane Foam Reinforced with TiO₂ Nanoparticles. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 57(1), 8-20.
- [148] *RedDot (2018). Red Dot Design Award: <https://www.red-dot.org/>*
- [149] Restrepo-Giraldo, J. D. (2004). Information processing in design. repository.tudelft.nl
- [150] Rocha, C. S. (2000). *Plasticidade do papel e design*. Plataño editora SA.
- [151] Rodas, R., & Rousé, P. (2010). Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares. *Revista de la Construcción*, 9(1), 98-106.
- [152] Rodríguez, F. S., Sañudo, L. G., & Vanegas, D. E. (2006). *Estructuras ligeras*. Medellín: Universidad pontificia bolivariana.
- [153] Rojo Tejerina, J. J. (2013). Miguel Fisac Serna. Arquitecto. Vida y obra. Universidad de Valladolid. Descarga en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/4860>

- [154] Römer, A., Pache, M., Weißhahn, G., Lindemann, U., & Hacker, W. (2001). Effort-saving product representations in design—results of a questionnaire survey. *Design Studies*, 22(6), 473-491
- [155] Rosenman, M. A., & Gero, J. S. (1993). Creativity in design using a design prototype approach. *Modeling creativity and knowledge-based creative design*, 111-138.
- [156] Rumberger, J., Lienhard, J. (2018) Collaborative Models for Design Computation and Form Finding—New Workflows in Versioning Design Processes. In *Humanizing Digital Reality*, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- [157] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (1998). Metodología de la investigación. *México: Editorial Mc Graw Hill*, 15-40.
- [158] Sanchiz, G. (2008). Porous cast. In: Michael Hensel and Achim Menges (Ed.), *Architectural Design: Versatility and Vicissitude*. (pp. 60). London: Wiley
- [159] Sastre, R. (2012). Las estructuras neumáticas y la presión interior. <http://www.wintess.com/las-estructuras-neumaticas-y-la-presion-interior/>
- [160] Shah, J. J., Smith, S. M., & Vargas-Hernandez, N. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design studies*, 24(2), 111-134.
- [161] Shea, K., Aish, R., & Gourtovaia, M. (2005). Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*, 14(2), 253-264.
- [162] Shih, H. M., Yang, C. T., & Velleux, M. (2006). Surface erosion equation approach using energy principles.
- [163] Schaur, E. (1992). *IL39: non-planned settlements: characteristic features - path system, surface subdivision*. Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [164] Schön, D. (1983). *The reflective practitioner: How practitioners think in action*. London: Temple-Smith.
- [165] Schumacher, P. (2008). Preface: Autopoietic Elegance. En: Research Institute for Experimental Architecture (Ed.), *MORPHE MRGD* (pp. 6-8). New York, E.E.U.U: Springer Wien New York.
- [166] Sobek, W. (2016). Ultra-lightweight construction. *International Journal of Space Structures*, 31(1), 74-80.
- [167] Sternberg, R.J., O'Hara, L.A, Lubart, T.I. (1997). Creativity as Investment. *California Management Review*, 40(1).
- [168] Steward, I., & Golubitsky, M. (1995). *¿Es Dios geómetra?: las simetrías de la naturaleza*. Crítica.
- [169] Sierra, F. Patiño, E. (2005). Objetos a partir de la rigidización de estructuras de membrana. *Iconofacto*, Vol. 1. N° 2. 53-62.
- [170] Singer, J.L. (1999) Imagination, en: Runco, Pritzker, (1999).
- [171] Singh, V., & Gu, N. (2012). *Towards an integrated generative design framework*. *Design Studies*, 33(2), 185-207.
- [172] Sorguç, A. G., Hagiwara, I., & Selcuk, S. (2009). Origamics in architecture: a medium of inquiry for design in architecture. *Metu Jfa*, 2, 26.

- [173] Stach, E. (2010). Structural morphology and self-organization. *Design and Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, 138, 29-40.
- [174] Such, M., Jimenez-Octavio, J. R., Carnicero, A., & Lopez-Garcia, O. (2009). An approach based on the catenary equation to deal with static analysis of three dimensional cable structures. *Engineering structures*, 31(9), 2162-2170
- [175] Swackhamer, M., Satterfield, B. (2013). Breaking the mold: Variable vacuum forming. ACADIA 2013: Adaptive architecture, Cambridge.
- [176] Symeonidou, I. (2016). Flexible matter: A real-time shape exploration employing analogue and digital form-finding of tensile structures. *International Journal of Architectural Computing*, 14(4), 322-332.
- [177] Szalabaj, P. (2014). *Contemporary architecture and the digital design process*. Routledge.
- [178] Terstiege, G. (Ed.). (2009). *The making of design: From the first model to the final product*. Basel, Switzerland: Birkhäuser.
- [179] Thurgood, C., Hekkert, P., & Blijlevens, J. (2014). The Joint Effect of Typicality and Novelty on Aesthetic Pleasure for Product Designs: Influences of Safety and Risk. *International Association of Empirical Aesthetics*, 391-396.
- [180] Thönnissen, U. (2014). A Form-Finding Instrument for Reciprocal Structures. *Nexus Network Journal, Architecture and Mathematics*. 16, 89–107.
- [181] Thompson, D. W. (1942). On growth and form. *On growth and form*.
- [182] Tibert, A. G., & Pellegrino, S. (2011). Review of form-finding methods for tensegrity structures. *International Journal of Space Structures*, 26(3), 241-255.
- [183] Tjalve, E. (1976). Systematic design of industrial products—tools for the design engineer. *Akademisk Forlag, Copenhagen Google Scholar*.
- [184] Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2009). *Diseño y desarrollo de productos*. México, McGraw-Hill
- [185] Rahe, U., Babapour, M., Rehammar, B. (2012). Creating novel product form based on formal Aesthetics-A Method for Advanced form design education. In International Conference on Engineering and Product Design Education 6 & 7 September 2012, Artesis University College, Antwerp, Belgium.
- [186] Valencia, A. (2007). *La estructura: un elemento técnico para el diseño*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- [187] Veenendaal, D., & Block, P. (2012). An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. *International Journal of Solids and Structures*, 49(26), 3741-3753.
- [188] Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- [189] Villate, M. C. (2008). *Estructuras no convencionales en arquitectura* (Vol. 12). Univ. Nacional de Colombia.
- [190] VON, B. (2009). A Geometric Comparison of Branching Structures in Tension and Compression versus Minimal Paths. *University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA*.
- [191] Wagensberg, J. (2004). *La rebelión de las formas. O cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*, 2. Edición Mathemas.

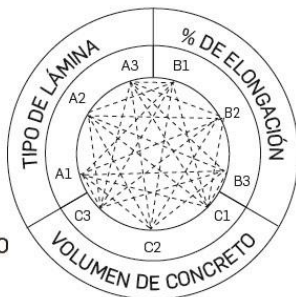
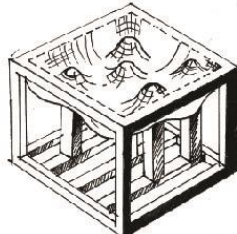

- [192] Ward, I. M., & Sweeney, J. (2012). *Mechanical properties of solid polymers*. John Wiley & Sons.
- [193] Wang-Iverson, P., Lang, R. J., & Mark, Y. I. M. (Eds.). (2011). *Origami 5: Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*. CRC Press.
- [194] Wallschlaeger, C., Basic-Snyder, C., & Morgan, M. (1992). *Basic visual concepts and principles for artists, architects, and designers*. Wm. C. Brown Publishers.
- [195] *WDO (2018)*. World Design Organization: <http://wdo.org/about/definition/>
- [196] Wen, H. I., Zhang, S. J., Hapeshi, K., & Wang, X. F. (2008). An innovative methodology of product design from nature. *Journal of Bionic Engineering*, 5(1), 75-84.
- [197] Wendrich, R. E. (2010). Raw shaping form finding: Tacit tangible CAD. *Computer-Aided Design and Applications*, 7(4), 505-531.
- [198] Wixon, D., & Wilson, C. (1997). The usability-engineering framework for product design and evaluation. In *Handbook of Human-Computer Interaction (Second Edition)* (pp. 653-688).
- [199] Wong, W. (1993). *Principles of form and design*. John Wiley & Sons.
- [200] Yacizi, S. (2011). Computing through holistic systems design method: material formations workshop. *DEARQ: Revista de Arquitectura de la Universidad de los Andes*, (9), 90-101.
- [201] Yilmaz, S., Park, J., Kim, Y. (2008) Effects of Cognitive Activities on Designer Creativity and Performance: A Detailed Look into the Visual Reasoning Model. In: Korea-Japan Design Engineering Workshop, At Seoul, South Korea.

Referencias de las figuras

- Ever Patiño: 1 – 25, 27 – 40, 42, 44, 47 – 49
- Valeria Londoño: 8,
- José Agudelo:8, 11
- Juliana Vélez: 8,
- Camila Aguirre: 8, 26, 45
- Sara Restrepo Osorio: 29
- María Paula Arias: 41, 43
- Iris Barbozo Cabamillos: 45
- Isabella Jaramillo Villa: 46
- Karen Rodríguez: 46

ANEXO 1

Caracterización detallada de las 40 técnicas

1 Técnica: Encofrados elásticos y concreto			
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Inflar	Yeso, concreto, membranas de nylon o latex, varillas.	Presión interna, gravedad y equilibrio superficial.	<p>A. TIPOS DE APOYO Puntual Lineal Irregular</p> <p>B. % DE ELONGACIÓN Alto (100%) Medio (50%) Bajo (20%)</p> <p>C. VOLUMEN DEL CONCRETO Mucho Medio Poco</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$p = t1 / r1 + t2 / r2 \quad (1)$ $\min n(p) \geq 0, 2 \cdot \max n(p) \quad (2)$		Sólidos con dobles curvaturas positivas fluidas	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>p= presión t= tensión de membrana r= radio de curvatura</p>	<p>(Iwamoto, 2013) (Rojo, 2013) (Swackhamer & Satterfield, 2013) (Eggers, 1977) (Sastre, 2012)</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: Camila Aguirre

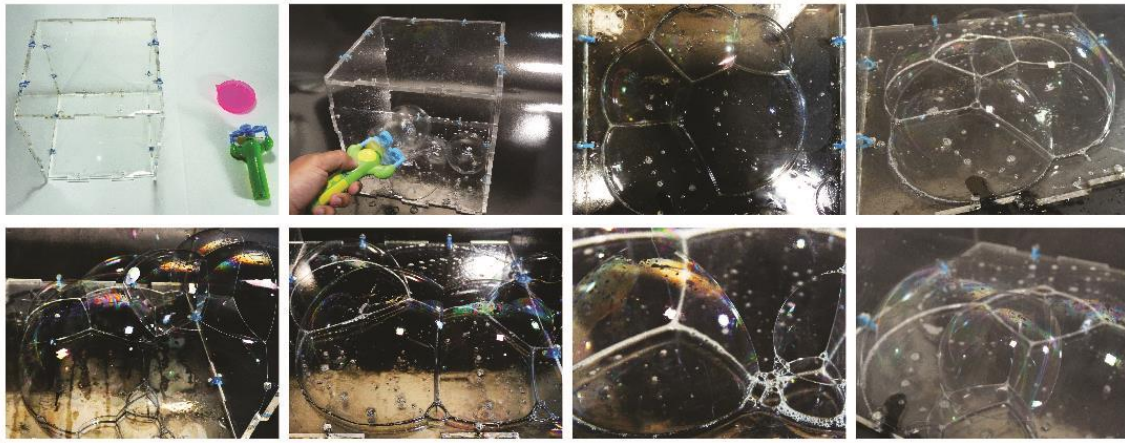


2 Técnica: Modelo de empaquetamiento de burbujas

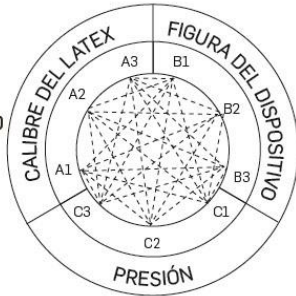
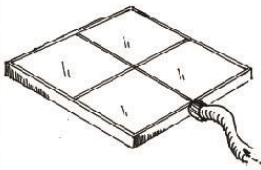

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Inflar	Máquina para generar burbujas, agua, líquido jabonoso, contenedor.	Tensión superficial	<p>A. # DE BOQUILLAS Pocas (1) Medio (2) Muchas (3 o más)</p> <p>B. TIEMPO ENTRADA AIRE Mucho (60 segundos) Medio (30 segundos) Poco (10 segundos)</p> <p>C. TAMAÑO CONTENEDOR Grande Mediano Pequeño</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$p = t1 / r1 + t2 / r2 \quad (1)$ $\min n(p) \geq 0, 2 \cdot \max n(p) \quad (2)$		Estructura tridimensional espumosa		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>p= presión t= tensión de membrana r= radio de curvatura</p>	<p>(Lopes, et al., 2014) (Schaur, 1992) (Otto, 2011) (Nordin, et al., 2013) (Eggers, 1977) (Sastre, 2012)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

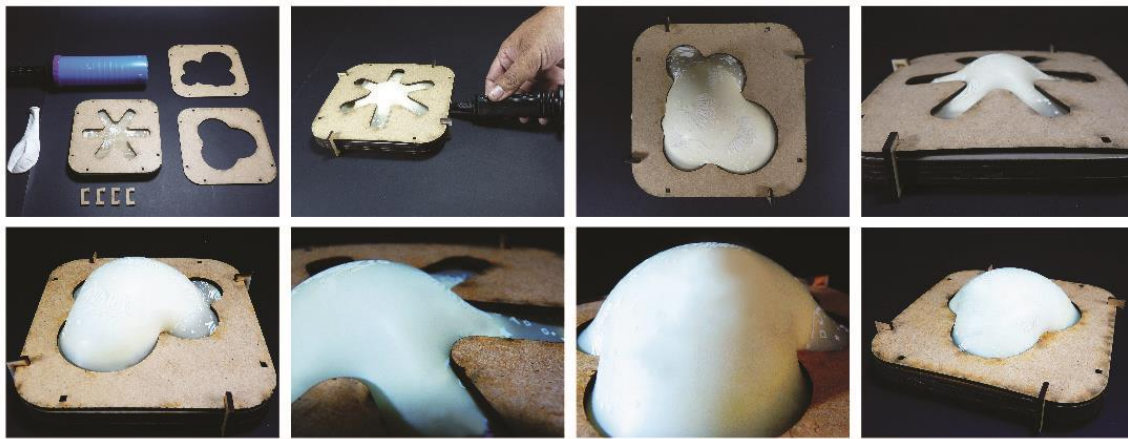


3 Técnica: Aparatos para crear la forma de estructuras neumáticas

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Possible variables de experimentación
Inflar	Latex, inflador, dispositivo en madera	Presión interna homogénea	<p>A. CALIBRE DEL LATEX Delgado Medio Grueso</p> <p>B. FIGURA DEL DISPOSITIVO Corazón Estrella Corazón</p> <p>C. PRESIÓN Mucha Media Poca</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$p = t1 / r1 + t2 / r2 \quad (1)$ $\min n(p) \geq 0,2 \cdot \max n(p) \quad (2)$		Superficies de doble curvatura positiva	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>p= presión t= tensión de membrana r= radio de curvatura</p>	<p>(Otto, 2011) (Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001) (Arbeláez & Patiño, 2010) (Eggers, 1977)* (Sastre, 2012)*</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

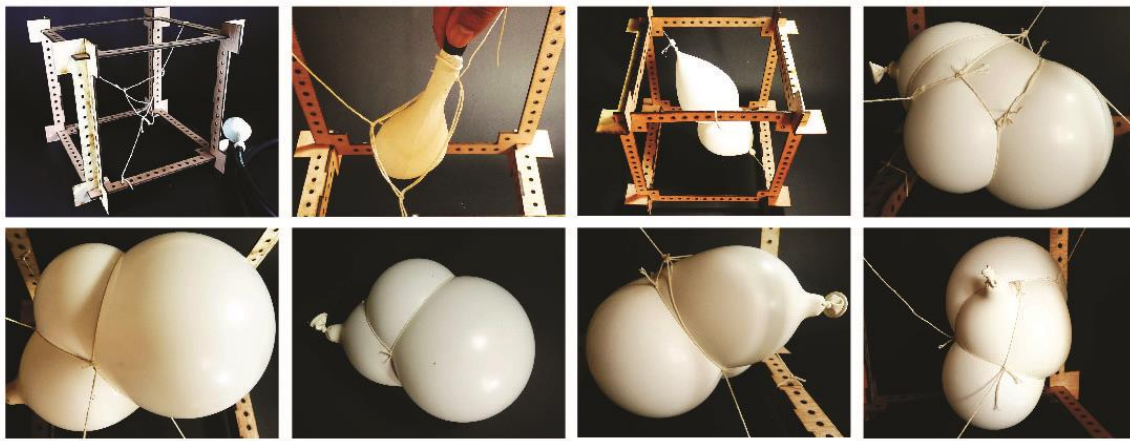


4 Técnica: Células ligeras

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Inflar	Globos de látex, marcos y cuerdas	Presión interna	<p>A. TIPO DE GLOBO Grande Mediano Alargado</p> <p>B. PRESIÓN Alta Media Baja</p> <p>C. RESTRICCIÓN En red con marco Líneas sin marco Tensionado con marco</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$p = t l / r l + t 2 / r 2 \quad (1)$		Dobles curvaturas positivas o geometrías esferoides		
$\min n(p) \geq 0, 2 \cdot \max n(p) \quad (2)$				
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>p= presión t= tensión de membrana r= radio de curvatura</p>	<p>(Otto, 2011) (Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001) (Patiño, Arango & Jaramillo, 2015) (Sastre, 2012)* (Eggers, 1977)*</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño



5 Técnica: Crecimiento de espumas



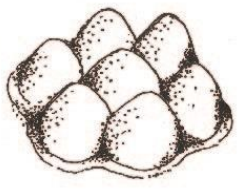
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Inflar	Espuma de poliuretano, recipiente, restricciones.	Crecimiento químico de dos sustancias	<p>A. VOLUMEN DE POLIURETANO</p> <p>Mucho Medio Poco</p> <p>B. TIPO DE RESTRICCIÓN</p> <p>Líneas Círculos Ovalos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN</p> <p>En red Lateral Desordenada</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$N_f = \left(\frac{N}{A}\right)^{3/2} \quad (1)$		Sólidos de doble curvatura positiva.		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>N_f =Densidad celular</p> <p>N =# de células</p> <p>A =Área</p>	<p>(Arbeláez & Patiño, 2010)</p> <p>(Raoofian, et. al., 2018)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Juliana Vélez

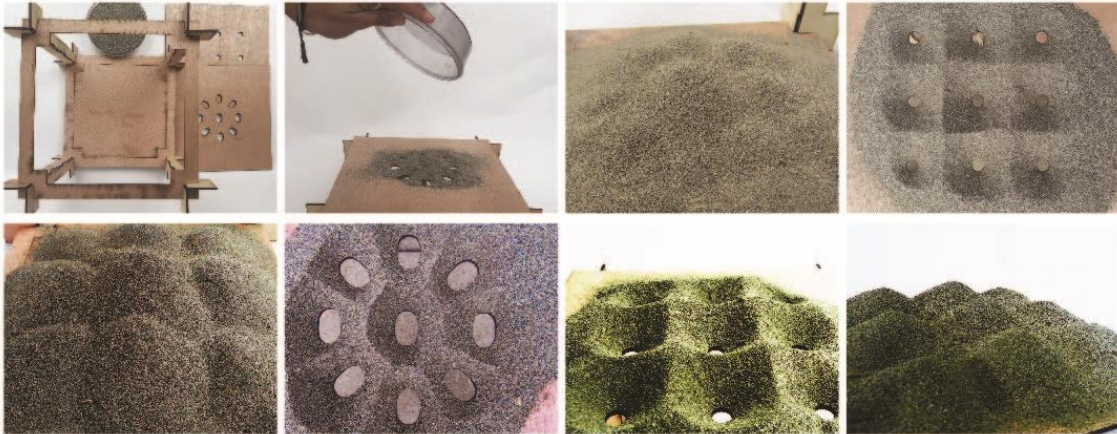


6 Técnica: Pilas de arena

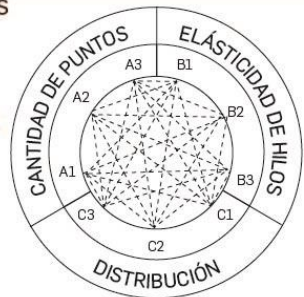
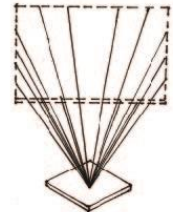
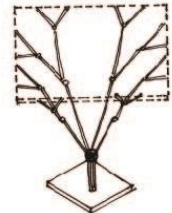
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Embudos, granos de arena o de azúcar.	Agrupación por gravedad	<p>A. VOLUMEN DE ARENA Mucho Medio Poco</p> <p>B. TIPO DE PERFORACIÓN Líneas Círculos Ovalos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN En red Lateral Desordenada</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Phi = \tan^{-1} [2H / (DA - d)] \quad (1)$		Formas montañas, montículos o dunas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
Φ = Ángulo de reposo <i>H</i> = Altura <i>DA</i> = Diámetro montículo <i>d</i> = Diámetro de salida	(Dickson, 2003) (Otto & Rasch, 2001) (Rodas & Rousé, 2010)			

Registro fotográfico

Fotografías: Camila Aguirre

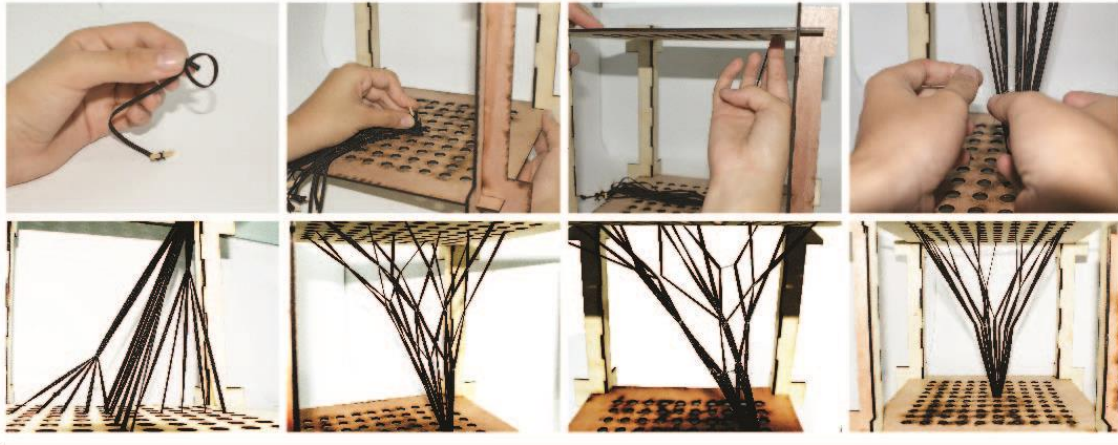


7 Técnica: Construcciones ramificadas

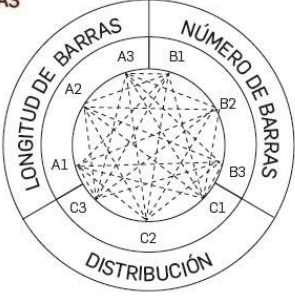


Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Hilos elásticos, marcos, anillos, sujetadores	Ramificación progresiva mientras se aleja del centro	<p>A. CANTIDAD DE PUNTOS Muchos Intermedia Pocos</p> <p>B. ELÁSTICIDAD HILOS Mucho Media Poca</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN En red Lateral Desordenada</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$A = g_{L/1}^1 \cdot g_{L/2}^2 \cdot g_{L/4}^4 \cdot g_{L/8}^8 \quad (1)$		Estructura arboriforme 2D o 3D		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p><i>A</i> =Árbol <i>g</i> =Generación <i>L</i> =Longitud inicial</p>	<p>(VON, 2009) (Otto & Rasch, 2001) (Villate, 2008) (Le Noble, et. al., 2001)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Juliana Vélez

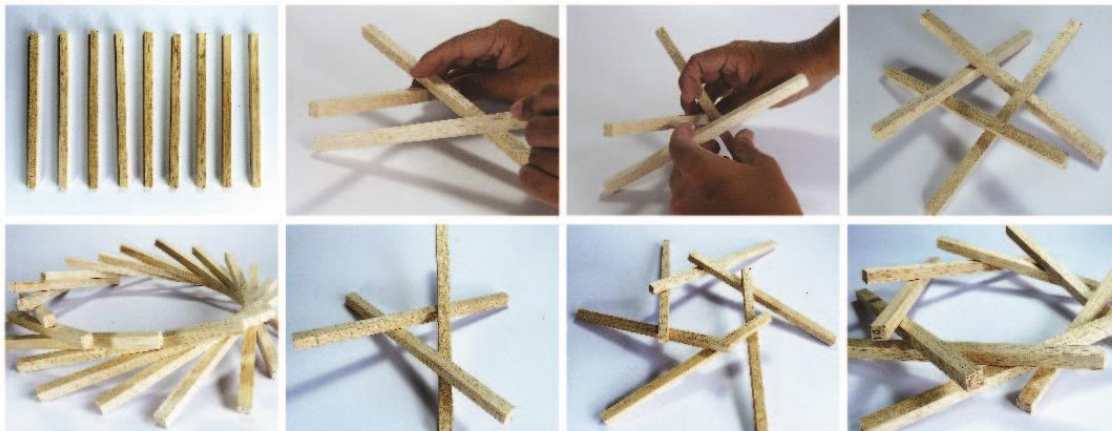


8 Técnica: Estructuras recíprocas

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Agrupar	Barras cilíndricas de madera o metal	Soporte mutuo	<p>A. LONGITUD DE LAS BARRAS Largas Intermedias Cortas</p> <p>B. NÚMERO DE BARRAS Muchos Intermedios Pocos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN En malla En sólido En columna</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$l_{ij} = \frac{ b_i }{ I_i } \quad (1)$ $l_{ji} = \frac{ b_j }{ I_{ji} } \quad (2)$ $e_{ij} = e_{ij} \quad (3)$ $t_{ij} = \text{sgn}(\hat{e}_{ij} \cdot \hat{r}_{ij}) \quad (4)$		Estructura tipo retícula con curvatura	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>b = Longitud barra r = radio e = Excentricidad l = Relación de acoplamiento t = Posición arriba/abajo</p>	<p>(Parigi & Kirkegaard, 2014)* (Thönnissen, 2014) (Fuller, 1982) (Villate, 2008)</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

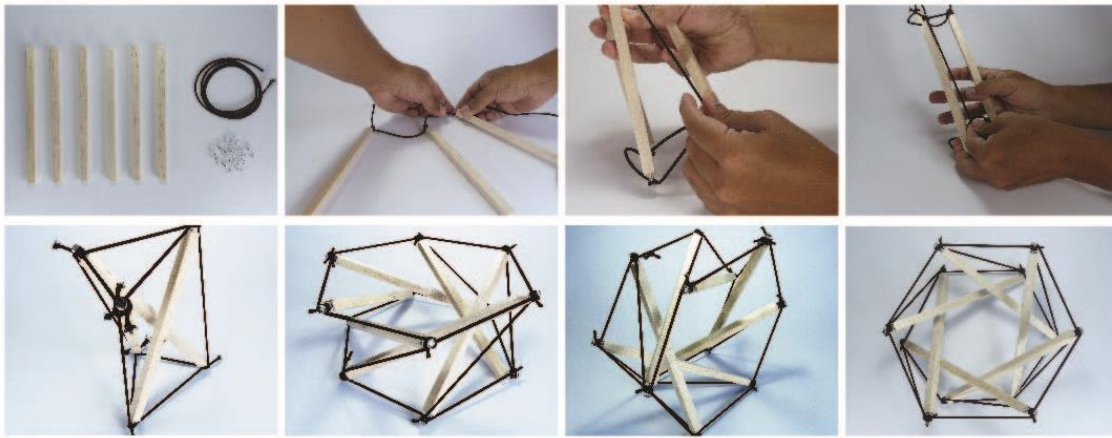


9 Técnica: Sistemas tensegrity prismáticos

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Varillas rígidas, cables flexibles	Auto-equilibrio. Tensión continua, compresión discontinua	A. LONGITUD DE LAS BARRAS Largas Intermedias Cortas B. NÚMERO DE BARRAS Muchos Intermedios Pocos C. DISTRIBUCIÓN En malla En sólido En columna	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$q_{1,2} \left[\sin\theta - \sin\left(\theta + \frac{2\pi j}{v}\right) \right] = 0 \quad (1)$		Estructuras ligeras tridimensionales		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
q = Fuerza de densidad θ = Rotación relativa v = Caras del polígono j = Entero más pequeño que v	(Tibert & Pellegrino, 2011) (Paul, et al., 2005) (Pellegrino, 2014) (Sobek, 2016) (Rodríguez, et al., 2006) (Fuller, 1982) (Villate, 2008) (Connelly & Terrell, 1995)			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

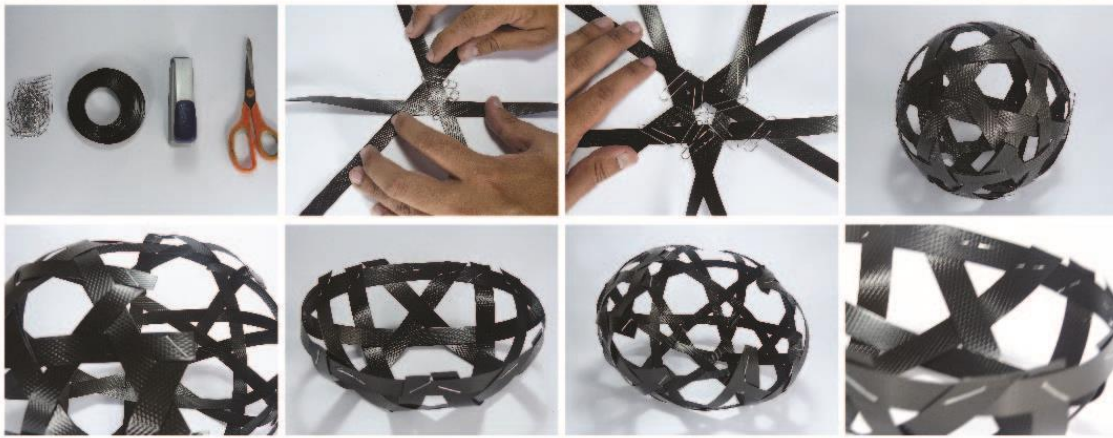


10 Técnica: Tejidos geodésicos

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Cintas	Agrupación en vértices de 3° a 7° orden.	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A. LONGITUD DE LAS CINTAS Largas Intermedias Cortas</p> <p>B. ANCHO DE LAS CINTAS Muy anchas Anchas Cortas</p> <p>C. TIPO ENTRECruzAMIENTO Alto (7° orden) Medio (5° o 6° orden) Bajo (3° o 4° orden)</p> </div> <div style="width: 45%; text-align: center;"> </div> </div>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
		Estructuras ligeras tridimensionales		
	$d_i = \frac{5\sqrt{3}a_{c-c}}{\pi} (n^2 nm + m^2)^{1/2} \quad (1)$			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>d =Diámetro esfera</p> <p>a =Longitud arista</p> <p>nm=Triángulos</p>	<p>(Rodríguez, et al.,2006)</p> <p>(Fuller,1982)</p> <p>(Dresselhaus, Dresselhaus & Eklund, 1996)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

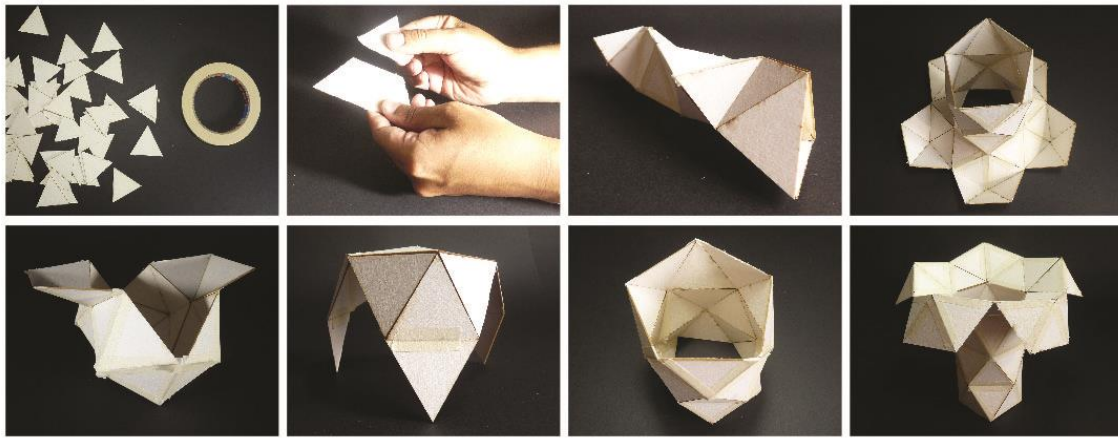


11 Técnica: Triángulos y construcción geodésica

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Triángulos equiláteros en cartón	Unión por vértices de 3°, 4°, 5°, 6° y 7° orden.	<p>A. # DE TRIÁNGULOS Muchos Intermedios Pocos</p> <p>B. PREDOMINIO DE UNIÓN 7° orden 5° o 6° orden 3° o 4° orden</p> <p>C. TIPOS DE UNIÓN Alto (7° orden) Medio (5° o 6° orden) Bajo (3° o 4° orden)</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$d_i = \frac{5\sqrt{3}a_{c-c}}{\pi} (n^2 + nm + m^2)^{1/2} \quad (1)$		Volúmenes con aristas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>d =Diámetro esfera a =Longitud arista nm=Triángulos</p>	<p>(Arbeláez & Patiño, 2010) (Dresselhaus, Dresselhaus & Eklund, 1996)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

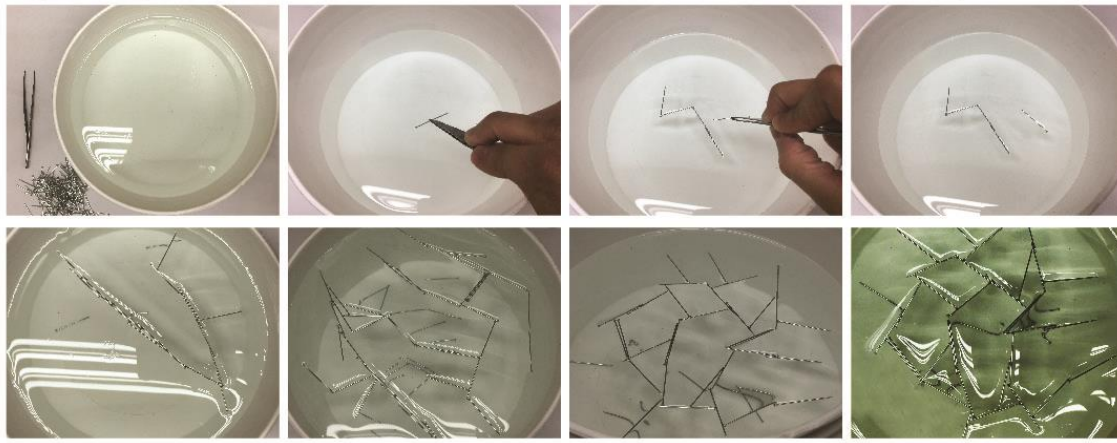


12 Técnica: Ocupación de espacio por repulsión o distanciamiento

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Alfileres magnetizados, contenedor, agua	Auto-equilibrio de fuerzas magnéticas	<p>A. # DE ALFILERES Muchos Intermedios Pocos</p> <p>B. TAMAÑO ALFILERES Grandes Medianos Pequeños</p> <p>C. PUNTO PARA MAGNETIZAR Punta Medio Extremo redondo</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\vec{F} = Q_0 \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$		Rejillas irregulares		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
\vec{F} = Fuerza magnética Q_0 = Carga positiva \vec{v} = Velocidad \vec{B} = Inducción magnética	(Lopes, et al., 2014) (Schaur, 1992) (Barco, Rojas & Restrepo, 2012)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo

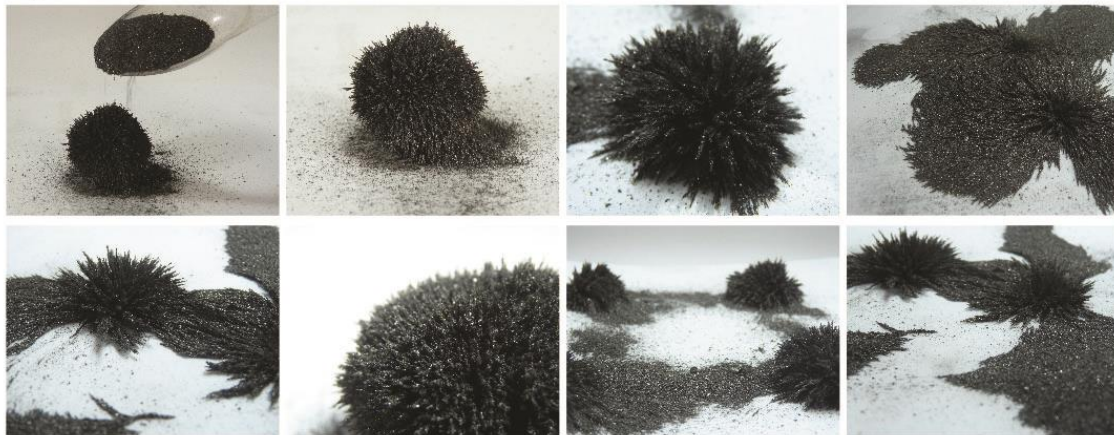


13 Técnica: Partículas y magnetismo

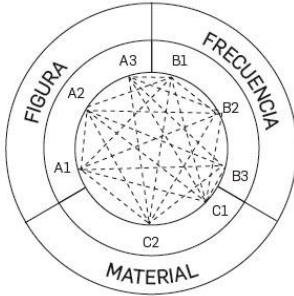
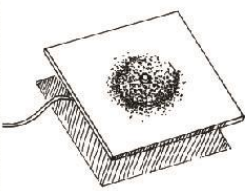
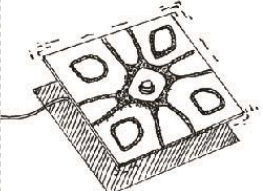
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Limadura de hierro, imanes, superficie	Auto-equilibrio de fuerzas magnéticas	<p>A. CANTIDAD DE LIMADURA Mucha Intermedia Poca</p> <p>B. # DE IMÁNES Muchos Medios Pocos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN En línea En cuadrícula En desorden</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\vec{F} = Q_0 \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$		Formas irregulares en explosión		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
\vec{F} = Fuerza magnética Q_0 = Carga positiva \vec{v} = Velocidad \vec{B} = Inducción magnética	(Arbeláez & Patiño, 2010) (Barco, Rojas & Restrepo, 2012)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo

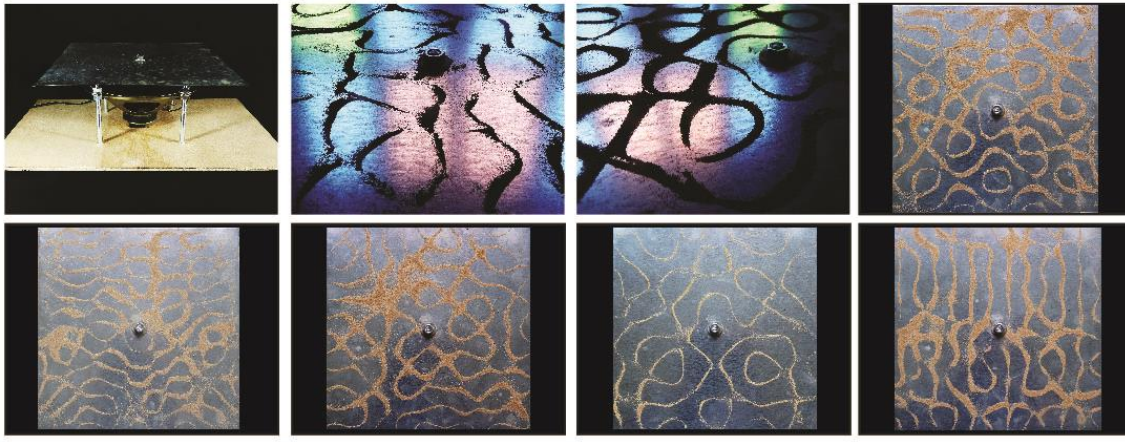


14 Técnica: Párculas de arena y vibración

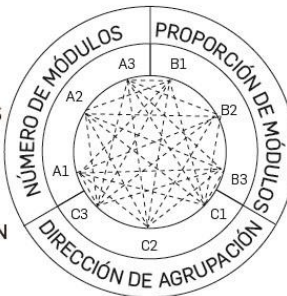
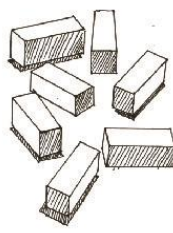
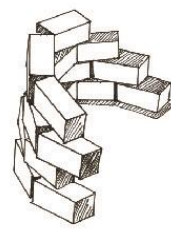
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Arena, placa metálica, parlante, amplificador, generador de frecuencias	Vibración por cambio de frecuencias	<p>A. FIGURA Cuadrado Triángulo Pentágono</p> <p>B. FRECUENCIA Alto (1101-1300Hz) Medio (901-1100Hz) Bajo (750 - 900Hz)</p> <p>C. MATERIAL Arena Sólidos no newtonianos</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$F(x, y, t) = -Lz \quad (1)$		Redes regulares y semirregulares		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>F= fuerza x= coordenada y= coordenada z= coordenada t= tiempo L= operador diferencial espacial</p>	<p>(Gaß, 2016) (Steward & Golubitsky, 1995) (Gander & Kwok, 2012)*</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

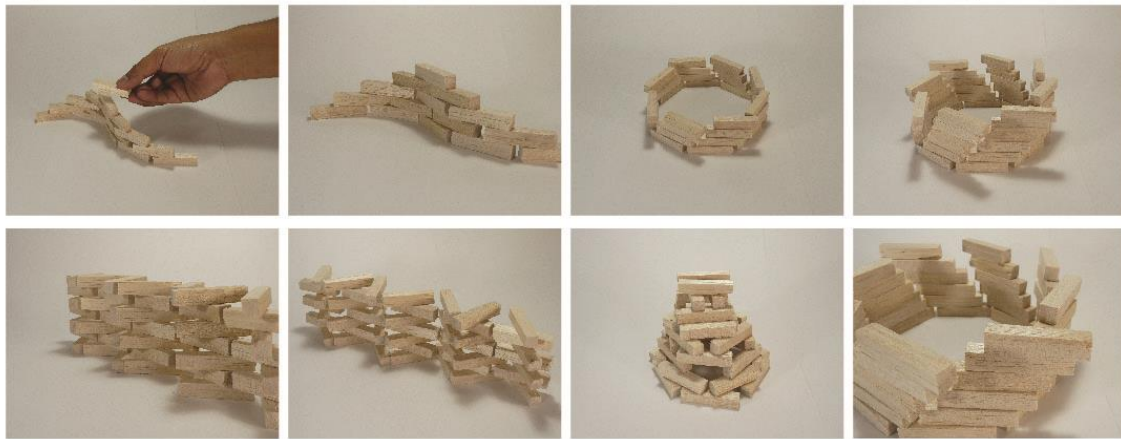


15 Técnica: Agrupación simétrica de módulos paralelepípedos

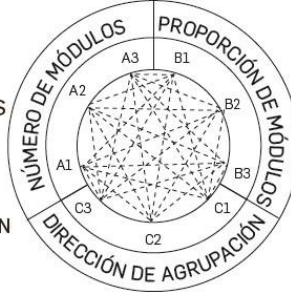
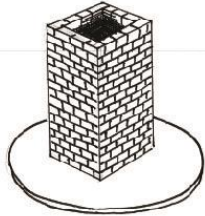
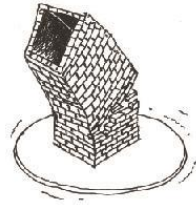
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Agrupar	Paralelepípedos en madera	Agrupación en diferentes direcciones	<p>A. NÚMERO DE MÓDULOS Muchos Medios Pocos</p> <p>B. PROPORCIÓN DE MÓDULOS Más largos Más anchos Más profundos</p> <p>C. DIRECCIÓN DE AGRUPACIÓN En línea recta En línea curva En línea orgánica</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$F = m1_{\varphi}^0; m2_{2\varphi}^{L/2}; m3_{3\varphi}^L; m4_{4\varphi}^{Lx1.5} \quad (1)$		Volúmen por secciones		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>F =Fila m =módulo φ =1.618 L =longitud del módulo</p>	(Agkathidis, 2016)			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

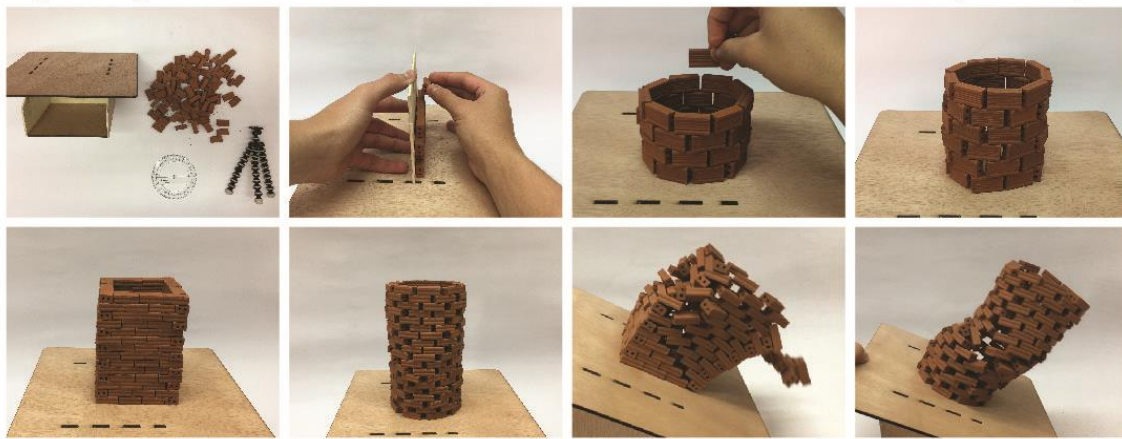


16 Técnica: Estabilidad de estructuras y gravedad

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Deconstruir	Ladrillos pequeños y báscula	Agrupación, estabilidad y gravedad	<p>A. NÚMERO DE MÓDULOS Muchos Medios Pocos</p> <p>B. PROPORCIÓN DE MÓDULOS Más largos Más anchos Más profundos</p> <p>C. DIRECCIÓN DE AGRUPACIÓN En línea recta En línea curva En línea orgánica</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$		Estructura deconstruida		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
Δx =Desplazamiento v_0 =Velocidad inicial a =Aceleración t =Intervalo de tiempo	(Otto & Rasch, 2001) (Feynman, Leighton, & Sands, 1987)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo



17 Técnica: Deformación de metal por compresión

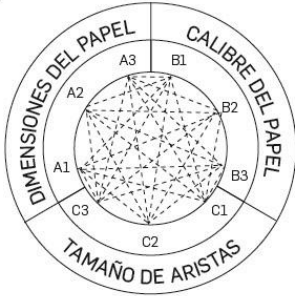
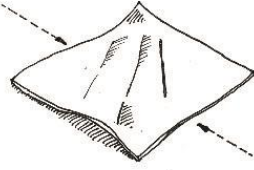
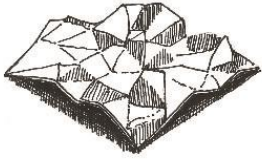
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Deconstruir	Sección metálica, prensa hidráulica	Compresión perpendicular	<p>A. FUERZA (PSI) Mucha Media Baja</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida	<p>B. TIPO DE SECCIÓN Circular Cuadrada Rectangular</p>	
$\epsilon_{AB} = \frac{A'B' - AB}{AB} \quad (1)$		Superficies deformadas y onduladas	<p>C. TIEMPO DE COMPRESIÓN Mucho Medio Poco</p>	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>ϵ = Deformación A = Punto B = Punto</p>	<p>(Cervera & Blanco, 2002) (Arbeláez & Patiño, 2010)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

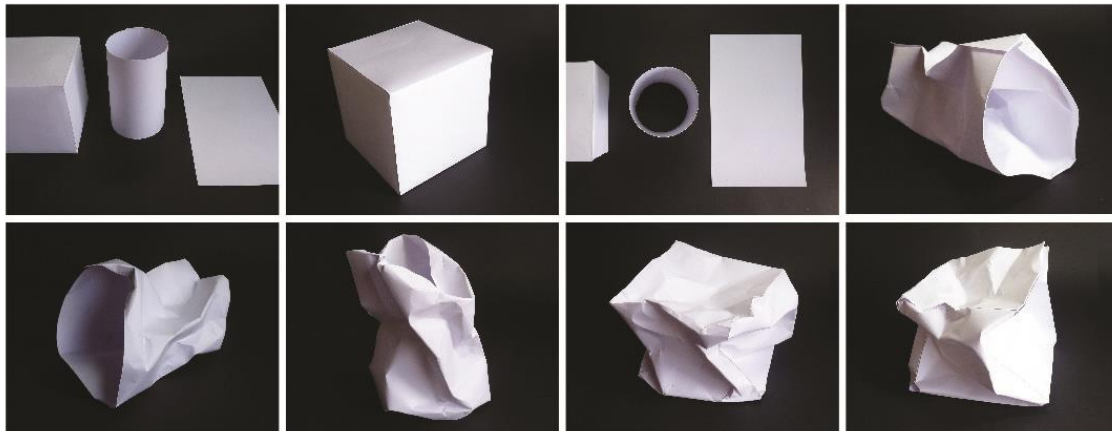


18 Técnica: Arrugas y papel

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Deconstruir	Láminas de papel, cartón y/o metal.	Arrugar para generar volumen	<p>A. DIMENSIONES DEL PAPEL Grande Mediano Pequeño</p> <p>B. CALIBRE DEL PAPEL Grueso Medio Delgado</p> <p>C. TAMAÑO DE ARISTAS Grandes Medianas Pequeñas</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\sigma_1 = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \quad (1)$		Superficies continua tridimensional		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>σ =Tensión principal E =Módulo de Young ϵ =Tensiones ν =Coeficiente Poisson</p>	<p>(Attar, et al., 2009) (Kumar & Chani, 2017) (Magnenat-Thalmann, 2002)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

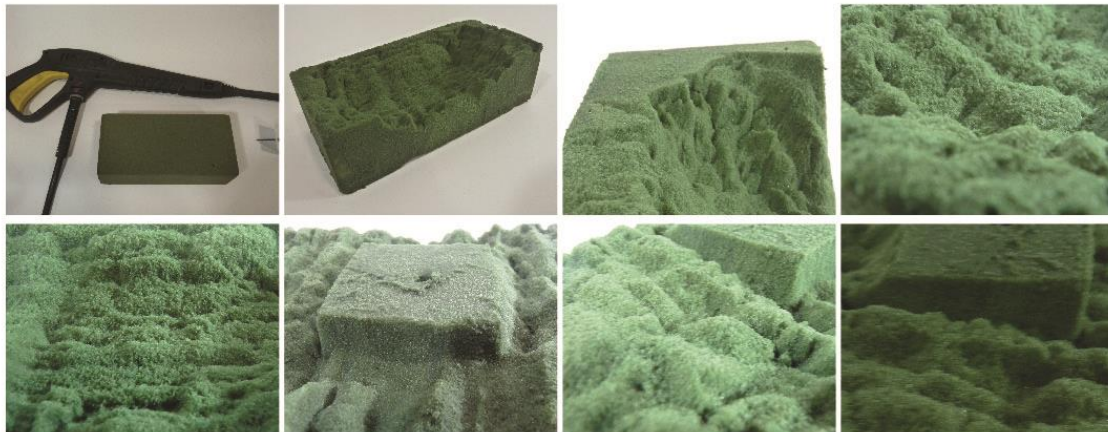


19 Técnica: Formas erosionadas

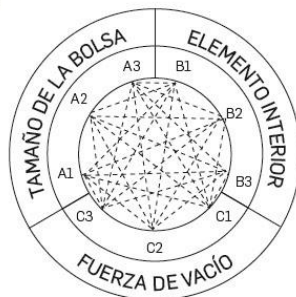

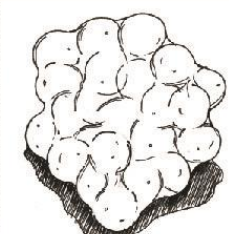
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Deconstruir	Espuma de floristería, hidrolavadora	Corrosión por fricción	<p>A. FUERZA (PSI) Alta Mediana Pequeña</p> <p>B. TIEMPO Mucho Medio Poco</p> <p>C. RESTRICCIONES Sin Cuadrados Círculos</p>	
Ecuación del proceso asociado	Salida			
$q_s = A \cdot \Omega_e^B$ (1)	Superficie irregular corroída			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>q_s = Descarga sedimentos</p> <p>A, B = Condiciones de flujo y sedimento</p> <p>Ω_e = Variable efectiva</p>	<p>(De Micoli, S., Rinderspacher, K., & Menges, A. 2018) (Shih, Yang & Velleux, 2006)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño



20 Técnica: Formas por vacío

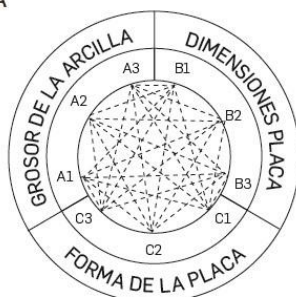
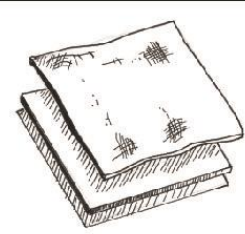

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Deconstruir	Bombas, pelotas, bolsa de polietileno, aspiradora	Vacío	<p>A. TAMAÑO DE LA BOLSA Grande Mediana Pequeña</p> <p>B. ELEMENTO INTERIOR Esferas Listones Objetos</p> <p>C. FUERZA DE VACÍO Alta Media Baja</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
	$q_L = C_L \Delta p^n$ (1)	Volúmen orgánico	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>q_L = fuga volumen de aire C_L = coeficiente de fuga Δp = diferencia de presión n = flujo de aire</p>	<p>(Huijben & Van Herwijnen, 2007) (Carrie & Wouters, 2012)</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: Juliana Vélez

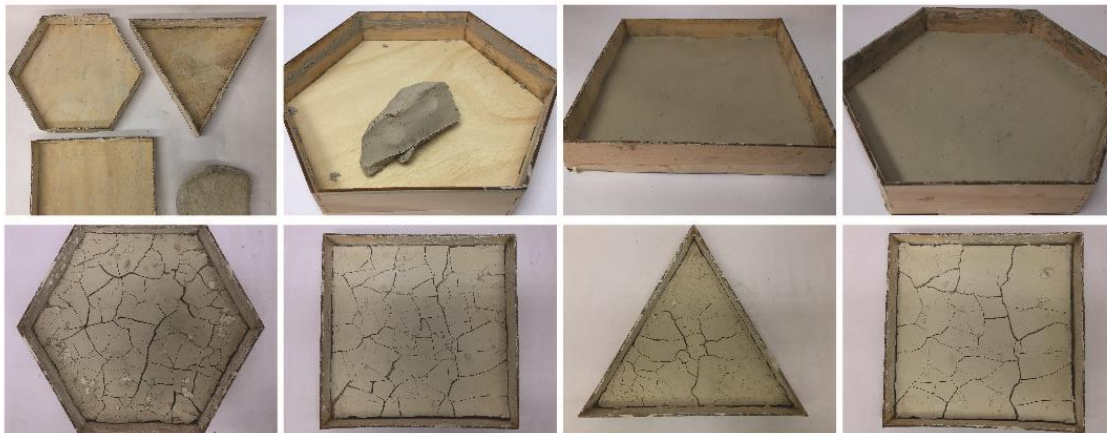


21 Técnica: Grietas por resequedad

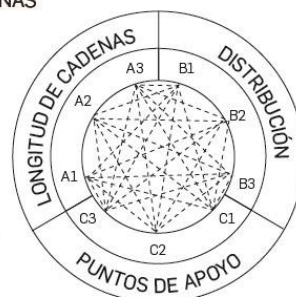

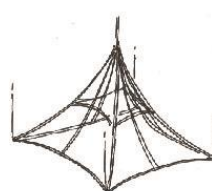
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Deconstruir	Arcilla, superficie de madera o plástico	Fractura por secado irregular	<p>A. GROSOR DE LA ARCILLA Grande Mediana Pequeña</p> <p>B. DIMENSIONES PLACA Grande Mediana Pequeña</p> <p>C. FORMA DE LA PLACA Triángulo Hexágono Cuadrado</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$K = \sigma_a \sqrt{\pi a}$ (1)		Redes irregulares	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>K = factor de tensión σ_a = tensión lejos de grieta a = Longitud semi-grieta</p>	<p>(Gaß, 2016) (Mínguez, 1994)</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo

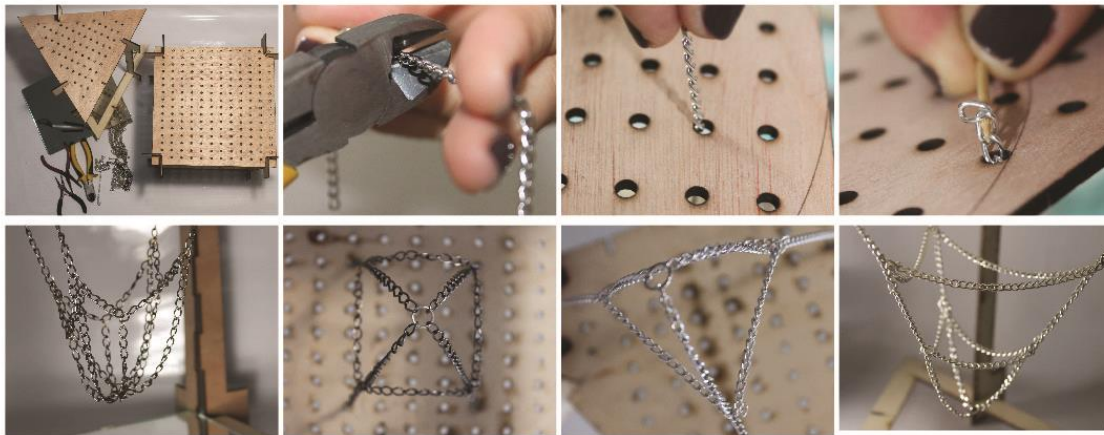


22 Técnica: Cadenas suspendidas y gravedad

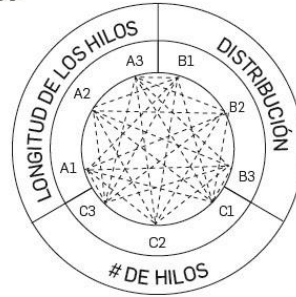
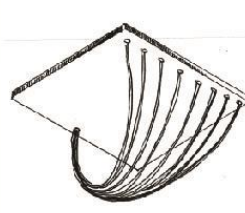
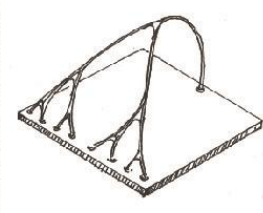
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Tensionar	Cadenas suspendidas, marco	Gravedad y curvas funiculares	<p>A. LONGITUD DE LAS CADENAS Grande Mediana Pequeña</p> <p>B. DISTRIBUCIÓN Cuadrado Circular Desordenado</p> <p>C. PUNTOS DE APOYO 3 5 6 o más</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
		Geometría de formas suspendidas	
$E_4(c_j, s_j^{ab}, t_j^a X^a, X^b, F^a) = 0 \quad (1)$			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p><i>E</i> =equilibrio <i>c</i> =catenaria <i>s</i> =longitud <i>t</i> =tensión <i>j</i> =cable <i>X</i> =coordenadas <i>F</i> =cargas externas <i>a, b</i> =nodos</p>	<p>(Jannasch, 2016) (Otto & Rasch, 2001) (Such, et. al., 2009)</p>		

Registro fotográfico

Fotografías: Valeria Londoño



23 Técnica: Sistemas de vías optimizadas

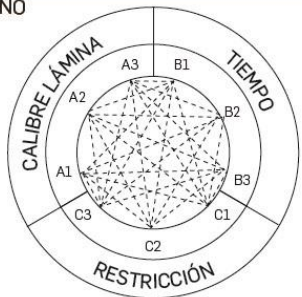
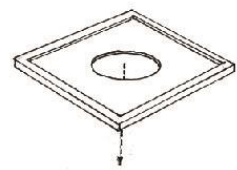
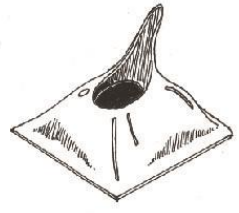
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Agua, jabón, cordones o hilos, marcos	Capilaridad	<p>A. LONGITUD DE LOS HILOS Grandes Medianos Pequeños</p> <p>B. DISTRIBUCIÓN Cuadrado Circular Desordenado</p> <p>C. # DE HILOS Muchos Medios Pocos</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$E_4(c_j, s_j^{ab}, t_j^a X^a, X^b, F^a) = 0 \quad (1)$		Estructuras ramificadas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>E =equilibrio c =catenaria s =longitud t =tensión j =cable X =coordenadas F =cargas externas a, b =nodos</p>	<p>(Otto & Rasch, 2001) (Lopes, et al. 2014) (Schaur, 1992) (Dickson, 2003) (Such, et. al., 2009)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Valeria Londoño

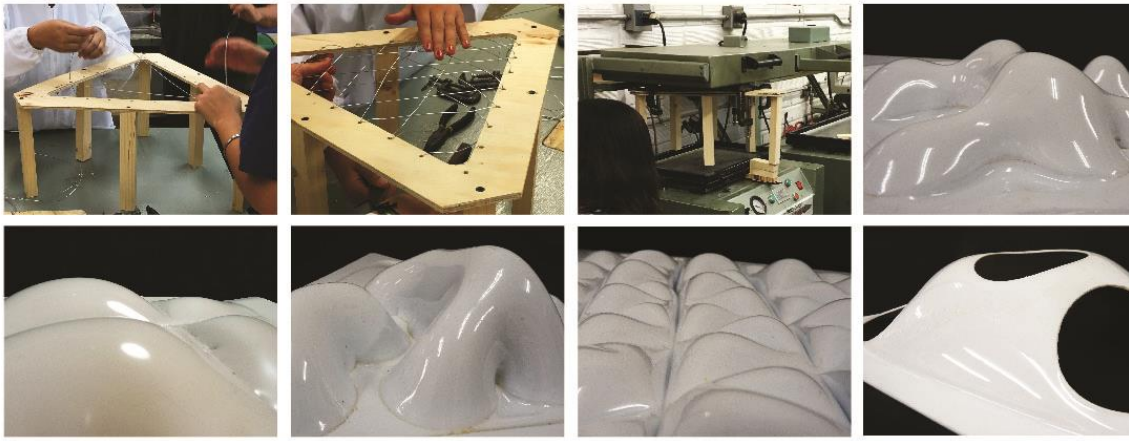


24 Técnica: Películas plásticas y gravedad

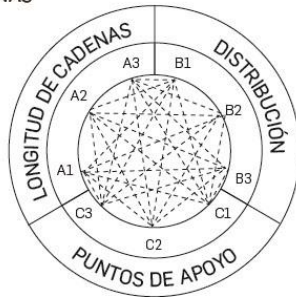


Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Láminas plásticas, restricciones rígida y calor	Gravedad y estado plástico	<p>A. CALIBRE POLIESTIRENO Grande (3mm) Mediano (2mm) Pequeño (1mm)</p> <p>B. TIEMPO Alto (2.30min) Medio (2 min) Bajo (1.30 min)</p> <p>C. RESTRICCIÓN Líneas simétricas Líneas asimétricas Perforaciones</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$E_4(c_j, s_j^{ab}, t_j^a, X^a, X^b, F^a) = 0 \quad (1)$		Dobles curvaturas positivas y negativas que generan curvas catenarias y superficies orgánicas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>E=equilibrio c=catenaria s=longitud t=tensión j=cable X=coordenadas F=cargas externas a=nodo b=nodo</p>	<p>(Arbeláez & Patiño, 2010 (Such, et. al., 2009)*</p>	<p>Punto de calor → *</p> 		

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño y José Agudelo



25 Técnica: Mallas suspendidas para invertir estructuras

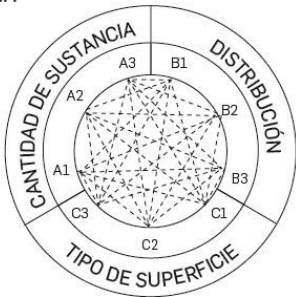

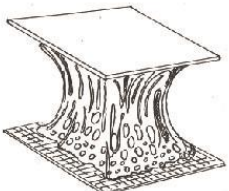
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Mallas suspendidas	Gravedad y curvas funiculares	<p>A. LONGITUD DE LAS CADENAS Grandes Medianas Pequeñas</p> <p>B. DISTRIBUCIÓN Cuadrado Circular Desordenado</p> <p>C. PUNTOS DE APOYO Muchos Medios Pocos</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$E_4(c_j, s_j^{ab}, t_j^a X^a, X^b, F^a) = 0 \quad (1)$		Dobles curvaturas positivas reticuladas con catenarias		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>E =equilibrio c =catenaria s =longitud t =tensión j =cable X =coordenadas F =cargas externas a, b =nodos</p>	<p>(Jannasch, 2016) (Otto & Rasch, 2001) (Such, et. al., 2009)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño



26 Técnica: Sustancias viscosas y tensión


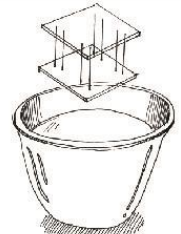
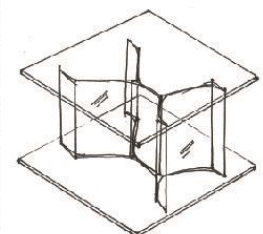
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Mallas, superficies rígidas, XL (pega amarilla)	Viscosidad y capilaridad de los líquidos	<p>A. CANTIDAD DE SUSTANCIA Mucha Media Poca</p> <p>B. DISTRIBUCIÓN En mallas En líneas En círculos</p> <p>C. TIPO DE SUPERFICIE Lisa Malla Rugosa</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (1)$		Superficies con arcos, ramificaciones y espumas.		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>γ =tensión superficial Δp =diferencia de presión R =radio de curvatura</p>	<p>(Arbeláez & Patiño, 2010) (de Gennes, Brochard-Wyart & Quere, 2004)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Valeria Londoño

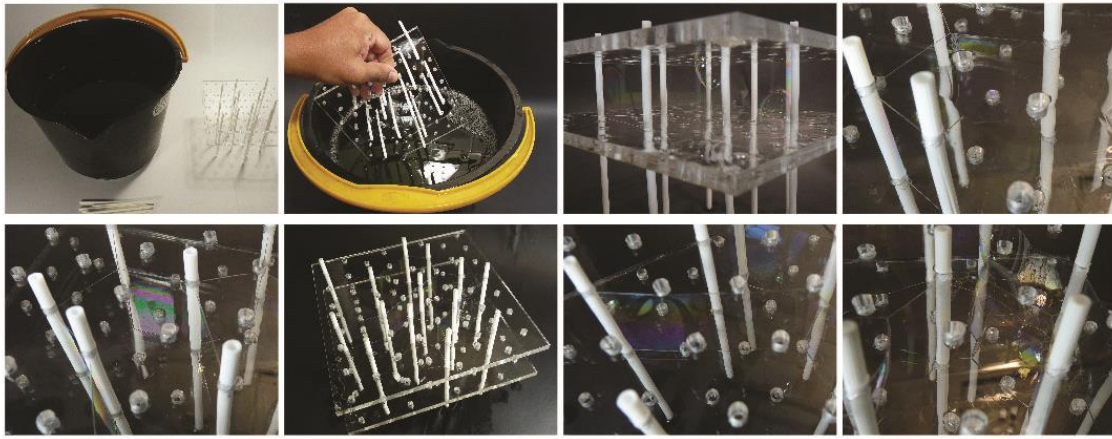


27 Técnica: Jabón y sistemas de trayectoria mínima

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Tensionar	Barras perpendiculares a dos superficies, agua jabonosa	Tensión superficial	<p>A. DISTRIBUCIÓN DE BARRAS En línea En redes En desorden</p> <p>B. DENSIDAD DEL JABÓN Muy denso Denso Poco denso</p> <p>C. NÚMERO DE BARRAS Pocas Intermedias Muchas</p> 
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (1)$		Teselación de paredes de películas jabonosas con 120°	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
γ =tensión superficial Δp =diferencia de presión R =radio de curvatura	(Lopes, et al., 2014) (Otto, 1971) (Otto, 2011) (Marder, 1987) (de Gennes, Brochard-Wyart & Quere, 2004)		

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

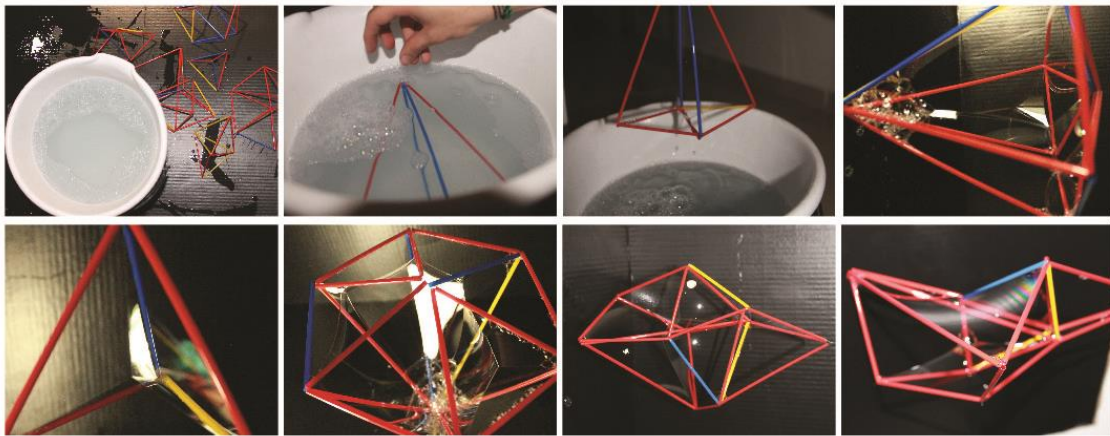


28 Técnica: Películas de jabón y superficies mínimas

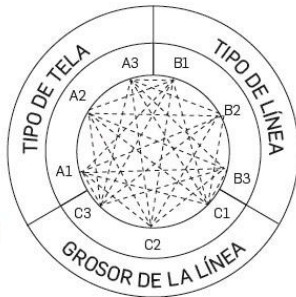
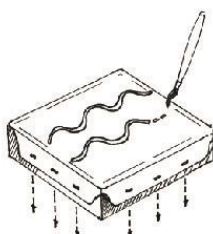
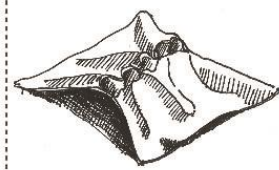
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Agua, jabón líquido, restricciones y marco tensor	Relajación dinámica. Tensión superficial homogénea	<p>A. TIPO DE MARCO Cubo Octaedro Otro poliedro</p> <p>B. DENSIDAD DEL JABÓN Muy denso Denso Poco denso</p> <p>C. TIPO DE RESTRICCIÓN Cuerdas Líneas rectas Líneas curvas</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (1)$		Superficies mínimas de doble curvatura negativa, con tensiones equilibradas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
γ =tensión superficial Δp =diferencia de presión R =radio de curvatura	(Bletzinger, 1998) (Bletzinger, 2001) (Otto, 2011) (Beatini, et al., 2016) (Ahlquist & Menges, 2012) (Veenendaal, 2012) (Rumberger & Lienhard, 2018) (de Gennes, Brochard-Wyart & Quere, 2004)			

Registro fotográfico

Fotografías: Valeria Londoño



29 Técnica: Membranas pretensadas y curvatura

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Membrana elástica, líneas de fuerza (resina)	Distribución no homogénea del material	<p>A. TIPO DE TELA Elasticidad al 100% Elasticidad al 80% Elasticidad al 40%</p> <p>B. TIPO DE LÍNEA Rectas Curvas Sinuosas</p> <p>C. GROSOR DE LA LÍNEA Muy gruesa Gruesa Delgada</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$E_x = \frac{A_x}{i_x s} E, \quad E_y = \frac{A_y}{i_y s} E, \quad (1)$		Membrana con curvatura		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>E =Módulo de Young s =Grosor A =Área de cable i =Distancia axial x =Ejes</p>	<p>(Oxman & Rosenberg, 2007) (Ahlquist, 2014) (Ahlquist & Planning, 2014) (Beatini & Royer-Carfagni, 2016)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Camila Aguirre

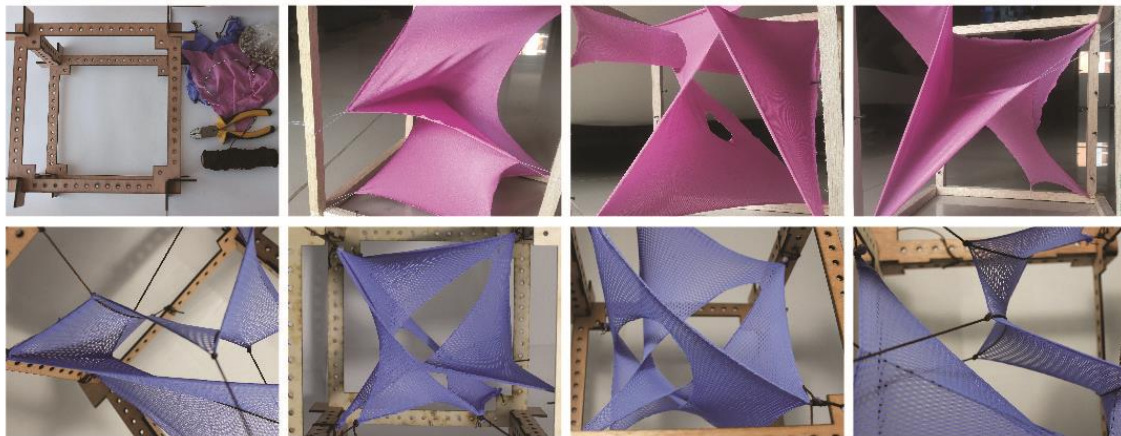


30 Técnica: Membranas tensadas


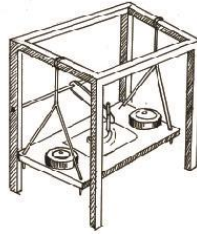
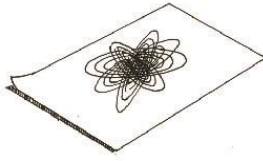
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Estructura tensada, fibra de vidrio y resina de poliéster.	Equilibrio de tensión	<p>A. TIPO DE TELA Elasticidad al 100% Elasticidad al 80% Elasticidad al 40%</p> <p>B. TIPO DE MARCO Cubo Marcos Arcos</p> <p>C. FORMA DE LA TELA Cuadrada Pentagonal Hexagonal</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$E_x = \frac{A_x}{i_x s} E, \quad E_y = \frac{A_y}{i_y s} E, \quad (1)$		Doble curvatura negativa		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>E =Módulo de Young s =Grosor A =Área de cable i =Distancia axial x =Ejes</p>	<p>(Arbeláez & Patiño, 2010) (Sierra & Patiño, 2005) (Rumberger & Lienhard, 2018) (Beatini & Royer-Carfagni, 2016)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Valeria Londoño

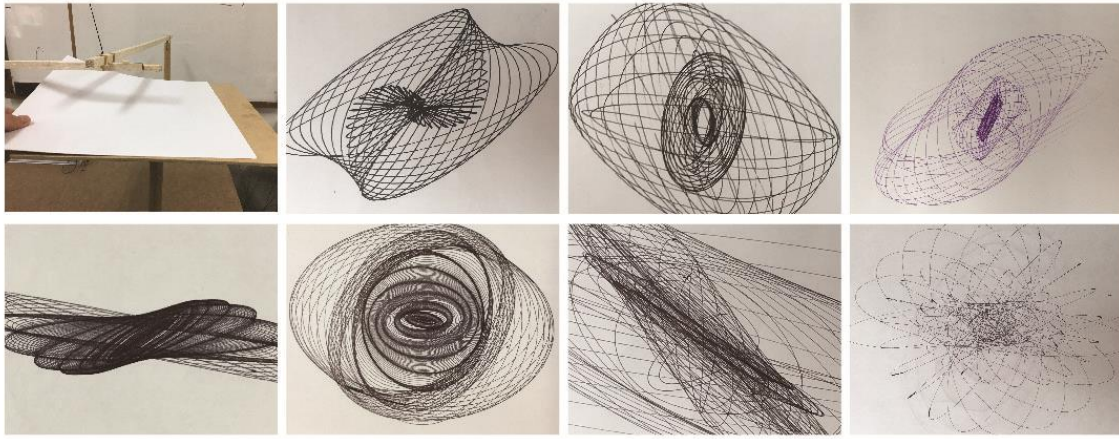


31 Técnica: Armonógrafo

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Tensionar	Papel, pincel, pintura, marco y péndulos	Movimiento pendular y gravedad	<p>A. NÚMERO DE PÉNDULOS Muy pocos 1 Pocos 2 Muchos 3</p> <p>B. LARGO PÉNDULOS Muy largo Largo Corto</p> <p>C. FUERZA DE ACCIONAMIENTO Muy fuerte Fuerte Débil</p> 	
Ecuación del proceso asociado	Salida			
$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j A_j \cos(\omega_j t + \Phi_j) \quad (1)$	Curvas de Lissajous			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>x =Movimiento ω =Frecuencias propias ϕ =Fases iniciales A =Vibración C =Amplitudes relativas n =Grados de libertad t =tiempo</p>	<p>(Pickover, 2009) (Feynman, Leighton, & Sands, 1987)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo

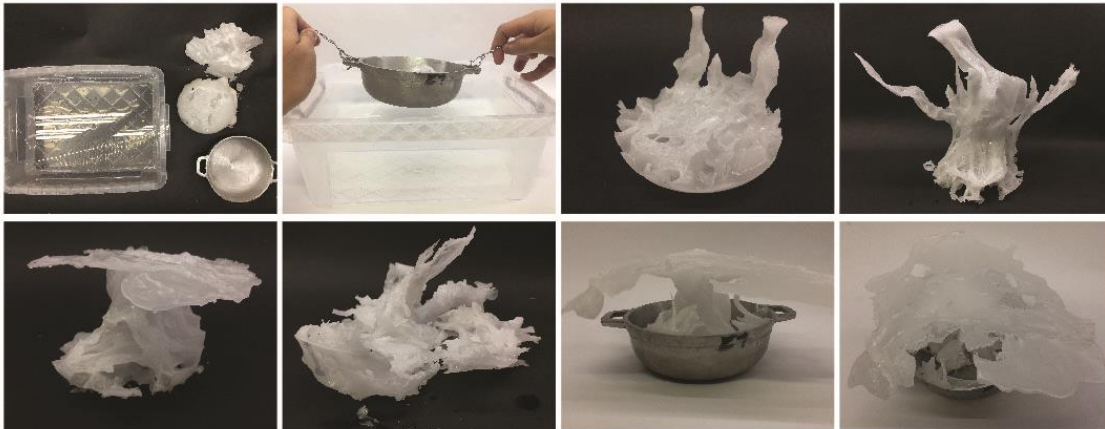


32 Técnica: Solidificación de cera y agua


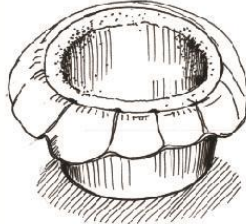
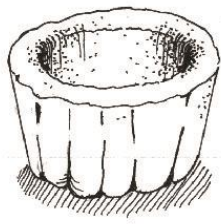
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Solidificar	Cera caliente en recipiente y agua fría.	Turbulencias y solidificación por temperatura	<p>A. VOLUMEN DE CERA Mucho Intermedio Poco</p> <p>B. DIRECCIÓN DE INMERSIÓN Recto perpendicular Recto oblicuo En espiral</p> <p>C. VELOCIDAD DE INMERSIÓN Alta Media Baja</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
		Geometría de turbulencias		
		$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v + 4\pi r^2 \sigma \quad (1)$		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
ΔG = Variación total energía libre r = Radio Δg_v = Volumen σ = energía superficial	(Arbeláez & Patiño, 2010) (Askeland, 1998)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo



33 Técnica: Moldes flexibles y concreto



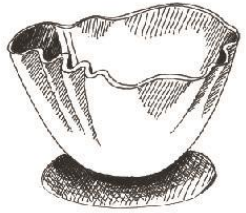
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Solidificar	Concreto, tela polimérica, contenedor	Solidificación y copia	<p>A. TIPO DE CONTENEDOR Cilíndrico Cúbico Irregular</p> <p>B. TIPO DE TELA Lisa Con textura Elástica</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN DE LA TELA Ordenada Pocas arrugas Muchas arrugas</p> 	
Ecuación del proceso asociado	Salida			
$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad (1)$	Superficie irregular curva			
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
ΔG = Variación total energía libre r = Radio Δg_v = Volumen σ = energía superficial	(Manelius, 2012) (CONCRETECANVAS, 2015) (Askeland, 1998)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo



34 Técnica: Impresora de cerámica catenaria

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Solidificar	Membrana elástica con cerámica líquida	Elásticidad, gravedad y solidificación de cerámica	<p>A. TIPO DE TELA Muy elástica Elástica Poco elástica</p> <p>B. # DE APOYOS Muchos Pocos Muy pocos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN DE APOYOS En cuadrado En pentágono En diferentes planos</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v + 4\pi r^2 \sigma \quad (1)$		Cuencos de dobles curvaturas.		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
ΔG = Variación total energía libre r = Radio Δg_v = Volumen σ = energía superficial	(GT2P, 2015) (Askeland, 1998)			

Registro fotográfico

Fotografías: José Agudelo

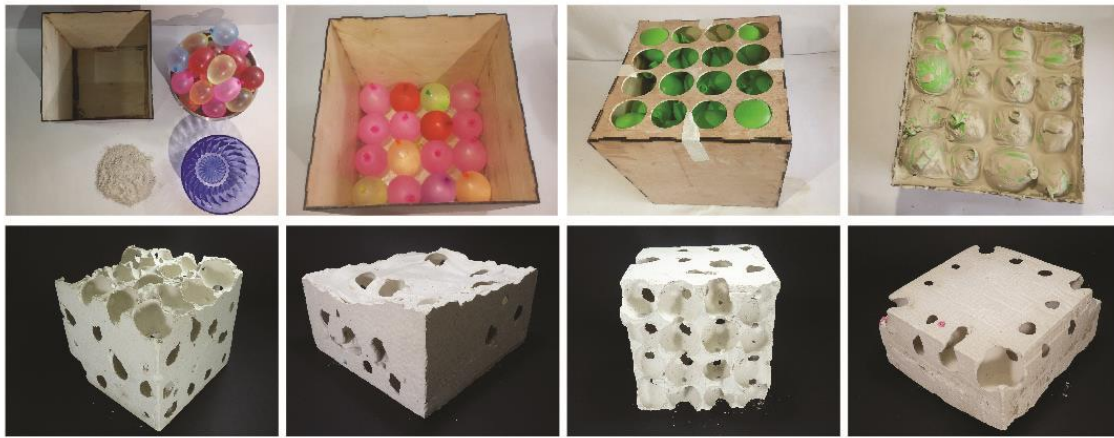


35 Técnica: Espacios porosos y yeso


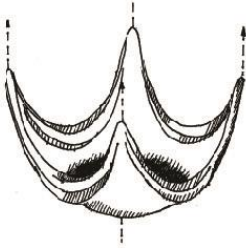

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Solidificar	Yeso, contenedor, globos de látex con agua.	Espacios llenos y vacíos	<p>A. VOLUMEN DEL CUBO Muy grande Grande Pequeño</p> <p>B. # DE GLOBOS Muchos Pocos Muy pocos</p> <p>C. DIMENSIÓN DE LOS GLOBOS Muy grandes Grandes Pequeños</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad (1)$		Sólido poroso		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
ΔG = Variación total energía libre r = Radio Δg_v = Volumen σ = energía superficial	(Agkathidis, 2013) (Sanchiz, 2008) (Baker, 2004) (Askeland, 1998)			

Registro fotográfico

Fotografías: Juliana Vélez y Ever Patiño



36 Técnica: Invertir formas de yeso suspendidas


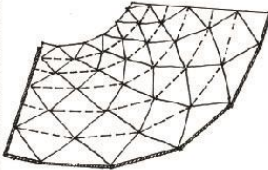
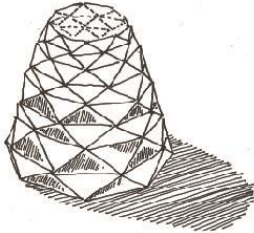
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Solidificar	Vendas de yeso	Gravedad y curvas funiculares	<p>A. DIMENSIÓN DE LA TELA Muy grande Grande Pequeña</p> <p>B. # DE APOYOS Muchos Pocos Muy pocos</p> <p>C. DISTRIBUCIÓN DE APOYOS En cuadrado En pentagonos En diferentes planos</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad (1)$		Formas de doble curvatura invertidas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
ΔG =Variación total energía libre r =Radio Δg_v =Volumen σ =energía superficial	(Bletzinger, et al., 2005) (Bletzinger & Ramm, 2001) (Jannasch, 2016) (Dickson, 2003) (Askeland, 1998)			

Registro fotográfico

Fotografías: Juliana Vélez y Ever Patiño

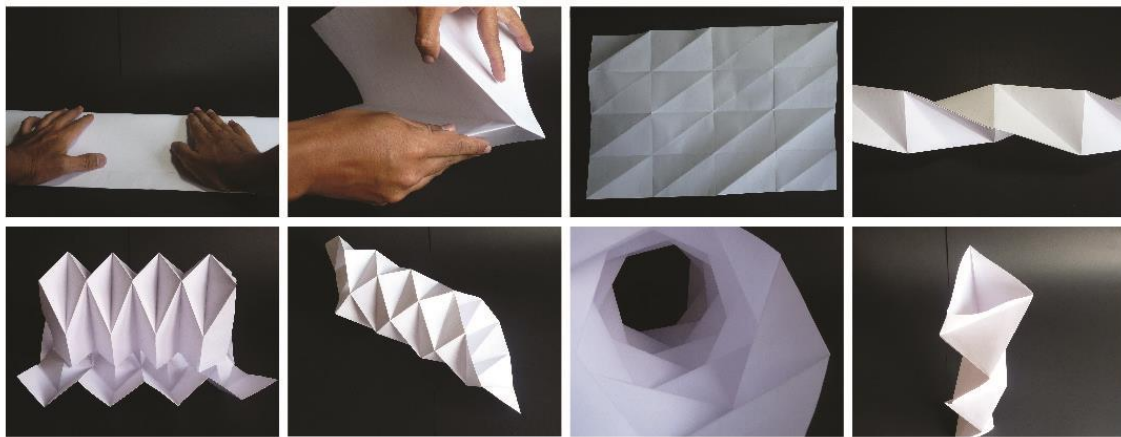


37 Técnica: Plegados con patrón yoshimura

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Doblar	Láminas de papel, cartón y metal; trapecio con diagonal	Doblar una lámina sin cortes, a partir de un patrón	<p>A. NÚMERO DE MÓDULOS Muy pocos Pocos Muchos</p> <p>B. TAMAÑO DE LOS MÓDULOS Muy grandes Grandes Pequeños</p> <p>C. ÁNGULO DE DOBLEZ Agudo Recto Obtuso</p> 	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\alpha = \pi(n - 2)/(2n) \quad (1)$		Superficies continua tridimensional		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
α =Ángulo de la diagonal de los rectángulos. n =# de rectángulos	(Iwamoto, 2013) (Nabaei, et al., 2013) (Yacizi, 2011) (Sorguç, et al. 2009) (Gerber, 2012) (Rodríguez, et al.,2006) (Belcastro & Veenstra, 2009)			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

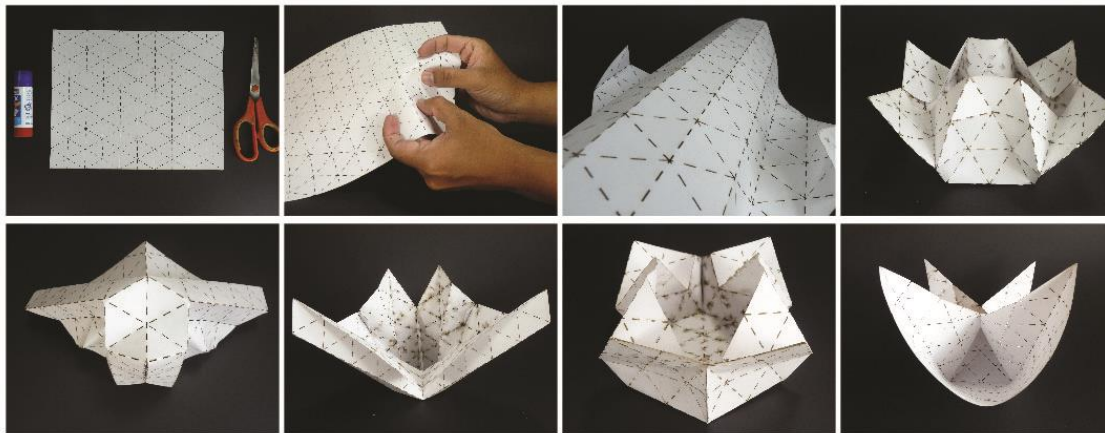


38 Técnica: Plegados con patrón triangular regular

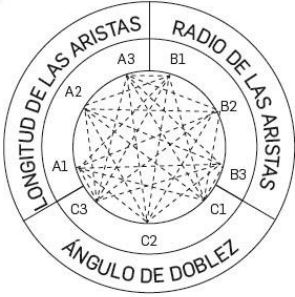

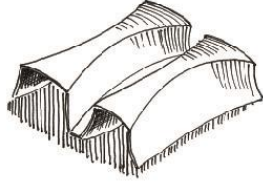
Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Doblar	Láminas de papel, cartón y metal grafadas con triángulos	Doblar una lámina sin cortes, a partir de un patrón	<p>A. NÚMERO DE MÓDULOS</p> <p>Muy pocos Pocos Muchos</p>	
Ecuación del proceso asociado	Salida	<p>B. TAMAÑO DE LOS MÓDULOS</p> <p>Muy grandes Grandes Pequeños</p>		
$u(x,y) = \left(x, \frac{y}{\sqrt{2}}, \frac{y}{\sqrt{2}}\right) \quad (1)$	Superficies continua tridimensional	<p>C. ÁNGULO DE DOBLEZ</p> <p>Agudo Recto Obtuso</p>		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
<p>u =Superficie x,y=coordenadas</p>	<p>(Agkathidis, 2013) (Rocha, 2000) (Dacorogna, Marcellini & Paolini, 2010)</p>			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

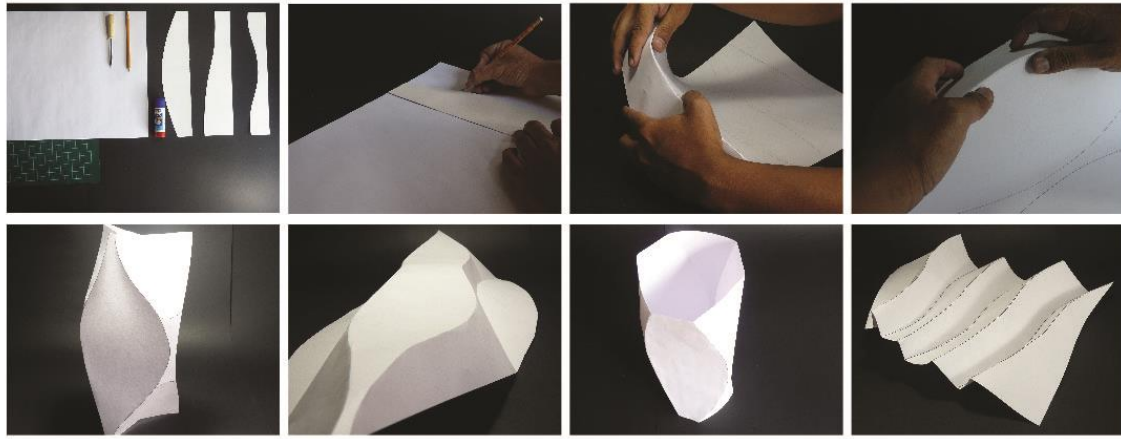


39 Técnica: Plegados curvos

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación	
Doblar	Láminas de papel, cartón y metal; secciones curvas	Doblar una lámina sin cortes, a partir de línea de doblez curvas.	<p>A. LONGITUD DE LAS ARISTAS Muy grandes Grandes Pequeñas</p> <p>B. RADIO DE LAS ARISTAS Muy grandes Grandes Pequeños</p> <p>C. ÁNGULO DE DOBLEZ Agudo Recto Obtuso</p>	
Ecuación del proceso asociado		Salida		
$\frac{da}{dx} = \frac{\tan(\alpha(x))}{2 \cdot \frac{dx}{ds}} K_{2D}(x) \cdot (\cot\beta_L(x) - \cot\beta_R(x)) \quad (1)$		Superficies continua tridimensional con dobles curvaturas		
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado	
α =Ángulo de doblez x =longitud superficie K = curvatura arista β =Ángulo entre la línea tangente a la curva y las líneas que se hacen luego del doblez.	(Rodríguez, et al.,2006) (Miyashita, 2015)			

Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño

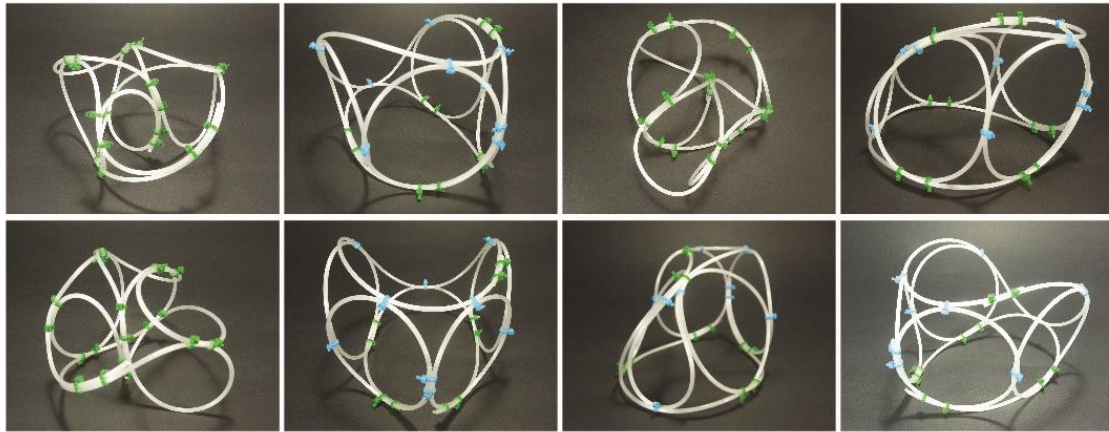


40 Técnica: Cintas y listones de doblado activo

Grupo	Entrada	Proceso o regla	Posibles variables de experimentación
Doblar	Cintas o listones de madera contrachapada, de fibra de vidrio o carbono	Deformación elástica para optimizar la rigidez (Dynamic relaxation)	<p>A. LONGITUD DE LAS CINTAS Muy grandes Grandes Pequeñas</p> <p>B. SECCIÓN DE LAS CINTAS Muy grandes Grandes Pequeñas</p> <p>C. ÁNGULO DE DOBLEZ Agudo Recto Obtuso</p>
Ecuación del proceso asociado		Salida	
$(\underline{K}_e + \underline{K}_u + \underline{K}_g) \cdot \underline{u} = \underline{F} \quad (1)$		Superficies curvas rígidas	
Nomenclatura	Referencias	Diagrama del proceso	Diagrama del resultado
<p>F =Fuerza u =Distancia K_e =Rigidez elástica K_r =Matriz de rigidez K_g =Rigidez geométrica</p>	<p>(Deleuran, 2011) (Lienhard, 2014) (Bletzinger, et al.,2001) (Nabaei, et al., 2013) (Fleischmann, 2012) (Pone, et al., 2013) (De Rycke et al., 2018) (Fuller,1982) (Lienhard, et al., 2013) (Lienhard & Knippers, 2013)</p>		

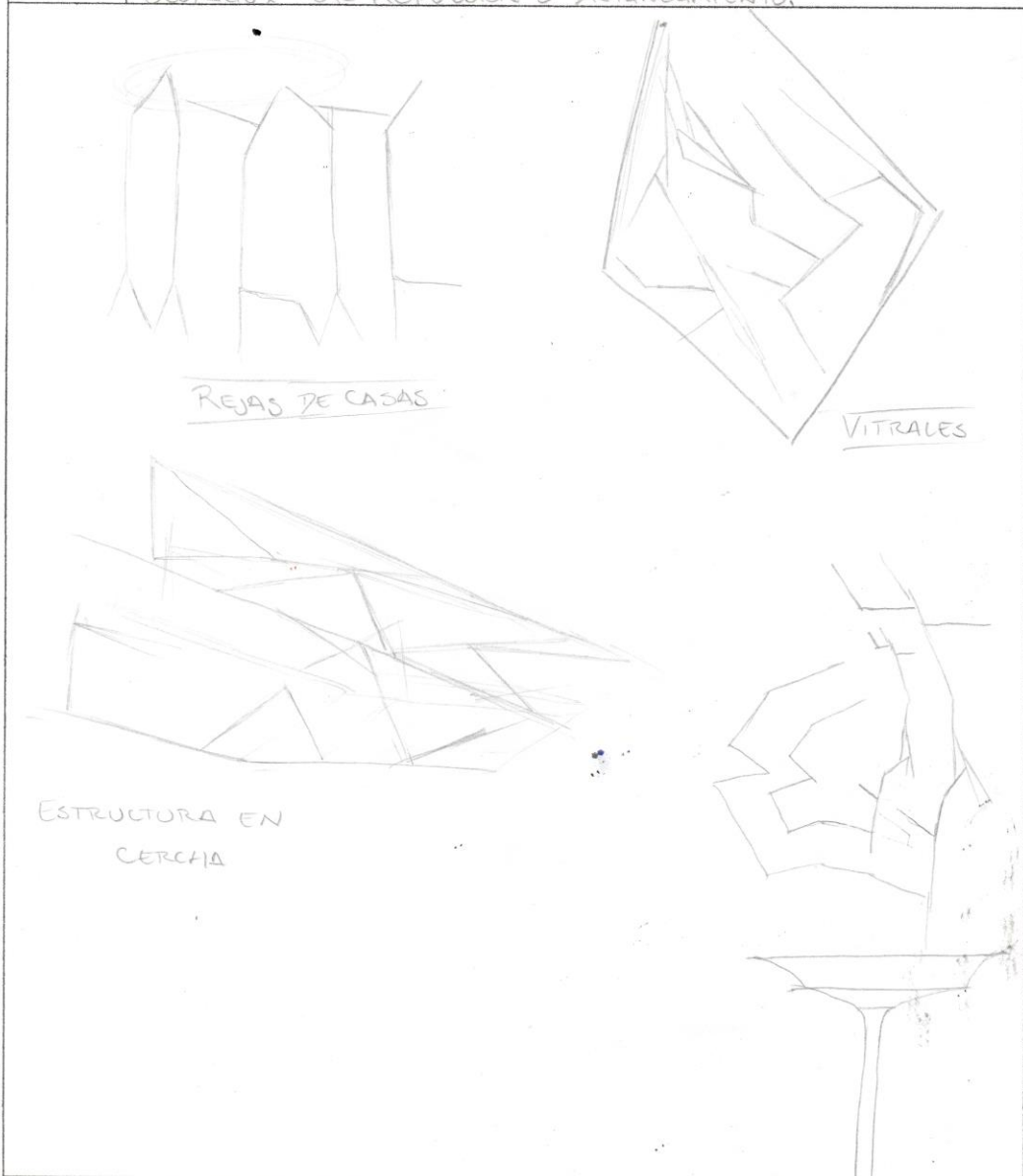
Registro fotográfico

Fotografías: Ever Patiño



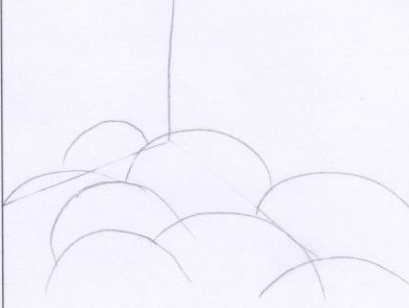
ANEXO 2

Bocetos desarrollados para algunas técnicas. Para ver la totalidad de los bocetos se pueden comunicar con el autor.

Investigador:	JOSÉ MANUEL AGUDELO TORO
Técnica:	Ocupación por repulsión o distanciamiento.
	

Investigador:	Julianna Velez
Técnica:	Formas por variación

- Interiorismo



Pisos
Paredes
Techos
↓
De lugares
recreativos
Aprovechando
su naturaleza
orgánica y
apariciencia
acolchada.

- Vestuario



Bolsos cuya
textura, ya sea
táctil o solo
visual, la
simulen.

- Mueblario



Puffs
o sillas con
cajinería o
incluso la
estructura

- Juguetes

su posibilidad de
ser blando, permite
poder usarlos en el
diseño de juguetes
infantiles



Además
usando
geometrías más
curvas dan una
apariciencia
cómoda y
segura.

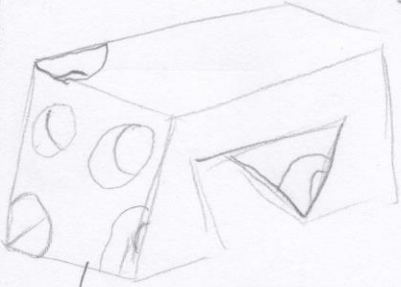
- luminaria



lamparas
decorativas
para interior
de noche
- las formas que
crea pueden hacer
reflejos interesantes.
Además, es fácil
jugar con el color.

Investigador:	Juliana Velez
Técnica:	Espacios porosos

- Mov. urbano



Crear concepto en el espacio urbano.

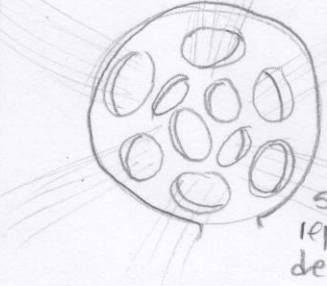
Aprovechar la técnica en la fabricación de mov en concreto.

- Elementos decorativos

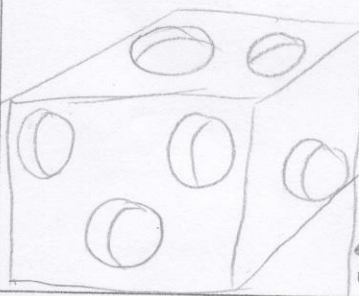


la técnica aporta estética que se puede aprovechar en la ambientación de espacios

Luminaria



la forma hueca que aporta la forma y todos sus orificios de salida generarían reflejos y proyecciones de la luz.



Juguete para gatos aprovechando los espacios y caminos que se crean en el interior de la estructura

ANEXO 3

Ejemplo del instrumento lleno de la exploración empírica de las técnicas.

EXPLORACIÓN TÉCNICAS DE FORM-FINDING



INFORMACIÓN GENERAL	
Investigador:	Valeria Londoño Orozco
Fecha:	Viernes, 23 de Marzo del 2018
Técnica:	25. Mallas suspendidas para invertir estructuras
Nombres de los archivos:	cadena suspendida

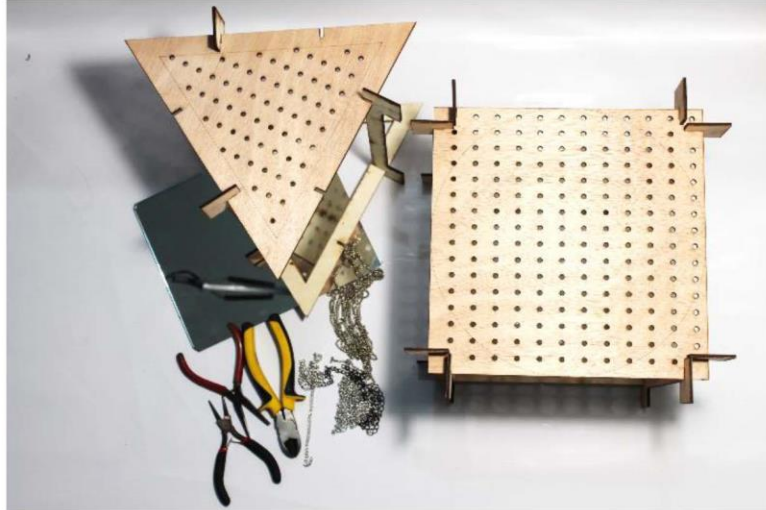
DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES	
ENTRADAS	
Materiales y herramientas que se mantienen constantes	Cadenas metálicas, marco donde se van a suspender, corta-frio, alicate o pinza para joyería, cámara fotográfica, madera triplex.
PROCESO	
Variable A	Cantidad de cadenas
Variable A1	5
Variable A2	8
Variable A3	10
Variable B	Forma de techo
Variable B1	Triangular
Variable B2	Circular
Variable B3	Cuadrada
Variable C	Grosor de cadena
Variable C1	Delgada - pequeña
Variable C2	Mediana
Variable C3	Grande
SALIDAS	
Descripción geométrica de los resultados	<p>Las cadenas al ser suspendidas adquieren una forma de arco o triangulo invertido, el punto medio puede ser más curvado o más marcado en punta según el peso del punto medio de cada cadena o según las cargas puntuales en diferentes partes de la cadena; este tipo de arco siempre intenta mantener un equilibrio transmitiendo cargas ya sean propias o provenientes de otros elementos. En esta técnica se logró evidenciar formas geométricas orgánicas compuestas por curvas y líneas rectas.</p> <p>Al armar con las cadenas la forma que se quiere lograr sin aun estar suspendidas o colgando, muestran unas formas no tan claras, desordenadas y muy diferentes a las que muestra cuando ya se suspenden del techo, se ven más claras y organizadas , pasando de algo plano (2D) a algo tridimensional o con relieve (3D) (línea recta a catenaria).</p> <p>El cambio de forma de techo no afecta en nada, simplemente limita.</p> <p>Pienso que se ve mucho mejor, más armónico, más delicado entre más delgada de cadena; pero todo esto también va depende del tamaño del espacio a ocupar.</p> <p>Las cadenas se tiemplan más se pueden generar vértices en vez de curvas que se generan cuando no se tiemplan, se dejan sueltas.</p>

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA	
NÚMERO DE EXPERIMENTOS	
10 experimentos	
ACCIONES POR EXPERIMENTO	
1. Armar estructura (Unir o encajar como rompecabezas)	
2. Cortar cadenas (La cantidad que se requiera)	
3. Unirlas por medio de una arandela (Abrir y cerrar arandela una vez se inserten las cadenas)	
4. Introducir los extremos de las cadenas por los huecos del techo de la estructura utilizada	
5. Asegurar la cadena que pasa por el techo, introduciendo por un ojal un pedazo de palillo.	
<i>Paso de 2 a 5 se repite varias veces según las estructuras que se deseen lograr (cambiante)</i>	
REGISTRO DEL TIEMPO / Minutos	
Consecución de materiales	120 minutos = 2 horas
Desarrollo del dispositivo	120 minutos = 2 horas
Experimentando	360 minutos = 6 horas
Registrando	120 minutos = 2 horas
Total	720 minutos= 12 horas
REGISTRO DE COSTOS / \$	
Cadenas	\$15.000
Madera triplex	\$10.000
Corte a laser	\$12.000
Arandelas de union	\$3.000
Alicata plano (joyeria)	\$16.000
Corta-frio	\$13.000
Total	\$69.000
OBSERVACIONES SOBRE LAS POSIBLES APLICACIONES	
Mobiliario, estructuras <i>arquitectónicas</i> (iglesias, museos, etc), objetos decorativos, recipientes, lámparas o sistema de iluminación, puentes, vestuario o moda, carpas, diseño de accesorios.	
OBSERVACIONES SOBRE LA FACILIDAD DE USO	
<ul style="list-style-type: none"> <li style="text-align: center;">- Toma tiempo unir las cadenas cuando son muy delgadas - Se me presento otro problema ya que pensé muy tarde con que iba a sujetar la cadena al techo del marco en cada extremo - Es un poco complicado saber que longitud de cadena utilizar porque muchas veces puede quedar tensionado o simplemente suelto - Hay que mantener un orden y una propuesta clara antes de empezar porque si no puede que se salga una forma no interesante y por el mismo desorden se te enreden las cadenas. - Algunas cadenas al manipularlas se me rompían con facilidad, ya que tenían un punto de unión abierto y era posible que pasara por el grosor. 	
DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS FÍSICOS ASOCIADOS	
Gravedad, peso, longitud de la catenaria, flexibilidad, masa, distancia, tensiones laterales.	

REGISTRO FOTOGRÁFICO

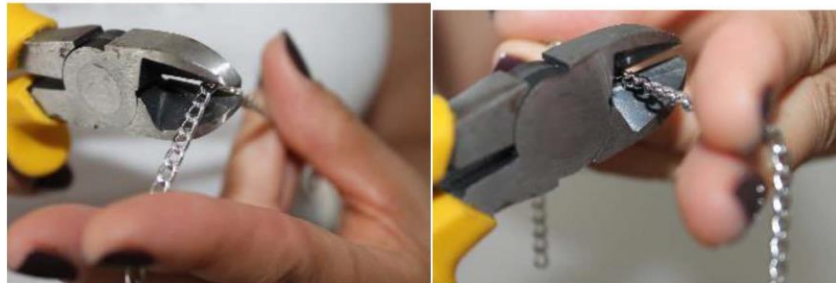
Registrar especialmente: Las entradas, el proceso y las salidas. Para ello utilizar una cartulina para hacer un fondo blanco sobre una mesa (ver imagen adjunta). En las entradas ubicar sobre la cartulina los materiales y fotografiarlos desde una vista superior (ver imagen adjunta).

ENTRADAS



Herramientas utilizadas para realizar la técnica asignada

PROCESO



Cortar la cadena del tamaño que se desee



*Unir las cadenas cortadas con una arandela
Para así poder hacer diferentes formas*



Introducir los extremos de las cadenas que suspenderan a los agujeros del techo de la estructura

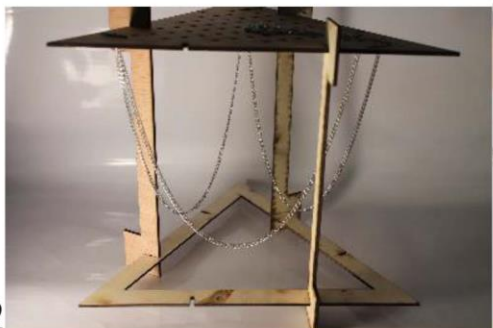


Asegurar la cadena por medio de palillos para que Esta se conserve allí y no se salga del agujero

SALIDAS



1



2



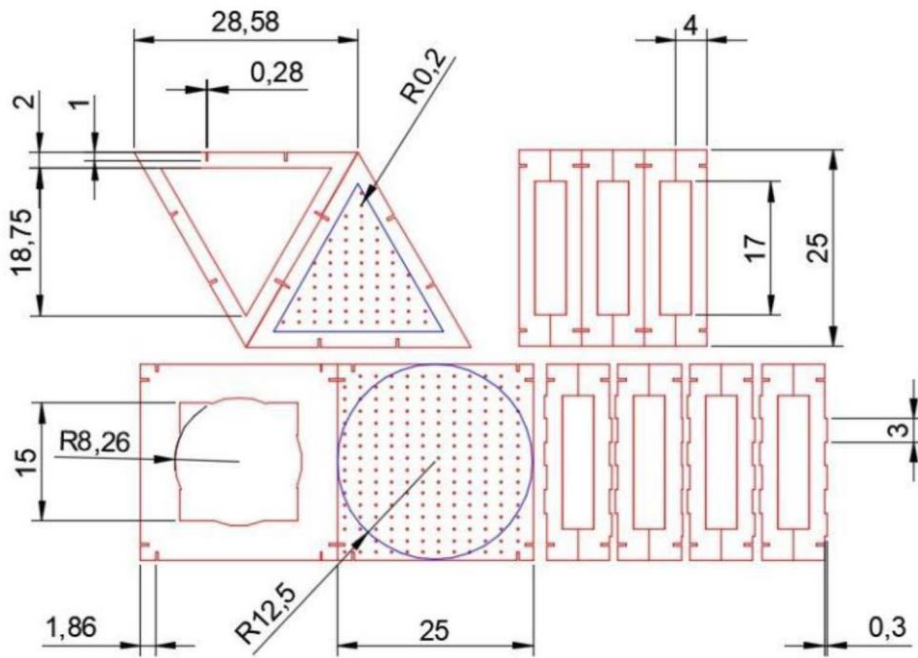
3



PLANOS O MODELO DIGITAL EN LÍNEAS DEL DISPOSITIVO

Insertar vistas de las piezas desarrolladas y/o del dispositivo. Si se utilizó Rhinoceros, exportar las vistas como Illustrator, abrir los archivos en AI, y guardarlos como pdf y como jpg.

Unidades de medida: Centímetros (cm)



ANEXO 4

Formato A para el consentimiento de manejo de datos y herramienta *Pick-A-Mood* (Desmet, Vastenburg & Romero, 2016).

FORMATO A

De acuerdo con la ley estatutaria 1581 de 2012 de protección de datos y sus normas reglamentarias, como titular de los datos, otorgo mi consentimiento previo, expreso, libre, e informado para que estos sean incorporados en una base de datos responsabilidad de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

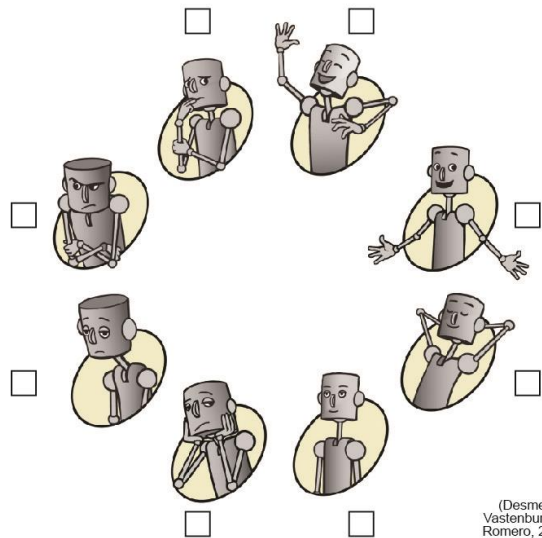
La finalidad del tratamiento de los datos será exclusivamente académica, respetando siempre y en todo momento los principios que enmarca las leyes Colombianas.

La información obtenida para el Tratamiento de mis datos personales la he suministrado de forma voluntaria y es verídica. Se firma en Medellín, el ____ de _____ de 2018.

Nombre del titular de los datos

Firma

Por favor marque con una X el estado de ánimo del personaje, con el que más se identifica en este momento. Puede marcar varias casillas.



(Desmet, Vastenburg, & Romero, 2016)

Por favor complete en las casillas los siguientes datos:

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Edad	Semestre	Promedio acumulado

ANEXO 5

Formato B de bocetación

FORMATO B

Nombre

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso,
función.

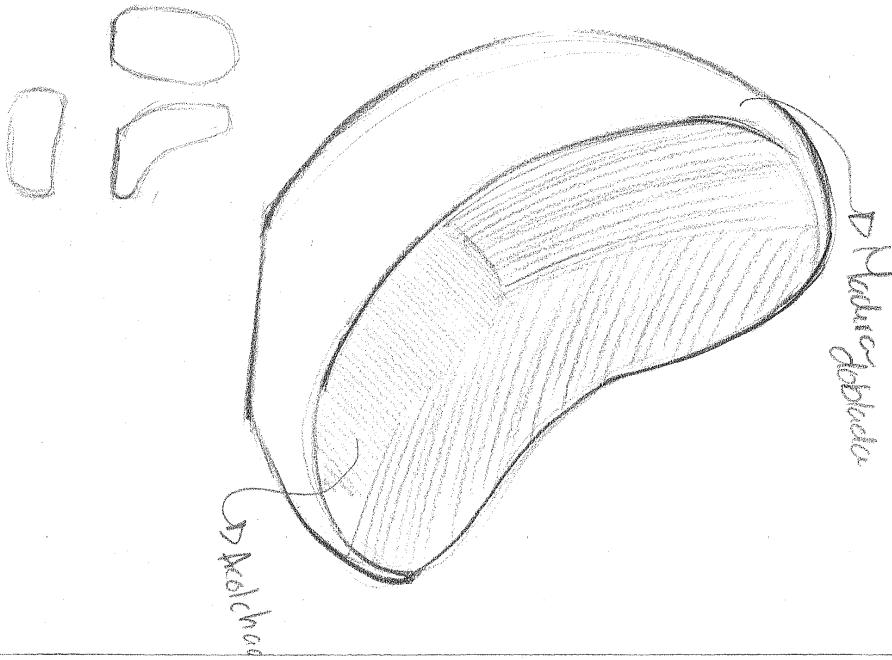
ANEXO 6

Algunos grupos de bocetos desarrollados por el GC y el GE. Para ver la totalidad de los bocetos se pueden comunicar con el autor.

FORMATO B

Nombre Luisa Mantoya Henao

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

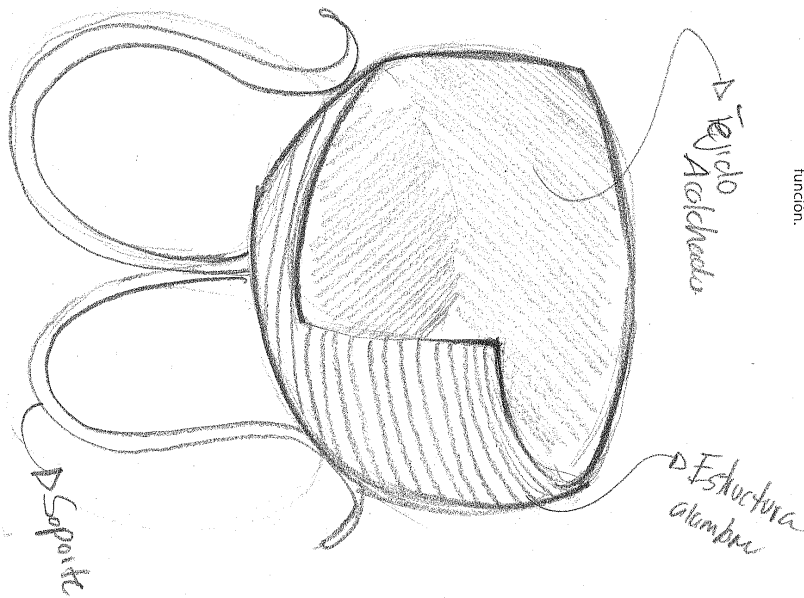


7 #1

FORMATO B

Nombre Luisa Mantoya Henao

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



#2

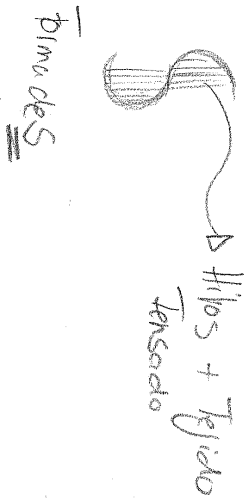
FORMATO B

Nombre Luisa Pantoya Henao

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato. Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

#1

Forma para 2



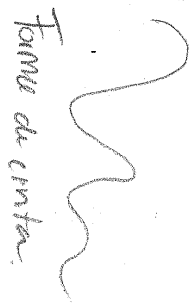
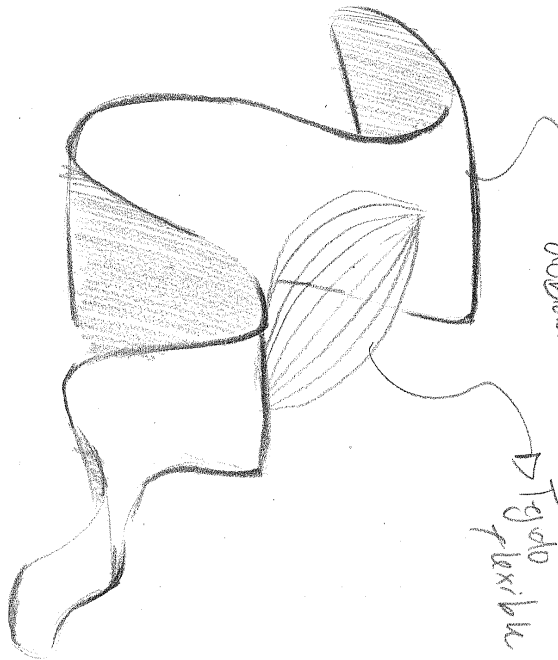
FORMATO B

Nombre Luisa Pantoya Henao

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato. Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

#13

Forma de 2

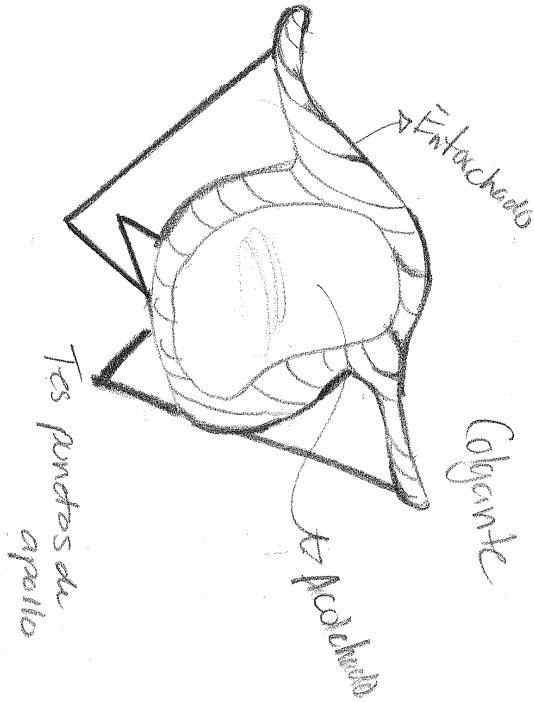


FORMATO B

Nombre Lilisa Rantoya Arana

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

2/5



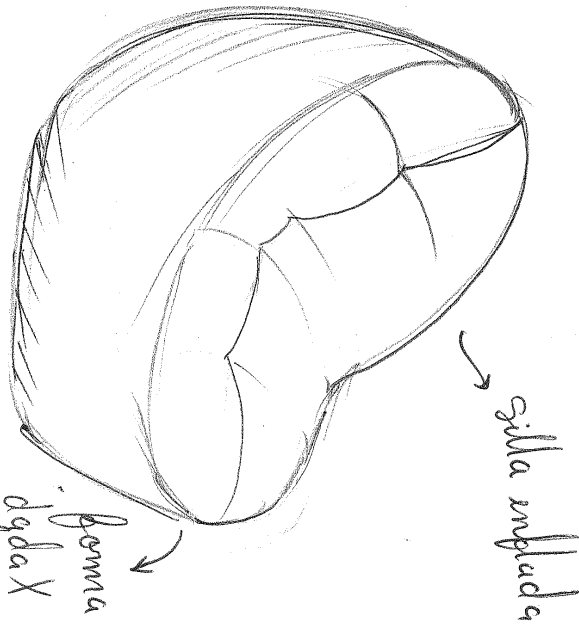
Lilisa Rantoya Arana
Petromint
Espiral

FORMATO B

Nombre Camila Aguirre Vergara

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

(2)
#1

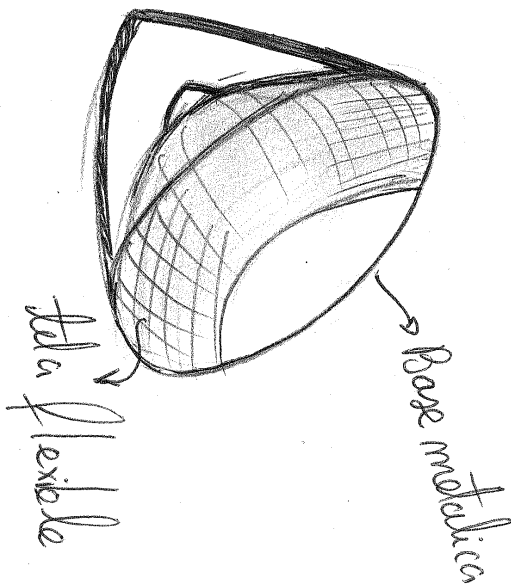


FORMATO B

Nombre Camila Aguirre Vergara

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.

#2

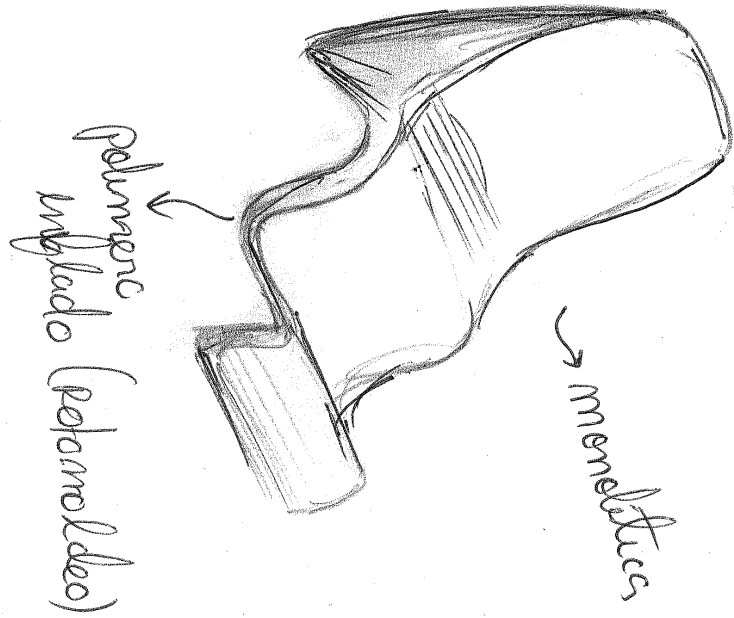


FORMATO B

Nombre

Camila Aguirre Jorguob

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



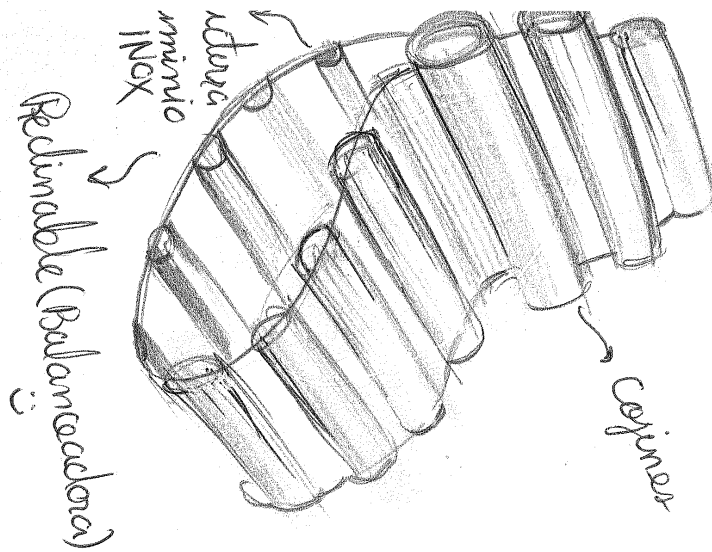
#14

FORMATO B

Nombre

Camila Aguirre V

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero sólo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



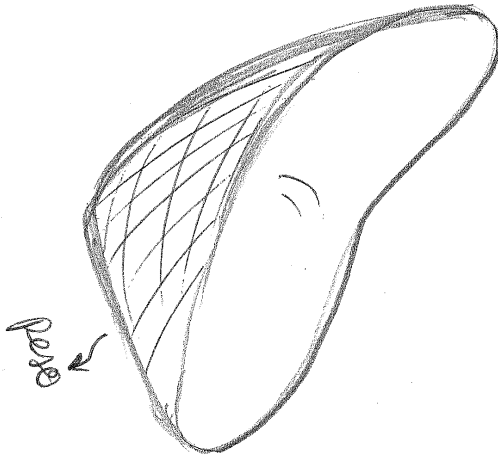
#13

FORMATO B

Nombre

Camila Aguirre

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero solo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



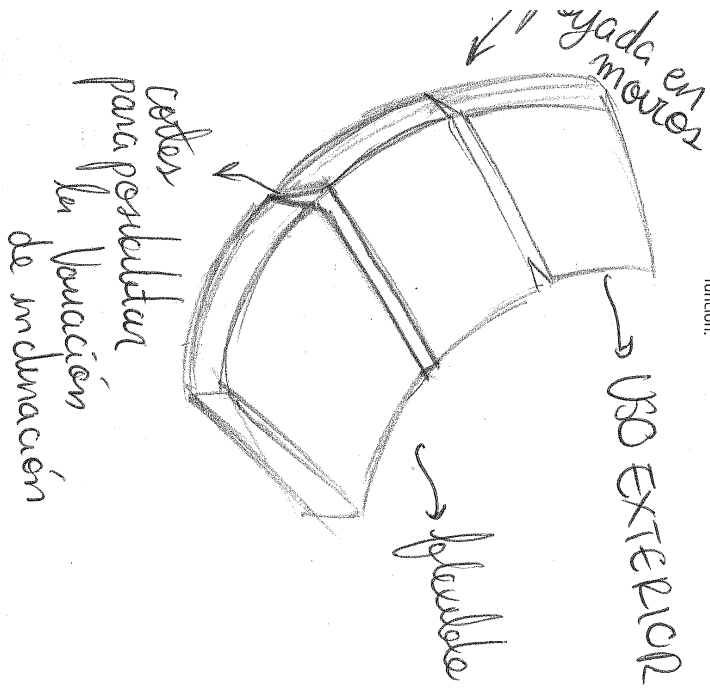
#5

FORMATO B

Nombre

Camila Aguirre

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero solo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



#6

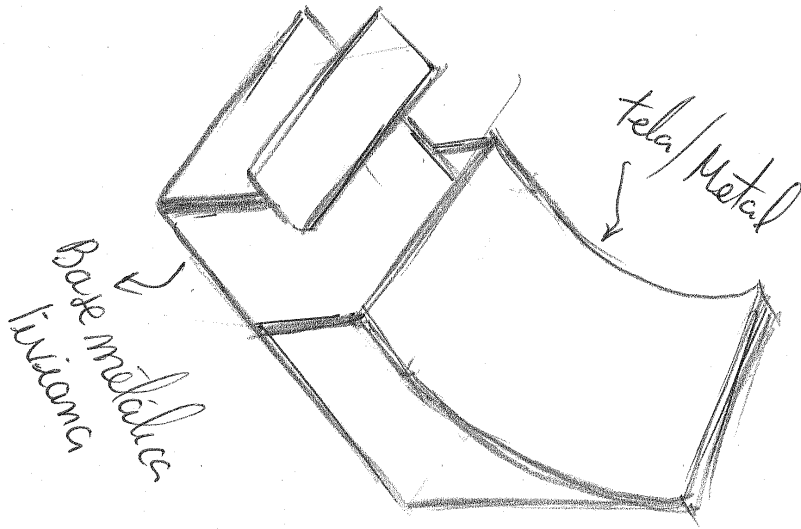
FORMATO B

Nombre

Carmela Aguirre

1

Puedes hacer varias vistas o perspectivas pero solo una idea por formato.
Recuerda utilizar palabras para dar información técnica, como: materiales, uso, función.



17