



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

ANÁLISIS DEL ENSAMBLE DE UNA ESTRUCTURA  
METÁLICA PARA PROPONER ALTERNATIVAS  
MEDIANTE DFA

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA INDUSTRIAL**

PRESENTA:

**ISAURA IGRAYNE SARASUADI ITURBE ARELLANO**

DIRECTORA: M.I. HANNA LESLYE GARCÍA GUERRA

CO-DIRECTOR: DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ



AGOSTO 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

*En la vida se viven muchas etapas, etapas de juego, etapas de estudio y etapas de cambio. Ahora que ha llegado el momento de concluir esta etapa de mi vida que con tanta ansia esperé y que hoy satisfactoriamente concluyo, quiero agradecer a quienes orientaron mi esfuerzo para que una parte de mi sueño se volviera realidad.*

*En primer lugar quiero agradecer a mi familia, sin la cual no hubiera tenido la oportunidad que a muchos se les niega de recibir una excelente educación. Esta oportunidad que principalmente la tuve gracias al esfuerzo de mi mamá y mi papá, a quienes dedico esta tesis, pues sé que para ellos significa que me han dado todas las herramientas que necesito en la vida y han cumplido con su misión como padres. Les agradezco más de lo que pueda expresar con palabras y los amo por apoyarme, quererme y consentirme durante mi etapa de estudiante. Sé que están, y espero sigan estando orgullosos de mí.*

*También quiero agradecerle a mis amigos, mi segunda familia. Les agradezco el trabajar conmigo, el reírse conmigo, el darme recuerdos tan bonitos, el estar ahí en los buenos y malos momentos, sus consejos y sobre todo su amistad que día a día me hizo sentir muy a gusto en mi querida UNAM.*

*El terminar mi carrera es para mí el principio de muchos logros profesionales, y no hubiera sido posible sin los conocimientos y apoyo de mis maestros. A ellos les agradezco la sabiduría que me compartieron y sobre todo agradezco a quienes me ayudaron a concluir el presente trabajo. Muchas gracias al Dr. Jesús Manuel Dorador González y a la M.I. Hanna Leslye García Guerra por guiarme, ayudarme y darme la oportunidad de trabajar con ellos. También agradezco a la empresa Adriann's de México S.A. de C.V. por haberme abierto sus puertas y así haber podido aplicar mis conocimientos en la industria.*

*Le agradezco mucho a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme dado la oportunidad de estar en sus aulas y haberme dado tanto, beneficiando a la sociedad con mi trabajo se lo retribuiré.*

*Por haber sido parte de mi vida y haberme aportado algo que me hace ser mejor cada día, les agradezco infinitamente.*

*¡Gracias!*

# ANÁLISIS DEL ENSAMBLE DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA PARA PROPONER ALTERNATIVAS MEDIANTE DFA

## TABLA DE CONTENIDO

I.	Introducción .....	1
I.1.	Objetivo .....	4
II.	Marco teórico .....	5
II.1.	Proceso de ensamble .....	6
II.2.	Diseño para ensamble .....	8
II.2.1.	Método Boothroyd-Dewhurst de DFA .....	10
II.2.2.	Método Lucas de DFA .....	15
II.2.3.	Método de evaluación de ensamble de Hitachi .....	18
II.3.	Ventajas del diseño para ensamble .....	20
II.4.	Estudio del trabajo .....	22
III.	Avances en el DFA de piezas grandes y pesadas .....	29
III.1.	Factores de diseño para ensamble para piezas grandes y pesadas .....	31
III.2.	Intercalando la planeación del ensamble con el diseño .....	32
III.3.	Diseño para ensamble en ensambles mecánicamente complejos .....	33
III.4.	Métodos de diseño para ensamble de placas grandes y pesadas: un diseño experimental .....	35
III.5.	Diseño para ensamble de piezas grandes y pesadas .....	36
IV.	Caso de estudio .....	43
IV.1.	Estructura metálica del edificio de la delegación Xochimilco .....	45
IV.2.	Descripción de las piezas .....	47
IV.3.	Proceso de ensamble de la estructura .....	53
IV.3.1.	Descripción del nodo .....	53
IV.3.2.	Ensamble del nodo .....	54
IV.3.3.	Ensamble de la estructura .....	58

IV.4. Estimación del tiempo de ensamble de la estructura mediante el método Boothroyd .....	69
V. Análisis del proceso de ensamble de la estructura metálica .....	73
V.1. Cursograma analítico y clasificación de las actividades .....	74
V.2. Análisis de la facilidad de ensamble de las piezas .....	79
V.2.1. Facilidad de Sujeción .....	80
V.2.2. Evitar piezas que se atoren, enganchen, doblen, etc. ....	80
V.2.3. Evitar materiales resbalosos, pegajosos o delicados .....	80
V.2.4. Necesidad de sujeción durante el ensamble .....	80
V.2.5. Ayudas de autolocalización .....	80
V.2.6. Resistencia a la inserción .....	81
V.2.7. Operaciones adicionales .....	81
V.2.8. Reorientación .....	81
V.2.9. Ajustes .....	81
V.2.10. Simetría de las piezas .....	82
VI. Propuestas de mejora al proceso de ensamble .....	83
VI.1. Propuestas de modificación de la geometría de las piezas .....	84
VI.2. Propuestas de modificación al método de manipulación .....	88
VI.3. Propuestas de modificación al método de unión .....	93
VI.4. Propuesta de eliminación de operaciones de ajuste .....	93
VI.5. Resumen de propuestas para el proceso de ensamble .....	94
VI.6. Cursograma del método propuesto .....	96
VI.7. Análisis costo-beneficio .....	98
VII. Conclusiones .....	106
VIII. Bibliografía y mesografía .....	111

# I. Introducción

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe investigación referente a la optimación del proceso de ensamble debido a la gran importancia del mismo en los sistemas productivos. La presente tesis pretende resaltar la importancia de realizar investigación en el área de *diseño para ensamble de piezas grandes y pesadas* debido a la escasa información referente a este tema y a la vasta aplicación del ensamble en la industria. En el país y en el resto del mundo existen ramas de la industria que por su naturaleza manejan piezas pesadas y grandes, por ejemplo, la automotriz, la metalmecánica, la de construcción y la aeronáutica.

El diseño para ensamble (DFA) es un proceso por el cual se diseñan productos con un enfoque en la facilidad de ensamble. En general, se busca reducir el número de partes para así reducir el tiempo total del ensamble y, por consiguiente, el costo del mismo. La globalización y el incremento de la competencia han causado que las empresas se interesen por reducir costos y tiempos de entrega, para lograr esto es necesario saber que el factor de mayor impacto en la reducción de costos es la eliminación de piezas no esenciales en el ensamble del producto. Los métodos de diseño para ensamble se enfocan en esta cuestión.

El ensamble consta de tres operaciones básicas: asir, manipular u orientar e insertar. Es por ello, que el diseño para ensamble busca proveer a los productos de ciertas características que faciliten dichas operaciones, y con ello reducir el tiempo de ensamble de cada pieza. Los métodos de diseño para ensamble existentes califican el diseño de las piezas con base en la facilidad que proveen para realizar estas operaciones.

Estos métodos se han desarrollado debido a la gran importancia que la etapa de ensamble tiene en la fabricación de productos. Según estudios realizados en Estados Unidos, el ensamble abarca entre 40% y el 60% del tiempo total de producción y representa aproximadamente un 40% del costo total del producto. Es por ello, que una reducción del tiempo de ensamble generará un incremento de productividad.

Los métodos existentes permiten identificar las piezas que dificulten el ensamble y que, por consiguiente, requieran un rediseño; sin embargo, todos los métodos presentan la limitante de ser útiles para evaluar piezas pequeñas y ligeras, es decir, de dimensiones menores a un metro y peso menor a 5 kilogramos. Esto se debe a que todas las piezas grandes y pesadas (con peso mayor a cinco kilogramos y longitud mayor a un metro) se penalizan indiferenciadamente, imposibilitando así la evaluación del diseño en este tipo de piezas. Cabe resaltar que esta falta de criterios de evaluación conlleva a no saber qué aspectos de la pieza modificar y qué características se podrían añadir a la pieza para facilitar el método de ensamble.

Los métodos de diseño para ensamble existentes son el método de Boothroyd-Dewhurst, el método Lucas y el método Hitachi. Los primeros dos penalizan de la misma manera las piezas que se deben sujetar con ambas manos debido al gran tamaño o peso, y del tercero, se desconocen los criterios de penalización de las piezas, pero se sabe que es útil sólo para piezas ligeras y pequeñas. Esto evidencia la necesidad de desarrollar un método de diseño para ensamble que permita evaluar piezas grandes y pesadas, ya que existen infinidad de piezas dentro de esta clasificación, cuya manipulación puede ser desde muy simple hasta extremadamente compleja debido al uso de maquinaria en su manipulación.

El presente trabajo describe los métodos existentes de diseño para ensamble, ya que con base en sus criterios de evaluación, se realizará el análisis de piezas principalmente medianas de un producto. Lo anterior, con el objeto de evaluar si estos métodos son adecuados para la evaluación de este tipo de piezas y determinar cuáles criterios ayudan a plantear propuestas que faciliten el ensamble de las mismas. Así mismo, se incluye información referente al estudio del trabajo para analizar el proceso e identificar las áreas de oportunidad.

El producto que se analizará es una estructura metálica que cubre la parte superior de un edificio. Esta estructura tiene poco menos de 4000 componentes, de los cuales solamente 1% son piezas grandes o pesadas pero

48% poseen características que permiten clasificarlos como piezas medianas, pues se encuentran cerca del límite de 5 kilogramos y un metro de longitud.

### **I.1. OBJETIVO**

Analizar los componentes y el proceso de ensamble de una estructura metálica, con el objeto de establecer propuestas de mejora en los métodos de ensamble y alternativas en el diseño de las piezas que faciliten y reduzcan el tiempo de ensamble.

## II. Marco Teórico

## **II. MARCO TEÓRICO**

En la fabricación de un producto se puede decidir acerca del material a usar, la geometría de las piezas, las tolerancias de las mismas, el acabado de la superficie, el agrupamiento de piezas y las técnicas de ensamble, pues todo esto limita la cantidad de procesos de manufactura que pueden usarse para hacer un producto determinado.

Los procesos de ensamble son necesarios en la mayoría de los sistemas productivos. Generalmente el ensamble es la parte que más tiempo requiere, y por consiguiente, la que más recursos económicos cuesta. Es por ello que se debe prestar especial atención al estudiar el ensamble de un producto, y de hecho, el no diseñar adecuadamente las piezas a ensamblar puede limitar la eficiencia del sistema productivo en general.

### **II.1. PROCESO DE ENSAMBLE**

El ensamble es la adición o unión de piezas para formar un conjunto o subconjunto completo, es decir, un producto parcial o terminado. Esta acción de unir es necesaria en la mayoría de las empresas manufactureras, ya que de muy pocos procesos se obtiene el producto terminado en una sola pieza.

Es de suma importancia conocer el producto en cuestión para determinar la secuencia de ensamble y así poder hacer un mejor diseño de las piezas desde un principio. Es importante resaltar que se debe considerar el ensamble desde la etapa del diseño del producto, pues es en esta etapa donde se pueden hacer cambios radicales a un menor costo.

Un proceso de ensamble incluye todas las operaciones necesarias para la obtención de productos terminados o subensambles asociados al proceso productivo. Las operaciones básicas son asir, manipular e insertar. Existen operaciones auxiliares como lo son mover, almacenar u otras operaciones de unión como la soldadura.

Es necesario considerar el proceso de ensamble en el diseño del producto, es decir, se debe buscar que las piezas que conformarán el producto permitan un ensamble fácil y rápido. Esto genera poco inventario en proceso, bajos costos, mayor eficiencia de los procesos de la planta, menor manejo de materiales y mayor productividad. El mejor diseño de las piezas de un producto será el que logre lo anterior tomando en cuenta también la facilidad de manufactura de las mismas.

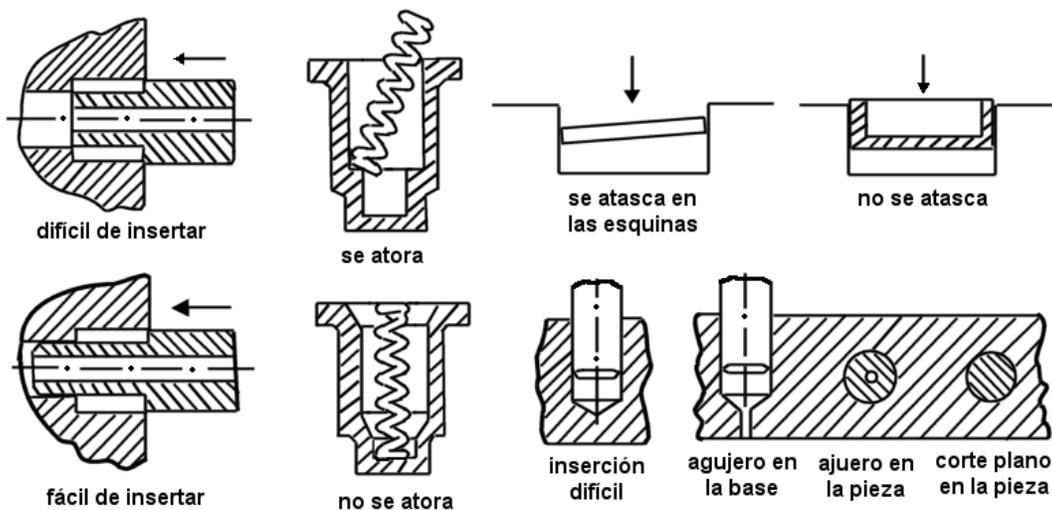
El ensamble puede ser de dos tipos: manual y automático. Las consideraciones de evaluación del ensamble son diferentes para cada caso. En el caso del manejo de piezas grandes y pesadas, y en algunas piezas medianas, el ensamble automático representaría una gran inversión en equipo de grandes dimensiones y gran capacidad de carga que generalmente el volumen de producción no justifica.

En el ensamble manual las piezas son manipuladas con las manos y con la ayuda de herramientas para lograr el ensamble. Este ensamble tiene como ventajas la posibilidad de trabajar con piezas de geometría compleja que las máquinas difícilmente podrían orientar y el requerimiento de una inversión inicial menor a la necesaria para un ensamble automático, pero su principal desventaja es que los tiempos de ensamble son mayores.

En el ensamble automático se manejan máquinas de propósito especial y sistemas programables. Las máquinas de propósito especial generalmente consisten en una serie de estaciones de trabajo, en las cuales se añaden piezas y/o se ejecutan operaciones de unión. Los sistemas de ensamble programables se utilizan para producir una variedad limitada de ensambles distintos. Con frecuencia se emplean robots industriales, ya sea en múltiples estaciones de trabajo o como un robot único en una estación. Las principales ventajas son los tiempos cortos de ensamble y la repetición de operaciones sin errores; sin embargo, se requiere de un gran volumen de producción para justificar la gran inversión inicial que la adquisición de maquinaria o robots representa.

## II.2. DISEÑO PARA ENSAMBLE (DFA)

El diseño para ensamble es un enfoque para el diseño de productos que incluye consideraciones sobre facilidad de ensamble en el diseño. Los dos principios básicos son: reducir el número de operaciones de ensamble reduciendo el número de piezas y facilitar la realización de las operaciones de ensamble, es decir, se enfoca en que las piezas provistas para el ensamble tengan características tales que sea más fácil sujetarlas, moverlas, orientarlas e insertarlas. En la imagen siguiente (Fig. 2.1) se muestra cómo el diseño de las piezas puede facilitar o dificultar el ensamble.



**Fig. 2.1** Ejemplos de características que facilitan el ensamble

Para conocer la facilidad de ensamble de las piezas se necesita un método para evaluarlas. Los métodos de diseño para ensamble sirven para identificar problemas en el proceso de ensamble desde la etapa de diseño de las piezas, es por ello que tienen gran utilidad en la industria. Estos métodos se fundamentan en la evaluación de la geometría de las piezas permitiendo identificar piezas que no poseen las características necesarias para facilitar el ensamble.

Cualquier método de DFA debe ser simple y fácil de usar, pero debe considerar todas las posibles características de las piezas y ser consistente en la

evaluación de las mismas para poder identificar las áreas problemáticas del ensamble. Esto no se ha logrado en su totalidad puesto que la evaluación de piezas grandes y pesadas no se puede realizar con los métodos actuales, y en el caso de piezas medianas, los resultados no reflejan la realidad.

Existen reglas generales para facilitar el ensamble y hay varios métodos de diseño para ensamble, estos incluyen el método Boothroyd-Dewhurst, el método Lucas desarrollado por K.G. Swift y el método Hitachi. Las reglas generales son principios de diseño que se recomienda tomar en cuenta al diseñar un producto. Los métodos de diseño para ensamble evalúan las piezas a ensamblar mediante penalizaciones por características que dificulten el ensamble y de esta manera proveen a los diseñadores de una herramienta que asegure la facilidad de ensamble desde las primeras etapas del desarrollo de un producto.

Algunas de las reglas generales de diseño para ensamble son:

### ***MANIPULACIÓN***

1. Diseñar piezas que tengan simetría lado a lado y rotacional respecto al eje de inserción o la mayor simetría posible.
2. Diseñar piezas que de no poder ser simétricas, la asimetría sea obvia.
3. Diseñar piezas de tal manera que no se aniden, atoren, enganchen o deformen al almacenarlas a granel.
4. Evitar diseñar piezas que se adhieran entre sí o que sean resbalosas, flexibles, delicadas, muy pequeñas o muy grandes, filosas y de manejo peligroso.

### ***INSERCIÓN***

1. Diseñar piezas con poca o nula resistencia a la inserción con ayuda de chaflanes que guíen la operación.
2. Estandarizar usando piezas, procesos y métodos comunes entre las líneas de ensamble lo que resultaría en costos más bajos de producción.
3. Diseñar piezas cuyo ensamble se realice a lo largo de un solo eje de referencia, de ser posible de manera vertical de arriba hacia abajo y que

no requieran sujeción para mantener la orientación requerida. De no ser posible, buscar que la pieza se asegure inmediatamente después de colocarla.

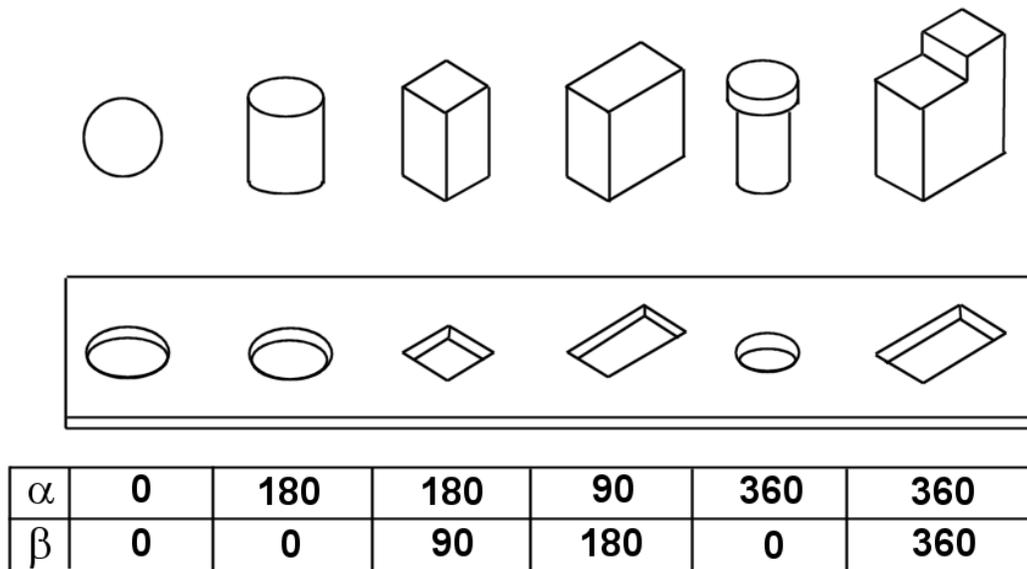
4. Diseñar piezas que se puedan posicionar correctamente antes de soltarlas.
5. Evitar el uso excesivo de sujetadores mecánicos que requieren mayor tiempo de ensamble. De ser posible utilizar la sujeción *snap-fit* en lugar de un atornillado, por ejemplo.
6. Evitar piezas que, para poder ser ensambladas, requieran reorientar el subensamble previo.

Estas reglas, aunque útiles, no proveen a los diseñadores de criterios de evaluación que permitan identificar características problemáticas o favorables en relación al ensamble y no permiten ver cuáles cambios generan mayores beneficios. Es por ello que se desarrollaron métodos de diseño que sí permitan evaluar el diseño de una pieza. Estos métodos se describen a continuación.

### **II.2.1. MÉTODO BOOTHROYD-DEWHURST DE DFA**

En 1967 con el apoyo de la Universidad de Massachusetts, Geoffrey Boothroyd inició sus estudios referentes al diseño para ensamble con lo que desarrolló un método que se usa para estimar el tiempo de ensamble manual de un producto y el costo de hacerlo de manera automatizada. La base del método es la geometría de las piezas por lo que se busca simetría en las mismas para evitar el tener que orientarlas en una posición determinada.

La simetría de las piezas se define por los grados de giro que se requieren para que la pieza ya orientada vuelva a alcanzar la posición deseada para la inserción. La simetría se evalúa a lo largo y respecto al eje de inserción. Los grados necesarios para orientar la pieza a lo largo del eje de inserción corresponden al valor  $\alpha$  y los grados necesarios respecto al eje de inserción corresponden al valor  $\beta$ . En la siguiente figura (Fig. 2.2) se ilustran los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para algunas geometrías.



**Fig. 2. 2** Valores  $\alpha$  y  $\beta$  de diferentes geometrías

La facilidad de manipulación es uno de los factores que más impacta en los costos, sin embargo, el número de piezas es otro factor muy importante por lo que se busca reducir el número de las mismas para disminuir el tiempo requerido en el ensamble. Es por ello que en el diseño de un producto se evalúa si las piezas son esenciales. Una pieza es esencial si:

- La pieza se mueve relativamente a las demás piezas previamente ensambladas.
- La pieza debe ser de diferente material.
- La pieza debe estar separada para permitir el ensamble o desensamble de otras piezas.

Los estudios realizados para desarrollar este método indican que el tiempo promedio de ensamble de una pieza es de 3 segundos. Por lo tanto, para calcular la eficiencia del diseño se obtiene la fracción del tiempo total que el número mínimo teórico de piezas requiere.

$$\text{Eficiencia del diseño (manual)} = \frac{3 \times \text{número mínimo teórico de piezas}}{\text{tiempo total de ensamble manual}}$$

Este método hace uso de tablas para penalizar las características de las piezas de ensamble. El método abarca tanto el ensamble manual como el automático, siendo éste último más estricto en la penalización. Por este motivo, se recomienda que en caso de desconocer el tipo de ensamble, se haga la evaluación para ensamble automático.

El presente trabajo se limita al estudio del ensamble manual debido a que es el tipo de ensamble más utilizado para la manipulación de piezas grandes y pesadas. Con este método se analizará el caso de estudio y se evaluará si puede ser aplicable a piezas medianas o grandes y pesadas. Las tablas de evaluación que permiten estimar el tiempo de ensamble se presentan en la página siguiente (Tablas 2.1 y 2.2).

En lo referente a la manipulación manual se evalúa la dificultad de asir las piezas, si se requiere más de una mano o alguna herramienta y la geometría de las mismas. La penalización mayor se da en el caso de tener piezas grandes o pesadas puesto que se necesita equipo para su manipulación. La penalización para cualquier pieza de esta categoría es única por lo que el método no resulta útil en el análisis de un producto cuyas piezas forzosamente sean pesadas y grandes.

En lo referente a la inserción se evalúa si las piezas requieren sujeción constante durante el ensamble o se requiere alguna operación secundaria para fijar las piezas. En esta sección, los tiempos propuestos por el método, difieren de los requeridos para piezas grandes y pesadas puesto que cualquier operación separada seguramente requerirá más tiempo, es por ello que el método no es apropiado para el estudio de las mismas.

En ambas tablas se obtiene un código de dos dígitos que identifica el tipo de ensamble que cada pieza maneja y está asociado a un tiempo estándar determinado por numerosos experimentos. Estos tiempos son una aproximación del tiempo real requerido.

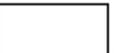
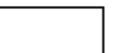
# MANIPULACIÓN MANUAL - TIEMPOS ESTIMADOS (segundos)

			LAS PIEZAS SON FÁCILES DE TOMAR Y MANIPULAR					LAS PIEZAS TIENEN DIFICULTADES DE MANIPULACIÓN						
			ESPESOR > 2mm		ESPESOR ≤ 2mm			ESPESOR > 2mm			ESPESOR ≤ 2mm			
			TAMAÑO > 15 mm	6 mm ≤ TAMAÑO ≤ 15 mm	TAMAÑO > 6 mm	TAMAÑO > 6 mm	TAMAÑO ≤ 6 mm	TAMAÑO > 15 mm	6 mm ≤ TAMAÑO ≤ 15 mm	TAMAÑO < 6 mm	TAMAÑO > 6 mm	TAMAÑO ≤ 6 mm		
UNA MANO			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
LAS PIEZAS PUEDEN SER SUJETADAS Y MANIPULADAS CON UNA SOLA MANO SIN LA AYUDA DE HERRAMIENTAS	$(\alpha + \beta) < 360$	0	1.13	1.43	1.88	1.69	2.18	1.84	2.17	2.65	2.45	2.98		
	$360 \leq (\alpha + \beta) < 540$	1	1.5	1.8	2.25	2.06	2.55	2.25	2.57	3.06	3	3.38		
	$540 \leq (\alpha + \beta) < 720$	2	1.8	2.1	2.55	2.36	2.85	2.57	2.9	3.38	3.18	3.7		
	$(\alpha + \beta) = 720$	3	1.95	2.25	2.7	2.51	3	2.73	3.06	3.55	3.34	4		
UNA MANO CON AYUDAS PARA SUJECIÓN			LAS PIEZAS REQUIEREN PINZAS PARA TOMARLAS Y MANIPULARLAS											
			LAS PIEZAS PUEDEN MANIPULARSE SIN NECESIDAD DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS					LAS PIEZAS REQUIEREN AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARA MANIPULARSE						
			$\alpha \leq 180$		$\alpha = 360$			$\alpha \leq 180$		$\alpha = 360$				
			ESPESOR > 0.25 mm	ESPESOR ≤ 0.25 mm	ESPESOR > 0.25 mm	ESPESOR ≤ 0.25 mm	ESPESOR > 0.25 mm	ESPESOR ≤ 0.25 mm	ESPESOR > 0.25 mm	ESPESOR ≤ 0.25 mm	LAS PIEZAS REQUIEREN OTRAS HERRAMIENTAS ADemás DE LAS PINZAS		LAS PIEZAS REQUIEREN HERRAMIENTAS ESPECIALES PARA SUJETARSE Y MANIPULARSE	
LAS PIEZAS PUEDEN SER SUJETADAS Y MANIPULADAS CON UNA SOLA MANO PERO SOLO CON LA AYUDA DE HERRAMIENTAS			0	1	2	3	4	5	6	7				
			$0 \leq \beta \leq 180$	4	3.6	6.85	4.35	7.6	5.6	8.35	6.35	8.6	7	7
			$\beta = 360$	5	4	7.25	4.75	8	6	8.75	6.75	9	8	8
			$0 \leq \beta \leq 180$	6	4.8	8.05	5.55	8.8	6.8	9.55	7.55	9.8	8	9
			7	5.1	8.35	5.85	9.1	7.1	9.55	7.85	10.1	9	10	
			$\beta = 360$											
DOS MANOS PARA MANIPULACIÓN			LAS PIEZAS NO PRESENTAN PROBLEMAS ADICIONALES DE MANIPULACIÓN					LAS PIEZAS NO PRESENTAN PROBLEMAS ADICIONALES DE MANIPULACIÓN (Ej. resbalosas, pegajosas, delicadas, etc.)						
			$\alpha \leq 180$		$\alpha = 360$			$\alpha \leq 180$		$\alpha = 360$				
			TAMAÑO > 15 mm	6 mm ≤ TAMAÑO ≤ 15 mm	TAMAÑO < 6 mm	TAMAÑO > 6 mm	TAMAÑO ≤ 6 mm	TAMAÑO > 15 mm	6 mm ≤ TAMAÑO ≤ 15 mm	TAMAÑO < 6 mm	TAMAÑO > 6 mm	TAMAÑO ≤ 6 mm		
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
LAS PIEZAS SE ATORAN SEVERAMENTE O SE ENGANCHAN O SON FLEXIBLES PERO PUEDEN SER SUJETADAS Y LEVANTADAS CON UNA SOLA MANO (CON EL USO DE HERRAMIENTAS SI FUERA NECESARIO)			8	4.1	4.5	5.1	5.6	6.75	5	5.25	5.85	6.35	7	
SE REQUIEREN DOS MANOS DEBIDO AL GRAN TAMAÑO			LAS PIEZAS PUEDEN SER MANIPULADAS POR UNA PERSONA SIN AYUDA MECÁNICA											
			LAS PIEZAS NO SE ENGANCHAN NI SE ANIDAN NI SON FLEXIBLES											
			LAS PIEZAS PESAN MENOS DE 10 lb					LAS PIEZAS SON PESADAS (>10 lb)						
			LAS PIEZAS SON FÁCILES DE TOMAR Y MANIPULAR		LAS PIEZAS PRESENTAN OTRAS DIFICULTADES DE MANIPULACIÓN			LAS PIEZAS SON FÁCILES DE TOMAR Y MANIPULAR		LAS PIEZAS PRESENTAN OTRAS DIFICULTADES DE MANIPULACIÓN			LAS PIEZAS SE ANIDAN SEVERAMENTE O SE ENGANCHAN O SON FLEXIBLES	
SE REQUIEREN DOS MANOS PARA SUJETAR Y TRANSPORTAR LAS PIEZAS			$\alpha \leq 180$	$\alpha = 360$	$\alpha \leq 180$	$\alpha = 360$	$\alpha \leq 180$	$\alpha = 360$	$\alpha \leq 180$	$\alpha = 360$	8	9		
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
			9	2	3	2	3	3	4	4	5	7	9	

Fuente: Boothroyd, G., Knight, W., Dewhurst, P., Product Design for Manufacture and Assembly, 2ª ed., Marcel Dekker, Inc., 2002

**Tabla 2. 1** Estimación de tiempos de manipulación

# INSERCIÓN MANUAL - TIEMPOS ESTIMADOS (segundos)

		DESPUÉS DEL ENSAMBLE NO SE REQUIERE SUJETAR LA PIEZA PARA MANTENER SU ORIENTACIÓN Y LOCALIZACIÓN				DESPUÉS DEL ENSAMBLE SE REQUIERE SUJETAR LA PIEZA PARA MANTENER SU ORIENTACIÓN Y LOCALIZACIÓN						
		FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE		DIFÍCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE		FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE		DIFÍCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE				
		NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN	HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN			
		0	1	2	3	6	7	8	9			
<b>PIEZA AÑADIDA PERO NO ASEGURADA</b> 	ADICIÓN DE CUALQUIER PIEZA EN DONDE NI LA PROPIA PIEZA NI LAS DEMÁS SE ASEGURAN INMEDIATAMENTE	0	1.5	2.5	2.5	3.5	5.5	6.5	6.5	7.5		
	LA PIEZA Y EL HERRAMENTAL ASOCIADO (INCLUYENDO LAS MANOS) PUEDE ALCANZAR FÁCILMENTE LA POSICIÓN DESEADA	1	4	5	5	6	8	9	9	10		
	DEBIDO A UN ACCESO RESTRINGIDO O A UNA RESTRICCIÓN EN LA VISIÓN DEBIDO A UN ACCESO RESTRINGIDO Y A UNA RESTRICCIÓN EN LA VISIÓN	2	5.5	6.5	6	7.5	9.5	10.5	10.5	11.5		
<b>PIEZA ASEGURADA INMEDIATAMENTE</b> 	ADICIÓN DE OTRAS PIEZAS EN DONDE LA PROPIA PIEZA Y LAS DEMÁS SE ASEGURAN INMEDIATAMENTE	3	2	5	4	5	6	7	8	9		
	LA PIEZA Y EL HERRAMENTAL ASOCIADO (INCLUYENDO LAS MANOS) PUEDE ALCANZAR FÁCILMENTE LA POSICIÓN DESEADA Y EL HERRAMENTAL SE PUEDE OPERAR FÁCILMENTE	4	4.5	7.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	8.5	10.5
	DEBIDO A UN ACCESO RESTRINGIDO O A UNA RESTRICCIÓN EN LA VISIÓN DEBIDO A UN ACCESO RESTRINGIDO Y A UNA RESTRICCIÓN EN LA VISIÓN	5	6	9	8	9	10	11	12	13	10	12
	NO SE REQUIEREN OPERACIONES DE ATORNILLADO O DE DEFORMACIÓN INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA INSERCIÓN	DEFORMACIÓN PLÁSTICA INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA INSERCIÓN		DEFORMACIÓN PLÁSTICA O TORSIÓN		RIVETEADO U OPERACIONES SIMILARES		ATORNILLADO INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA INSERCIÓN				
	FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR SIN RESISTENCIA A LA INSERCIÓN DIFÍCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR Y/O RESISTENCIA A LA INSERCIÓN FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR DURANTE EL ENSAMBLE NO HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN HAY RESISTENCIA A LA INSERCIÓN FÁCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR SIN RESISTENCIA TORSIONAL DIFÍCIL DE ALINEAR Y POSICIONAR Y/O RESISTENCIA TORSIONAL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<b>OPERACIÓN SEPARADA</b> 	PROCESOS DE UNIÓN MECÁNICOS (LAS PIEZAS YA ESTÁN EN SU LUGAR PERO NO FUERON SUJETADAS INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA INSERCIÓN)	NO HAY DEFORMACIÓN PLÁSTICA O ESTA MUY LOCALIZADA			PROCESOS DE UNIÓN NO MECÁNICOS (LAS PIEZAS YA ESTÁN EN SU LUGAR PERO NO FUERON SUJETADAS INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA INSERCIÓN)		PROCESOS QUE NO SON DE UNIÓN					
	DOBLADO O PROCESOS SIMILARES RIVETEADO O PROCESOS SIMILARES APRIETE POR ROSCA U OTROS PROCESOS PRESILLA DE PINZA CONEXIÓN RÁPIDA UNIÓN POR PRESIÓN NO SE REQUIERE MATERIAL ADICIONAL (ej. soldadura por fricción, por resistencia) SE REQUIERE MATERIAL ADICIONAL PROCESOS DE SOLDADURA SOLDADURA DE PENETRACIÓN PROCESOS QUÍMICOS (ej. unión por pegamento) MANIPULACIÓN DE PIEZAS O SUBENSAMBLES (ej. orientación, ajustes, etc.) OTROS PROCESOS (ej. inserción de líquidos, etc.)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	PROCESOS DE ENSAMBLE DONDE TODAS LAS PIEZAS SÓLIDAS ESTÁN EN SU LUGAR	9	4	7	5	3.5	7	8	12	12	9	12

Fuente: Boothroyd, G., Knight, W., Dewhurst, P., Product Design for Manufacture and Assembly, 2ª ed., Marcel Dekker, Inc., 2002

Tabla 2.2 Estimación de tiempos de inserción

En el caso de las piezas que se clasifiquen como grandes y pesadas se tendrá un mismo tiempo para cualquier peso y tamaño, por ello resultaría conveniente realizar experimentos que conduzcan a ver de qué manera afectan al tiempo de ensamble las variaciones en estas dos características y así tener mayor información para evaluar este tipo de piezas.

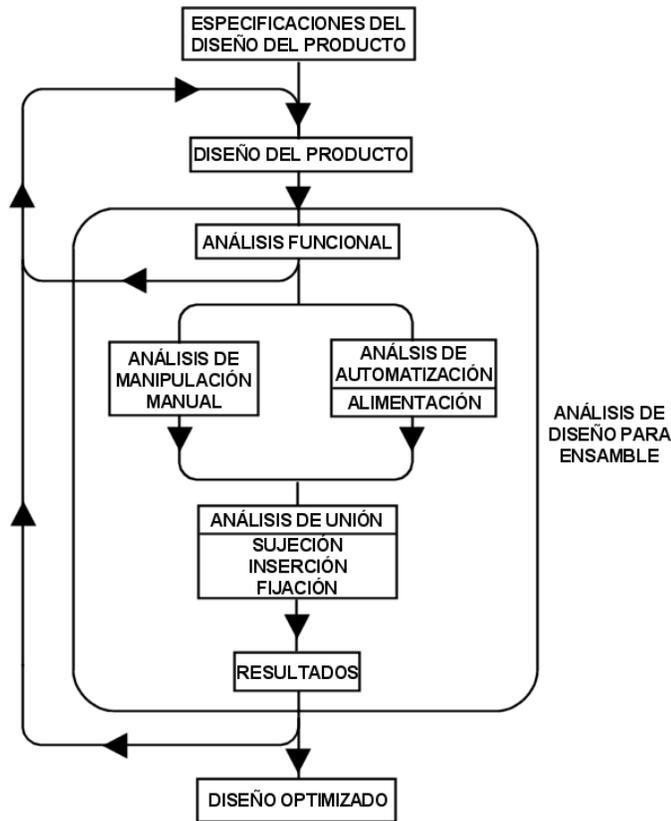
Este método considera que a mayores dimensiones es más fácil manipular las piezas, ya que las muy pequeñas requieren ayuda de pinzas o alguna herramienta; sin embargo, los experimentos que arrojaron esta conclusión se limitaron a piezas de dimensiones no mayores a un metro, por lo tanto, las piezas de mayor tamaño requieren de ayudas más complejas y no existe penalización para esto.

En relación al peso, este método concluye que el tiempo de manipulación es directamente proporcional al peso de las piezas por lo que las penalizaciones deberían variar con el incremento en el peso de las piezas. En el caso de trabajar con piezas pesadas, el método no considera la variación del peso a partir de cinco kilogramos.

### **II.2.2. MÉTODO LUCAS DE DFA**

Este método fue desarrollado a principios de los años 80 por la compañía inglesa Lucas. A diferencia del método descrito anteriormente, éste se basa en una escala que califica la dificultad de ensamble de las piezas, mas no proporciona tiempos estimados de ensamble.

Este método se basa en tres secuencias de análisis: funcional, de alimentación y de ajuste. Estas secuencias integran la parte de análisis del método Lucas representado en el siguiente diagrama de flujo (Fig.2.3).



**Fig. 2. 3** Secuencia de análisis del método Lucas

Las secuencias de análisis son las etapas donde se analizan propiamente las piezas a ensamblar considerando el tipo de producto en cuestión y primordialmente las especificaciones del mismo. Cada etapa analiza distintos aspectos que ayudarán a detectar dónde es posible hacer un rediseño que facilite el ensamble.

### ***ANÁLISIS FUNCIONAL***

En esta sección los componentes del ensamble se evalúan únicamente en cuanto a su función. Dichos componentes se clasifican en dos grupos dependiendo de si son esenciales o no para en funcionamiento del producto final. El grupo A corresponde a las piezas imprescindibles para que el producto funcione, mientras que el grupo B corresponde a las piezas que sirven generalmente para ajustar, sostener o que no son estrictamente necesarias para que el producto funcione.

Para hacer la clasificación de las piezas se analiza la necesidad de que las piezas se mueven con respecto a las demás, que sean de diferente material o deban estar separadas.

En esta etapa se mide la eficiencia del diseño, la cual corresponde al porcentaje de piezas indispensables. El principal propósito de esta etapa es minimizar el número de componentes para disminuir tiempos de ensamble.

La eficiencia del diseño se usa para conceptualizar una alternativa de diseño antes de invertir más recursos en el producto. La diferencia sustancial respecto del método Boothroyd-Dewhurst es que éste último asume que ya existe un diseño preliminar del producto, mientras que el método Lucas analiza el diseño que las piezas podrían tener.

### ***ANÁLISIS DE ALIMENTACIÓN***

En esta parte se analizan tanto la manipulación de las piezas como los tiempos de inserción de las mismas. Las tablas de análisis del método contienen penalizaciones según las características de las piezas cuya suma corresponde al índice de alimentación. El valor esperado para dicho índice es de 1.5, en caso de ser mayor se debe considerar un rediseño de la pieza evaluada.

Los índices de alimentación sirven para determinar la razón de alimentación, que corresponde a la suma de los índices de todas las piezas entre el total de componentes tipo A obtenidos en el análisis anterior.

$$\text{Razón de alimentación} = \frac{\text{índice de alimentación total}}{\text{número de componentes esenciales}}$$

El valor ideal para esta razón es de 2.5, en caso de ser mayor se deben buscar nuevas alternativas de diseño.

## ***ANÁLISIS DE AJUSTE***

El análisis de ajuste evalúa las operaciones adicionales que se requieren para sujetar las piezas. Estas operaciones pueden ser atornillado, remachado, ribeteado, etc. Cada operación se califica dependiendo de la cantidad de tiempo requerido para realizarla y con ello se obtiene un índice de ajuste cuyo valor ideal es 1.5. En caso de ser mayor, se deben rediseñar las piezas de modo que no se requieran operaciones de ajuste.

De igual manera que en el análisis de alimentación, se obtiene una razón de ajuste cuyo valor ideal es también 2.5.

$$\text{Razón de ajuste} = \frac{\text{índice de ajuste total}}{\text{número de componentes esenciales}}$$

Estas secuencias integran la parte de análisis del método Lucas. En general este método considera distintas características de las piezas que pueden dificultar su ensamble y dependiendo del grado de dificultad se asigna una penalización.

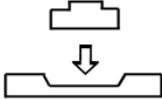
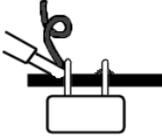
### **II.2.3. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ENSAMBLE DE HITACHI (AEM)**

Este método se utilizó para evaluar el proceso de ensamble de los productos de la compañía Hitachi y fue desarrollado por K. G. Swift. En este método se restan puntos por cada movimiento adicional o complicación que se presente durante el ensamble de un producto. Este método no se conoce a profundidad debido a que se desarrolló de manera interna y confidencial por la empresa.

Este método fue desarrollado para mejorar el diseño de un producto y con ello incrementar la productividad del proceso de ensamble. Este método permite identificar las debilidades en el ensamble mediante el uso de dos índices: índice de facilidad de ensamble ( $E$ ) y la razón entre la facilidad de ensamble y su costo ( $K$ ), permitiendo así estimar los costos de ensamble.

Los pasos del método Hitachi son:

1. Establecer una secuencia lógica de ensamble para cada pieza.
2. Clasificar las operaciones de ensamble del producto dentro de las 20 operaciones elementales propuestas en el método, las cuales se asocian a un símbolo en específico que indica el tipo de operación.
3. Calcular los índices  $E$  y  $K$  mediante las penalizaciones correspondientes a cada operación de acuerdo a las tablas del método. Estas penalizaciones contemplan el incremento de la dificultad de ensamble respecto al tiempo y al costo. Ejemplos de estas operaciones y su

OPERACIÓN ELEMENTAL		SÍMBOLO AEM X	PENALIZACIÓN $\epsilon_x$
	movimiento arriba-abajo	↓	0
	soldadura	S	20

penalización se presentan a continuación (Tabla 2.3).

**Tabla 2.3** Ejemplo de símbolos y penalizaciones del método Hitachi

4. Comparar el índice  $K$  con respecto al valor que se desee. Este valor es fijado por el analista y se recomienda que sea menor a 0.7. También es recomendable que el índice  $E$  sea mayor a 80 puntos para un fácil ensamble.
5. Identificar subensambles y piezas con bajos índices  $E$ , e intentar reducir el número de piezas para facilitar la secuencia de ensamble propuesta. En ocasiones el reducir el número de piezas disminuye el índice  $E$ . En este caso es preferible reducir el número de piezas aunque este índice se vea afectado.

La principal desventaja de este método es que no distingue entre el uso de ensamble manual o automático debido a dos razones. La primera es que considera que hay gran correlación entre el grado de dificultad del ensamble manual y el automático por lo que se puede aplicar indistintamente, y la segunda es que asume que este método se aplica en la etapa de diseño del producto, y en este punto suele no conocerse qué método de ensamble se utilizará para producirlo.

### **II.3. VENTAJAS DEL DISEÑO PARA ENSAMBLE**

El resultado que se obtiene de un proceso de ensamble es un producto terminado conformado por múltiples piezas. El diseño para ensamble permite facilitar dicho proceso y reducir el uso de recursos como lo son tiempo y dinero. Al aplicar el diseño para ensamble a un cierto producto se minimiza el número de piezas a ensamblar, se reducen los tiempos de ensamble y se mejora la calidad de los productos. Esto permite que el costo unitario del producto sea menor al de un producto que no considera la facilidad de ensamble en su diseño. Las ventajas van más allá de disminuir el costo de ensamblar, sino que reduce costos de órdenes de producción y de almacenamiento.

Otra ventaja notable de aplicar el diseño para ensamble es que la calidad del producto aumenta pues se evitan errores en el proceso, sobre todo cuando las piezas permiten el ensamble de una sola manera o la simetría en las piezas evita un ensamble incorrecto. Esto genera un menor porcentaje de productos defectuosos y reproceso.

La aplicación tanto de los métodos como de las reglas generales de diseño para ensamble produce diversos beneficios, los cuales se mencionan a continuación (Tabla 2.3).

Pauta	Interpretación y Ventajas
Minimizar la cantidad de componentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menores costos de ensamble</li> <li>▪ Mayor facilidad de desensamble para mantenimiento</li> <li>▪ Facilita la automatización</li> <li>▪ Menores costos de pedidos</li> </ul>
Usar piezas comunes a través de las líneas de productos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Permite el desarrollo de celdas de manufactura</li> <li>▪ Evita el manejo de múltiples tipos de piezas</li> </ul>
Incrementar la simetría de las piezas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No se requiere orientación</li> <li>▪ No permite que se cometan errores en el ensamble</li> </ul>
Colocar biseles y chaflanes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduce el tiempo de inserción</li> </ul>
Eliminar o reducir el ajuste requerido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducir tiempo de ensamble</li> </ul>
En piezas forzosamente asimétricas, resaltar la asimetría.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducir tiempo de orientación</li> <li>▪ Eliminar errores de ensamble</li> </ul>
Designar una pieza base.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduce tiempo de ensamble</li> <li>▪ Facilita la adición de piezas subsecuentes</li> <li>▪ Permite el uso de sujetadores</li> </ul>
Realizar el ensamble en una dirección: vertical descendente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facilita el ensamble</li> <li>▪ Elimina tiempo de reorientación</li> <li>▪ Permite el uso de sujetadores</li> </ul>

**Tabla 2. 4** Ventajas y beneficios del DFA

En resumen, las ventajas más importantes del diseño para ensamble son que se tiene un menor tiempo para llevar el producto al mercado, la transición hacia la producción no presenta dificultades y hay menos componentes en el producto final. Todo esto resulta en un ensamble más fácil y mayor satisfacción de los clientes.

La principal desventaja de la aplicación del diseño para ensamble radica en las contradicciones que se presentan con respecto al diseño para cualquier otro propósito. Esto quiere decir que en ocasiones la geometría adecuada para un fácil ensamble puede resultar contraproducente en cuanto a la manufactura o a la facilidad de mantenimiento.

## II.4. ESTUDIO DEL TRABAJO

En cada proceso de un sistema productivo, se conocen tanto las actividades a realizar como la secuencia de las mismas; sin embargo, no siempre se realizan de la mejor manera posible. El estudio y medición del trabajo permite hacer más eficientes los sistemas productivos encontrando la mejor manera de realizar las actividades y midiendo el tiempo requerido para realizar las actividades de dicho proceso.

El estudio de trabajo consta tanto del estudio de métodos como de tiempos y movimientos. Estas herramientas resultan útiles para hacer el análisis del proceso y proponer mejoras al mismo. El estudio de métodos consiste en registrar y examinar crítica y sistemáticamente el modo de realizar actividades. Para hacer un estudio de métodos se deben seleccionar las actividades que se estudiarán, registrar la información pertinente, examinar el modo y lugar en que se realiza el trabajo, establecer el método actual más práctico o mejor, evaluar opciones para establecer nuevos métodos, definir el nuevo método, implementarlo y controlar la aplicación del mismo.

El estudio de métodos pretende tanto incrementar la productividad como disminuir la fatiga del trabajador. El análisis de los métodos empleados para realizar una actividad permite optimizar los procesos puesto que analiza la forma en que se realiza cada actividad, buscando un modo más sencillo, práctico, rápido, económico y eficaz de realizarla.

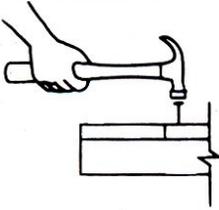
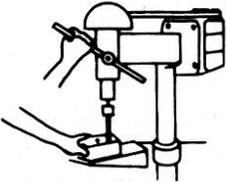
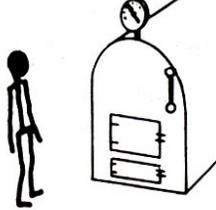
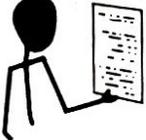
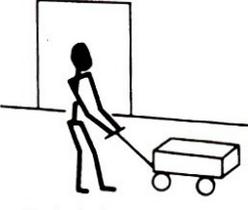
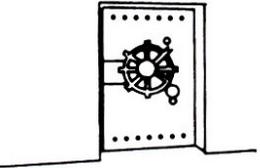
Es importante identificar y establecer el método de trabajo más efectivo, ya que es necesario que los movimientos a realizar en cada tarea sean los más prácticos y rápidos posibles. En el análisis de procesos es esencial realizar un estudio de métodos de trabajo, puesto que es necesario descartar la posibilidad de que se usen distintos métodos con distintos tiempos y esfuerzos para realizar la misma tarea. Esto sucede debido a que cada método empleado contiene diferentes cargas de trabajo, es por ello que el estudio de métodos pretende buscar el método que represente la menor cantidad de trabajo para conseguir el resultado deseado.

El estudio de movimientos es el análisis detallado de los movimientos que realiza una persona al desempeñar una tarea para eliminar o reducir los movimientos no esenciales y disminuir la duración de los esenciales.

Para la realización de este estudio es necesario seleccionar las actividades que se analizarán. Las actividades que comúnmente se estudian son las que tienen el mayor impacto económico, técnico o humano, y el ensamble es una de ellas. En este caso, las operaciones que se estudiarán son las que corresponden al ensamble de la estructura metálica.

Estas actividades se registran haciendo uso de diagramas que muestren la secuencia de las actividades, esto con el fin de poder analizar y examinar el método de trabajo y proponer mejoras. Las diferentes actividades se clasifican dependiendo de su naturaleza en seis tipos de actividades y se representan con sus símbolos correspondientes. Los tipos de actividades y su simbología se muestran en la página siguiente (Tabla 2.5).

Símbolos del estudio de métodos

Actividad	Ejemplo		
<p><b>OPERACION</b></p> <p>○</p>	 <p>Clavar</p>	 <p>Agujerear</p>	 <p>Mecanografiar</p>
<p><b>TRANSPORTE</b></p> <p>➔</p>	 <p>Por carro</p>	 <p>Por aparejo</p>	 <p>A mano</p>
<p><b>INSPECCION</b></p> <p>□</p>	 <p>Control de cantidad y/o de calidad</p>	 <p>Lectura de indicador</p>	 <p>Lectura de un documento</p>
<p><b>ESPERA</b></p> <p>D</p>	 <p>Material en espera de ser procesado</p>	 <p>Trabajador en espera de ascensor</p>	 <p>Documentos en espera de clasificación</p>
<p><b>Almacena- miento</b></p> <p>▽</p>	 <p>Almacenamiento a granel</p>	 <p>Depósito de productos terminados</p>	 <p>Archivo</p>

Fuente: Barnes, Ralph M., *Motion and time study*, 7ª ed., John Wiley, 1980, p. 29

**Tabla 2. 5 Símbolos del estudio de métodos**

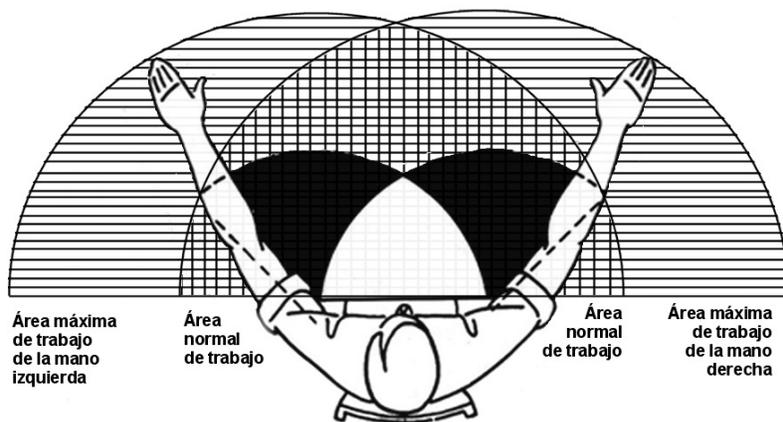
Debido a que en el estudio de movimientos se busca eliminar, en lo posible, los movimientos que no sean necesarios, se deben tomar en cuenta los principios de la economía de movimientos. Estos principios son recomendaciones referentes al cuerpo humano, el lugar de trabajo, la maquinaria y algunas operaciones que permiten acortar el tiempo necesario para completar una actividad. Los principios más importantes se mencionan a continuación.

### ***Principios referentes al cuerpo humano***

- Las dos manos deben de comenzar y completar sus movimientos a la vez.
- Ambas manos nunca deben de estar inactivas simultáneamente, excepto en periodo de descanso.
- Los movimientos de los brazos deben ser simultáneos, en direcciones opuestas y simétricas.
- Preferir movimientos de oscilación libre, pues son más rápidos, fáciles y exactos que los restringidos o controlados.
- El ritmo es esencial para la ejecución suave y automática de operaciones repetitivas.
- El trabajo debe disponerse de modo que los ojos se mueven dentro de los límites.

### ***Principios referentes al lugar de trabajo***

- Todas las herramientas y materiales deben contar con un sitio definido y fijo dentro del área máxima de trabajo mostrada a continuación (Fig. 2.4).



**Fig. 2. 4** Áreas normal y máxima de trabajo

- Las herramientas y materiales deben colocarse donde se necesitan.
- Deben utilizarse depósitos y medios de abastecimiento por gravedad.
- Proveer de buena iluminación y de una silla de tamaño y forma adecuada al trabajador.
- El color de la superficie de trabajo deberá contrastar con el de la tarea.

### ***Principios referentes a las máquinas y herramientas***

- Evitar que las manos estén ocupadas sosteniendo la pieza cuando esta pueda sujetarse con una plantilla.
- Siempre que sea posible deben combinarse dos o más herramientas.
- Siempre que cada dedo realice un movimiento específico, debe distribuirse la carga de acuerdo con la capacidad inherente a cada dedo.
- Las herramientas, materiales y manos deben situarse dentro del área máxima de trabajo.
- Usar eyectores y dispositivos que liberen el producto terminado sin utilizar las manos.

Una vez que el método de trabajo ha sido mejorado se estudian los movimientos de cada actividad. En actividades de ciclo corto o con un gran número de repeticiones es recomendable analizar con más detalle los movimientos para ver si es posible eliminar o disminuir esfuerzos innecesarios, esto se conoce como estudio de micromovimientos.

En el estudio de micromovimientos se analiza al trabajador en su área de trabajo y se registra cada movimiento del mismo. Estos movimientos son clasificados dentro de los 17 movimientos básicos, conocidos como *therbligs*. Ejemplos de estos movimientos se muestran en la tabla siguiente (Tabla 2.6).

### THERBLIGS

	BUSCAR		INSPECCIONAR
	ENCONTRAR		PRE-POSICIONAR
	SELECCIONAR		DESCARGAR
	ASIR		TRANSPORTE SIN CARGA
	TRANSPORTE CON CARGA		DESCANSO POR FATIGA
	POSICIONAR		RETRASO INEVITABLE
	ENSAMBLAR		RETRASO EVITABLE
	USAR		PLANEAR
	DESENSAMBLAR		

**Tabla 2. 6** Therbligs

El objetivo real del estudio de movimientos es acortar el tiempo del proceso reduciendo la cantidad de movimientos al realizar una tarea. En el caso del ensamble, éste representa un alto porcentaje del costo de producto, esto se debe a que la mayor parte del tiempo requerido para fabricar dicho producto se invierte en el ensamble. Es por ello que disminuir el número de movimientos que se usan para realizar esta tarea impactará notablemente en la productividad del sistema.

El estudio de métodos y el estudio de movimientos permiten optimizar procesos siendo la parte más importante el análisis crítico de los métodos actuales para proponer métodos mejores. Este análisis crítico se puede realizar clasificando las actividades del proceso en actividades de preparación, operaciones activas o actividades de salida. Las primeras son actividades donde el producto se prepara o posiciona para poder realizarle un trabajo, las segundas son las actividades en dónde se modifica o transforma el producto, y las terceras son actividades en las que se extrae o transporta el producto final.

En el análisis de las actividades se debe examinar cómo, quién, dónde y con qué se realiza cada una de ellas, y el por qué se hacen de ese modo. Este análisis puede señalar qué más podría hacerse o cómo las cosas deberían hacerse.

Otro aspecto importante que contribuye a la mejora de procesos es el manejo de materiales. El manejo de materiales requiere tiempo y esfuerzo por lo que definir la mejor manera de manejarlos es conveniente para hacer más eficiente el proceso.

Los estudios de métodos y de movimientos son herramientas útiles para el análisis de procesos ya que evidencian qué partes del proceso son susceptibles de modificaciones y cuáles tienen mayor impacto en el rendimiento general del proceso. Estas modificaciones deben ser definidas perfectamente y deben procurar eliminar la posibilidad de cometer errores en el proceso. También es importante que para la formulación de las propuestas de mejora, se identifiquen los aspectos clave del proceso y se trabaje especialmente en ellos para obtener el mayor beneficio posible.

Estas herramientas serán utilizadas junto con los principios de DFA en el análisis del proceso de ensamble de la estructura metálica para identificar áreas de oportunidad y desarrollar propuestas de mejora.

### III. Avances en el DFA de piezas grandes y pesadas

---

### **III. AVANCES EN EL DFA DE PIEZAS GRANDES Y PESADAS**

A pesar del creciente uso de estaciones y procesos automatizados, el ensamble manual sigue siendo el principal tipo de ensamble en la industria. En el caso de las piezas grandes y pesadas, el ensamble automático resulta poco práctico, por lo que el ensamble se realiza manualmente con ayuda de equipo para manipulación.

Actualmente, los métodos de diseño para ensamble no tienen la posibilidad de aplicarse en productos cuyas piezas tengan un gran tamaño o peso, de hecho, se recomienda evitar las piezas grandes y pesadas que necesitan herramientas especiales para su manipulación; no obstante, existen diversos productos cuyo gran tamaño es esencial para cumplir con sus respectivas funciones.

El ensamble de piezas grandes y pesadas consta, al igual que el de las piezas pequeñas y ligeras, de las siguientes etapas: manipular, orientar e insertar o unir. Estas etapas requieren mayor tiempo para este tipo de piezas, debido a que las distancias recorridas durante la manipulación son mayores y los movimientos necesarios para la orientación son más amplios y complejos.

En investigaciones anteriores se ha establecido que la relación entre la dificultad de ensamble y el tiempo requerido para el mismo son directamente proporcionales. Existen algunas otras consideraciones que se han hecho para el análisis de piezas grandes y pesadas que van desde la obtención de factores para calificar la dificultad de ensamble, hasta complejos sistemas que integran el diseño para ensamble con la planeación del mismo.

En el área de DFA de piezas grandes y pesadas aún se necesita investigación que proporcione un método eficaz para evaluar este tipo de piezas. Las limitaciones de los métodos de diseño para ensamble han sido identificadas desde el inicio del desarrollo de los mismos; sin embargo, no se ha continuado la investigación hasta definir un método que permita evaluar la facilidad de ensamble en este tipo de piezas.

No obstante, se han realizado estudios que, aunque no dan una respuesta concisa a esta necesidad, sí plasman las necesidades actuales y son una primera aproximación para el desarrollo de un método adecuado.

### ***III.1. Factores de diseño para ensamble para piezas grandes y pesadas<sup>1</sup>***

En 1994 R.H. Sturges publicó su trabajo acerca de factores de diseño para ensamble aplicables a piezas grandes y pesadas. La hipótesis planteada fue que las piezas son más difíciles de mover por su peso, la inercia de acelerar la masa, el momento de inercia para rotar la masa y el tamaño relativo a las holguras de ensamble. Sturges basa su investigación en la cantidad de información por unidad de tiempo que una persona puede generar al ensamblar este tipo de piezas, para ello propuso un índice de dificultad y otro de desempeño. Estos índices incluyen factores como la amplitud de movimiento, las tolerancias en la actividad y el tiempo promedio de respuesta.

Su experimento respecto al peso consistió en realizar una misma operación con piezas de diferente peso y con diferente amplitud de movimiento. En el caso de estudiar los efectos de la masa, eliminó la fuerza de gravedad utilizando un alambre que sostuviese la pieza durante la operación; respecto al momento de inercia se observó el ensamble de piezas de tres distintos tamaños y sus momentos respecto al eje del antebrazo.

Los resultados revelaron que el efecto del peso y el tamaño es más evidente en la primera etapa del ensamble, es decir, en la sujeción y manipulación. También observó que en esta primera etapa el peso y el índice de desempeño son inversamente proporcionales.

Se concluye con base en esta investigación que el peso y la masa se relacionan con el desempeño de las actividades de sujeción y manipulación, y que la mínima variación en el momento de inercia de las piezas, debido al gran tamaño, tiene un gran efecto en el tiempo de ensamble; sin embargo, el peso no mostró efecto alguno en la parte de inserción.

---

<sup>1</sup> Wong, J.H., Sturges, R.H., Design for Assembly Factors for Large and Heavy Parts, *Transactions of the ASME, Vol. 116, Junio 1994, pp. 508-510*

Aplicado esto a los métodos de diseño para ensamble, esta investigación permite calcular el tiempo que requiere el asir y manipular la pieza, pero no proporciona información respecto a tiempos de inserción ni considera el efecto de varios factores importantes como los son la fatiga, las ayudas de sujeción, la flexibilidad, el efecto del aire en piezas planas o el tipo de máquinas de manipulación utilizadas.

En mi opinión, esta investigación intenta estimar tiempos de ensamble de piezas grandes y pesadas mediante índices de dificultad y desempeño, que como ya he mencionado, es una de las principales carencias de los métodos de diseño para ensamble existentes; sin embargo; sólo se puede estimar el tiempo de manipulación, mas no el de inserción, por falta de correlación entre las variaciones de peso y masa y el tiempo requerido en ésta última. Considero que las conclusiones derivadas de este estudio ya eran conocidas, puesto que se esperaba que la dificultad del ensamble aumentara con el peso; sin embargo, considero útil el establecer que la mayor dificultad se deriva de grandes tamaños, mas no de grandes pesos.

La realización de esta investigación deja aún mucho por investigar referente al ensamble de piezas grandes y pesadas, puesto que los factores propuestos por R. Sturges no evalúan propiamente las piezas para proveer una mejora en el diseño que facilite el ensamble.

### ***III.2. Intercalando la planeación del ensamble con el diseño<sup>2</sup>***

En la actualidad ha surgido la necesidad de integrar la planeación de la secuencia de ensamble con el diseño, debido a que durante la planeación es evidente el ahorro de recursos mediante el rediseño del producto. Lo que en realidad se requiere no es una simple retroalimentación entre la planeación y el rediseño, sino una metodología que permita evaluar los diseños y explorar diferentes alternativas.

---

<sup>2</sup> Kim, G.J., Lee, S. Bekey, G.A., Interleaving Assembly Planning and Design, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No.2, Abril 1996, pp. 246-251

Mediante este estudio, se creó un sistema integral de planeación y diseño de ensamble llamado INSPIRE-2 (*Intelligent Assembly Planning Integrated with Redesign*). El objetivo de este sistema es incorporar el conocimiento generado en la planeación del ensamble al diseño lo antes posible y viceversa.

Este trabajo propone un sistema integral donde la planeación forma parte del proceso de diseño, este algoritmo hace más efectivo el diseño para ensamble, ya que para una secuencia de ensamble en particular, se pueden generar y evaluar varios diseños.

Anteriormente, se ha estudiado la posibilidad de interconectar un sistema CAD con una interface de planeación de la secuencia de ensamble; sin embargo, estas herramientas presentan limitaciones al rediseñar, pues no es posible generar de manera dinámica diferentes diseños y evaluarlos, pues la planeación del ensamble se hace con base en un diseño final del producto.

A pesar de que este sistema aún no se ha desarrollado por completo, es importante considerar la opción de conjuntar el análisis de la secuencia de ensamble con el diseño de las piezas para obtener mejores resultados. Esta propuesta de ver el ensamble integralmente puede generar beneficios mayores que el de involucrar únicamente los principios de diseño para ensamble.

### ***III.3. Diseño para ensamble en ensambles mecánicamente complejos<sup>3</sup>***

En 1997, L. De Fazio, S. Rhee y D. Whitney analizaron ensambles complejos que involucran un gran número de piezas, limitaciones en el rediseño de las piezas o la necesidad de previamente ensamblar algunas piezas. El ensamble de las piezas grandes y pesadas puede considerarse un ensamble complejo, no sólo debido a la presencia de alguna de las características antes mencionadas, sino a la dificultad que el peso y el tamaño agregan.

---

<sup>3</sup> De Fazio, T.L., Rhee, S.J., Whitney, D.E., 1997, A Design-Specific Approach to Design for Assembly (DFA) for Complex Mechanical Assemblies, *Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Marina del Rey, CA., August, 1997.* pp. 152-157

Este estudio se basa en el análisis de las secuencias de ensamble, debido a que este análisis puede ayudar a identificar oportunamente las piezas que requieran rediseño y posibles problemas en el ensamble. La realización de este estudio se fundamenta en que el diseño para ensamble convencional, es decir, el de los métodos existentes, sólo considera la manipulación en términos de tiempo, costo y de ensamble entre una pieza y otra, siendo esto inadecuado para aplicarse en ensamblajes complejos.

La particularidad de este estudio es que toma en cuenta la segmentación en subensambles junto con la selección de la secuencia de ensamble. Esta propuesta de integrar ambas características al DFA puede resultar conveniente en el caso de ensamblar piezas grandes y pesadas, debido a la complejidad de dicho ensamble.

Los autores describen un ensamble complejo con las siguientes características:

- Compuesto por muchas partes
- Tolerancias de ensamble mínimas
- Restricciones en el rediseño
- Ensamble de múltiples subensambles y a distintos niveles.

Las interrogantes principales son: cuánto se puede mejorar el ensamble en piezas que tienen limitaciones al rediseñar, cuál es la mejor manera de seccionar el ensamble en subensambles previos y cuál es la secuencia de ensamble más conveniente. Estas tres cuestiones resultan muy importantes debido a que estos tres factores intervienen directamente en la eficiencia del proceso de ensamble.

La propuesta es generar una alternativa de DFA específico de diseño, es decir, que considere la complejidad del producto y del ensamble, así como las restricciones en el diseño y la secuencia de ensamble del producto.

Este estudio concluye que el diseño para ensamble convencional se enfoca únicamente en facilitar el ensamble independientemente de su complejidad, por lo que no es adecuado para ensamblajes complejos, y se resalta, que no siempre

se requiere rediseño, sino identificar la mejor secuencia de ensamble, por lo que incluir el análisis de secuencias de ensamble en el diseño para ensamble resulta conveniente.

Esta propuesta de integrar el análisis de la secuencia de ensamble, puede resultar de gran ayuda en el ensamble de piezas grandes y pesadas. Especialmente se pueden lograr mejoras, si el enfoque se da hacia la secuencia de ensamble, puesto que muchas piezas grandes y pesadas presentan limitaciones en el rediseño, o el costo del mismo, puede ser alto.

El ensamble de una estructura metálica puede considerarse un ensamble complejo debido al gran número de piezas, el orden único de inserción de los componentes, las bajas tolerancias para lograr el ensamble, el uso de un subensamble inicial y las limitaciones en el rediseño de los componentes. En este caso, la premisa de cambiar la secuencia de ensamble puede generar mayor ahorro de tiempo que la forma de manipularlo y orientarlo.

#### ***III.4. Métodos de diseño para ensamble de placas grandes y pesadas: un diseño experimental (2001)<sup>4</sup>***

En el Instituto Politécnico de Virginia se realizó un estudio utilizando placas metálicas que representasen piezas pesadas, para buscar la manera de mejorar el proceso de ensamble de este tipo de piezas.

En este trabajo se considera que el ensamble se compone de tres etapas: transferencia, posicionamiento y unión. En general identifican que la duración de cada etapa del proceso de ensamble se debe a diferentes factores. En la etapa de transferencia, el factor de mayor impacto es la distancia a recorrer, en la tercera etapa es la eficiencia de las máquinas de inserción, pero en la etapa de posicionamiento, el tiempo depende de la dificultad de la tarea, de los métodos de manipulación y de las habilidades de los operarios de las máquinas.

---

<sup>4</sup> Wongwanich Y., Design for Assembly Methods for Large and Heavy Plates: an Experimental Design, Virginia Polytechnic Institut and State University, Blacksburg, VA., Julio 27, 2001.

Este trabajo se enfoca en cómo determinar la dificultad de una tarea y cómo mejorar la eficiencia de los métodos de manipulación. Para ello se analizaron cuatro métodos de ensamble bajo distintas condiciones de manejo de piezas.

Las diferentes condiciones para efectuar el proceso son:

- Una persona
- Dos personas
- Una persona con grúa viajera
- Una persona con grúa viajera con resorte

Los resultados obtenidos indican que en los cuatro métodos, la dificultad y el tiempo de ensamble son proporcionales. Los resultados también muestran que para una pieza cuyo peso no sea mayor a 40 libras, el mejor método es el ensamble con dos personas independientemente del grado de dificultad. Adicionalmente, se detectó que el desempeño de un operario de grúa, puede incrementarse en un 250% agregando un resorte en el gancho de la grúa.

### ***III.5. Diseño para ensamble de piezas grandes y pesadas<sup>5</sup>***

El antecedente más reciente respecto al ensamble de piezas grandes y pesadas es la investigación realizada en el 2005 por estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes desarrollaron una propuesta inicial de un método de diseño para ensamble de piezas grandes y pesadas analizando piezas de un ventilador industrial.

Para la realización de este estudio se propuso una clasificación de piezas, basada en la utilizada en el método de Boothroyd de ensamble automático. Esta clasificación permite incluir cualquier pieza no importando su geometría. La clasificación de piezas se realiza conociendo las características de las mismas, como lo son el peso, la geometría y la forma de manipulación de las mismas. Las piezas de acuerdo a su geometría se clasifican en tres grupos

---

<sup>5</sup> Chávez A. C., Corona S. A. Ramirez M. T., Diseño para ensamble de piezas grandes y pesadas, Univerisidad Nacional Autónoma de México, *México, D.F., Abril 2005.*

generales: cilindros, discos o prismas. En cada grupo hay varias clasificaciones de acuerdo a las relaciones entre sus dimensiones.

En el caso de piezas con geometrías complejas se consideran las dimensiones del prisma rectangular mínimo que pueda contener a la pieza. Esta conjetura permite que se cumpla uno de los principios necesarios en el desarrollo de un método, puesto que no habrá pieza que no pueda ser clasificada.

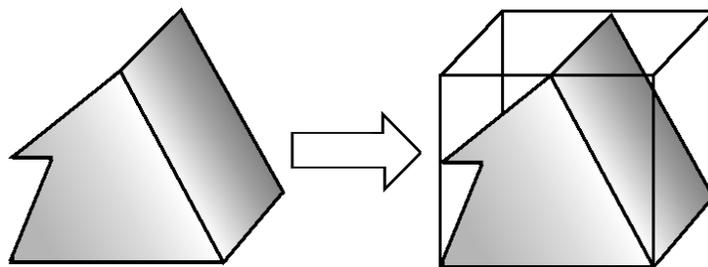
Las piezas también se clasifican según su peso dentro de uno de los cinco grupos de intervalos variables. Acerca de esta clasificación se desconoce, el porqué de los límites de cada intervalo; sin embargo, la clasificación sí distingue entre piezas pesadas de manejo más sencillo y piezas que definitivamente requieren equipo más complejo para su manejo.

Referente a la manipulación, se evalúa si se requiere maquinaria para su manejo, si existen ayudas de sujeción como agarraderas o cavidades y el número de operarios necesarios para el ensamble.

Los criterios de clasificación son los siguientes:

### 1) FORMA GEOMÉTRICA

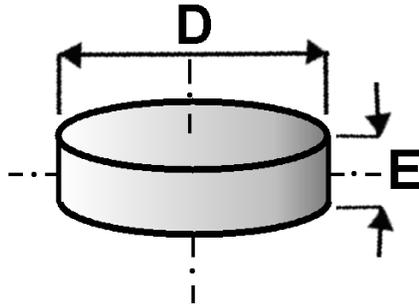
La forma geométrica de las piezas se determina mediante las relaciones geométricas entre las dimensiones de las piezas. En las formas geométricas irregulares, las dimensiones a considerar son las del prisma rectangular de menor tamaño que pueda contener a la pieza (Fig. 3.1).



**Fig. 3.1** Prisma mínimo para evaluar piezas irregulares

De acuerdo a las relaciones geométricas de sus dimensiones, las piezas se pueden clasificar en:

- DISCOS



**Fig. 3.2** Parámetros de clasificación de discos

Los discos se clasifican en los siguientes tres grupos según sus parámetros (Fig. 3.2):

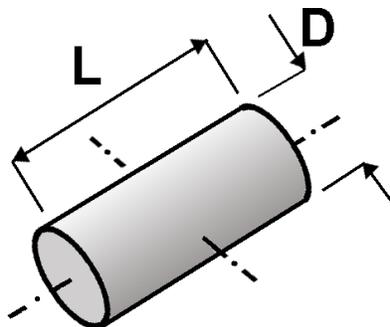
$$D \leq 1$$

$$1 < D < 2$$

$$D \geq 2$$

Adicionalmente, el espesor (E) de la pieza no debe ser mayor de 10 centímetros.

- CILINDROS



**Fig. 3.3** Parámetros de clasificación de cilindros

Existen dos tipos de cilindros según la relación geométrica entre la longitud (L) y el diámetro (D) del mismo (Fig. 3.3).

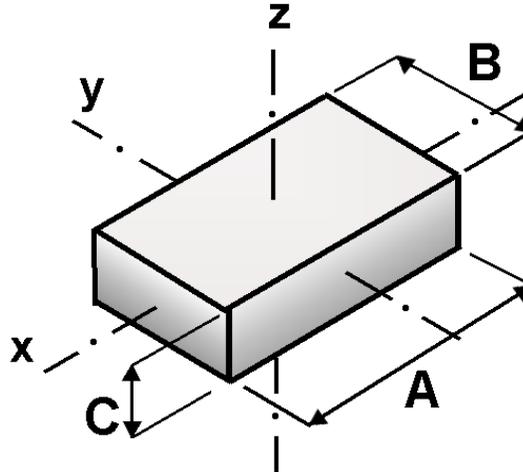
***Cilindros cortos***

La relación longitud – diámetro debe ser  $L/D \leq 2$

### ***Cilindros largos***

La relación longitud – diámetro debe ser  $L/D > 2$

- **PRISMAS**



**Fig. 3. 4** Parámetros de clasificación de prismas

En el caso de los prismas (Fig. 3.4), existen tres tipos dependiendo de las relaciones entre el largo (A), el ancho (B) y la altura (C).

#### ***Piezas planas***

Las relaciones geométricas son:

$$A/B \leq 3$$

$$A/C > 4$$

#### ***Piezas largas***

La relación geométrica es:

$$A/B > 3$$

#### ***Piezas cúbicas***

Las relaciones geométricas son:

$$A/B \leq 3$$

$$A/C \leq 4$$

Esta clasificación se basa en la empleada por el método Boothroyd de ensamble automático que maneja dos tipos principales de piezas, las rotacionales y las no rotacionales. La clasificación se muestra a continuación (Tabla 3.1).

<b>Rotacionales</b>	<b>Discos</b> $L/D < 0.8$
	<b>Cilindros cortos</b> $0.8 \leq L/D \leq 1.5$
	<b>Cilindros largos</b> $L/D > 1.5$
<b>No rotacionales (prisma)</b>	<b>Planos</b> $A/B \leq 3$ $A/C > 4$
	<b>Largos</b> $A/B > 3$
	<b>Cúbicos</b> $A/B \leq 3$ $A/C \leq 4$

**Tabla 3. 1** Clasificación de piezas del método Boothroyd de ensamble automático

## 2) PESO

Las piezas se clasifican de acuerdo al peso de las mismas dentro de los cinco grupos siguientes (Tabla 3.2):

<b>Grupo</b>	<b>Peso (kilogramos)</b>
1	5-30
2	31-100
<b>Grupo</b>	<b>Peso (kilogramos)</b>
3	101-500
4	501-1000
5	> 1001

**Tabla 3. 2** Clasificación de piezas respecto al peso

El peso mínimo de las piezas debe ser de 5 kilogramos, ya que las piezas de menor peso pueden ser evaluadas con los métodos existentes de diseño para ensamble.

### 3) EQUIPO PARA SU MANIPULACIÓN

La clasificación respecto al equipo para la manipulación de las piezas, distingue la necesidad de emplear equipo o maquinaria para el manejo de las mismas, principalmente se refiere al uso de grúas.

### 4) ¿LA PIEZA CUENTA CON AYUDAS ESPECIALES DE SUJECIÓN?

La principal cuestión es evaluar si las piezas poseen aditamentos que no formen parte del diseño funcional y que puedan funcionar como ayudas durante el ensamble, por ejemplo: agarraderas, orejas, cavidades o roscados.

### 5) NÚMERO DE OPERARIOS NECESARIOS PARA LA MANIPULACIÓN

En el caso de piezas grandes y pesadas puede requerirse más de una persona para su manejo, es por ello, que las piezas se clasifican según el número de operarios requeridos (Tabla 3.3).

Grupo	Número de operarios
1	1 - 2
2	3 - 5
3	6 ó más

**Tabla 3. 3** Clasificación de piezas respecto al número de operarios necesarios para la manipulación

La clasificación presentada incluye las características y dimensiones de las piezas que deben ser consideradas para evaluar la facilidad de ensamble. Además, las distintas clasificaciones permiten establecer varios grupos que tengan aproximadamente la misma dificultad de ensamble; sin embargo, considero que resultaría conveniente clasificar también el tipo de maquinaria

que se usará en el manejo de las piezas, puesto que el tiempo de manejo puede variar, dependiendo de las maniobras que ésta permita y del tiempo que se emplee en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos se muestran en una tabla que permite, mediante la clasificación de las piezas, evaluar la facilidad de ensamble. Esta propuesta inicial de un método de evaluación se basa en la evaluación de piezas pertenecientes a algunas clasificaciones, por lo que no ofrece la posibilidad de evaluar todos los tipos de piezas; sin embargo, identifica entre todas las posibles situaciones, las que no son viables de suceder en la realidad o las que no justifican el uso de recursos, es decir, descarta el estudio de casos en que no es viable destinar muchos recursos debido a la poca complejidad de la tarea.

## IV. Caso de estudio

#### **IV. CASO DE ESTUDIO**

El proceso analizado es el ensamble de una estructura metálica. Este tipo de estructuras de acero están compuestas por piezas de distintas geometrías que se interconectan por nodos para formar una red. Estas estructuras se utilizan principalmente para cubrir espacios de grandes dimensiones como lo son terminales de transporte, estadios, auditorios, museos, mercados, centros comerciales, naves industriales, etc.

La estructura analizada fue fabricada y ensamblada por la empresa Adriann's de México S.A. de C.V. Esta empresa se ubica en el municipio de Tlalnepantla de Baz, Edo. de México y se dedica a la industria metalmecánica desde hace más de 40 años.

El material con que se fabrican las piezas de dichas estructuras puede ser acero al carbono, acero inoxidable o aluminio. La elección del material es de extrema importancia debido a que éste determinará los procesos de manufactura posibles y la facilidad con la que éstos últimos se llevarán a cabo. Las propiedades del material también se deben tener en consideración, debido a que este tipo de estructuras sufren constantemente de esfuerzos durante el ensamble y durante su uso en los inmuebles.

Los principales procesos de manufactura empleados para fabricar las piezas que conforman la estructura son: doblado, corte, barrenado y soldadura. Posteriormente se aplica pintura por aspersion con secado al horno.

La parte fundamental del diseño de las estructuras es la conexión entre piezas, es decir, el diseño del nodo, pues de él depende la facilidad y rapidez de ensamble, los esfuerzos que sufrirán las piezas y la estética de la estructura. Existen dos tipos principales de unión para formar los nodos: uniones por soldadura y uniones por tornillo. Las uniones por soldadura tienen la característica de ser permanentes, puesto que no es sencillo separar dos piezas soldadas. Por otro lado las uniones por tornillo tienen la característica de

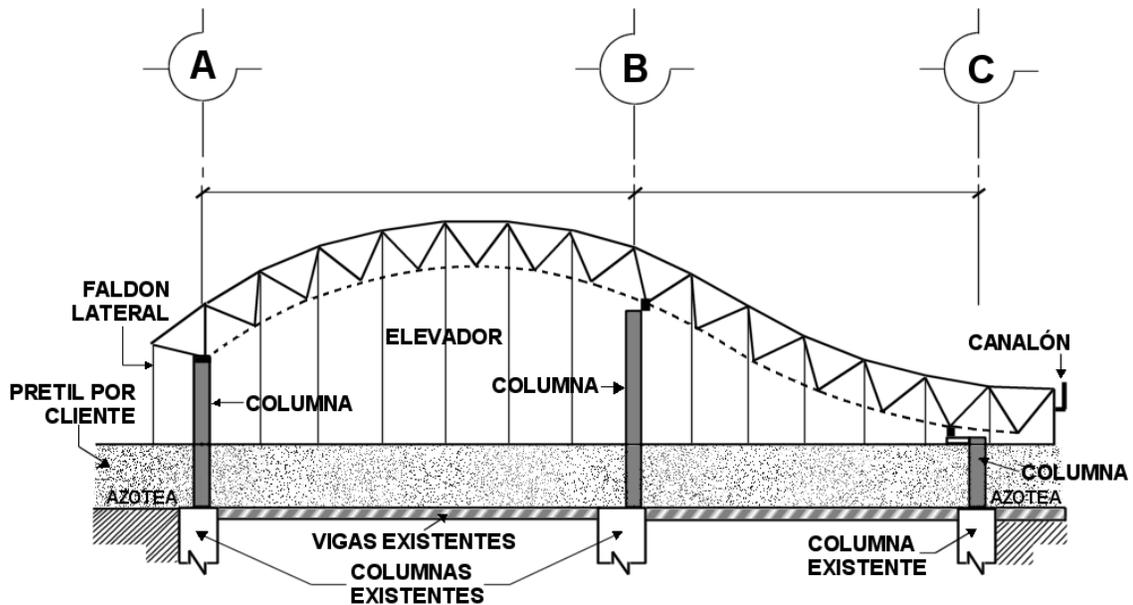
no ser permanentes debido a que se pueden desensamblar con relativa facilidad. Ejemplos de uniones por tornillo se muestran en la siguiente imagen (Fig.4.1).



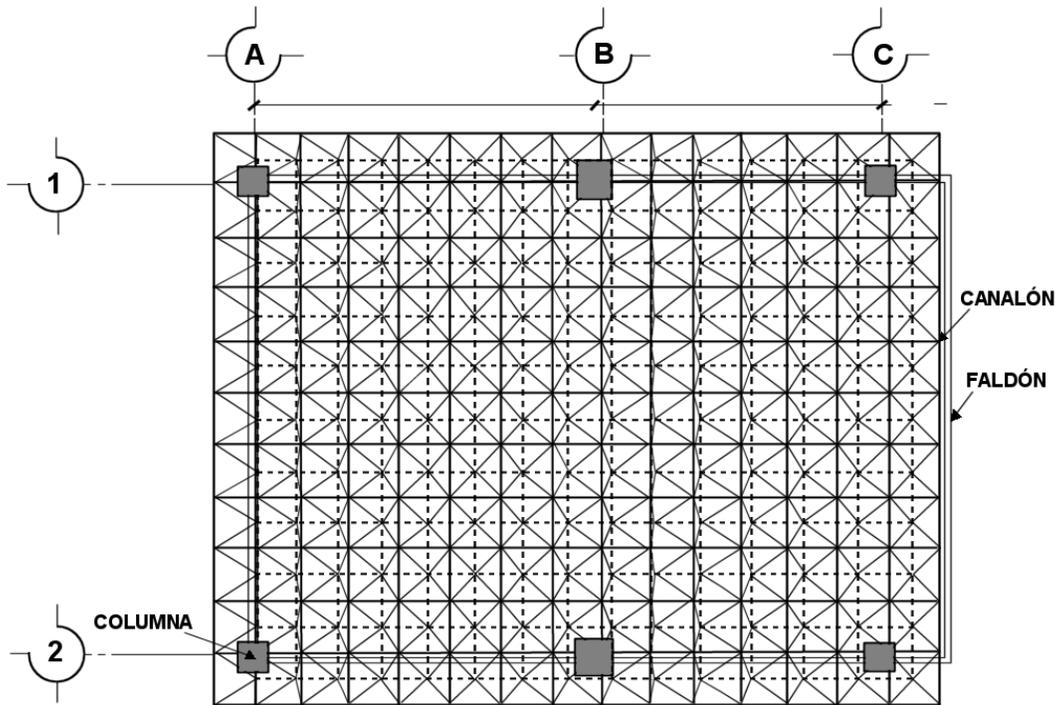
*Fig. 4. 1* Ejemplos de tipos de nodos

#### IV.1. ESTRUCTURA DEL EDIFICIO DE LA DELEGACIÓN XOCHIMILCO

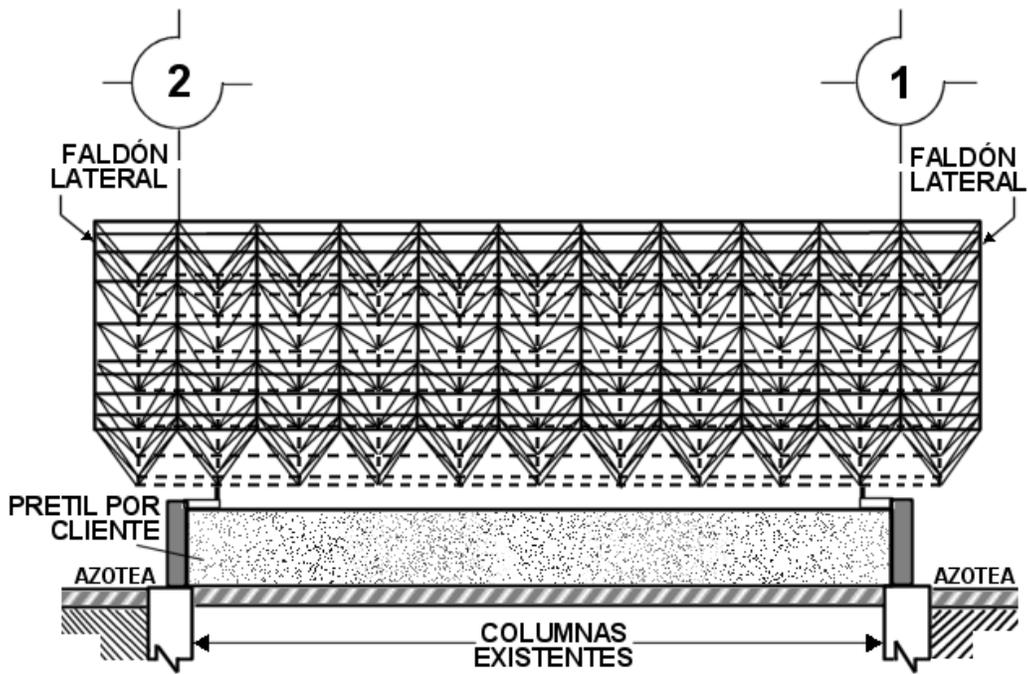
La estructura del caso de estudio se localiza en la parte superior del edificio gubernamental de la delegación Xochimilco y abarca un área de 132 m<sup>2</sup> aproximadamente. La funcionalidad de la estructura es principalmente estética y de protección del inmueble contra las condiciones de la intemperie. El diseño de la misma permite cubrir el último nivel del elevador, para lo cual el diseño incluye una ondulación en la parte media de la estructura. El diseño de la estructura se muestra a continuación (Figs. 4.2, 4.3, 4.4).



*Fig. 4. 2* Vista frontal de la estructura



**Fig. 4.3** Vista superior de la estructura



**Fig. 4.4** Vista lateral de la estructura

## IV.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS

La estructura se compone de un total de 3988 piezas con 20 diferentes geometrías. La geometría de cada pieza, su ubicación y el tipo de pieza de acuerdo a la clasificación del método Boothroyd se muestran a continuación.

### ▪ *Mallas*



**Fig. 4. 5** Geometría de las mallas inferiores



**Fig. 4. 6** Geometría de las mallas diagonales

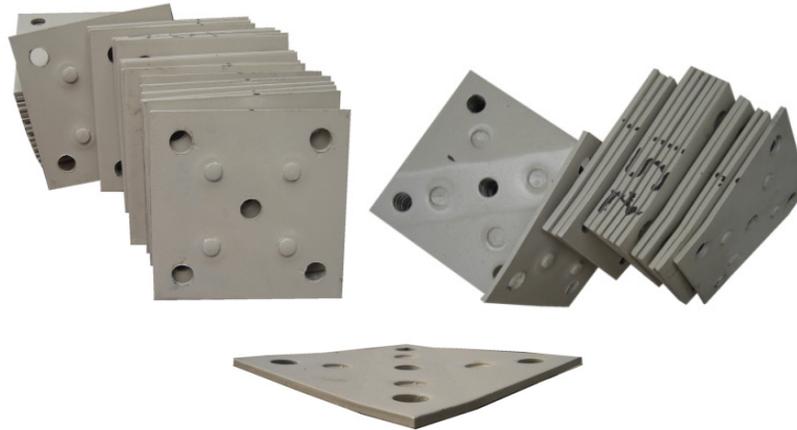


**Fig. 4. 7** Geometría de las mallas superiores

Estas piezas conforman el cuerpo de la estructura. Las mallas son piezas cilíndricas largas hechas a partir de perfiles circulares o cuadrados cuyos extremos se doblan para lograr una superficie plana, a la cual se le hacen barrenos para lograr la conexión en el nodo. Existen tres tipos de mallas. Las mallas inferiores (Fig. 4.5) son perfiles circulares cuyos extremos se doblan para lograr una superficie plana paralela al resto de la pieza. Las mallas diagonales (Fig.4.6) son similares a las mallas planas, pero a diferencia de éstas últimas, los extremos de las mallas diagonales se doblan a un ángulo de 60°. Las mallas superiores (Fig. 4.7) son perfiles cuadrados cuyos extremos

presentan un proceso de corte para dar fácil acceso al barreno donde se colocarán un tornillo y una tuerca.

▪ **Uniones cuadradas**



**Fig. 4. 8** Geometría de las uniones cuadradas

Las uniones cuadradas (Fig. 4.8) son piezas prismáticas planas. Las uniones cuadradas son la parte central de los nodos superiores y se fabrican a partir de láminas de acero. Los procesos utilizados para fabricar estas piezas son corte, doblado, barrenado y estampado. Estas piezas se utilizan para hacer la conexión entre mallas. Existen dos versiones de esta pieza, ambas versiones presentan dos dobleces diagonales que generan una ligera curvatura permitiendo tener piezas cóncavas y piezas convexas. Esta curvatura permite crear la ondulación de la estructura por encima del elevador. Para facilitar el ensamble, estas piezas presentan relieves circulares que facilitan la ubicación correcta de las mallas superiores.

▪ **Uniones triangulares**



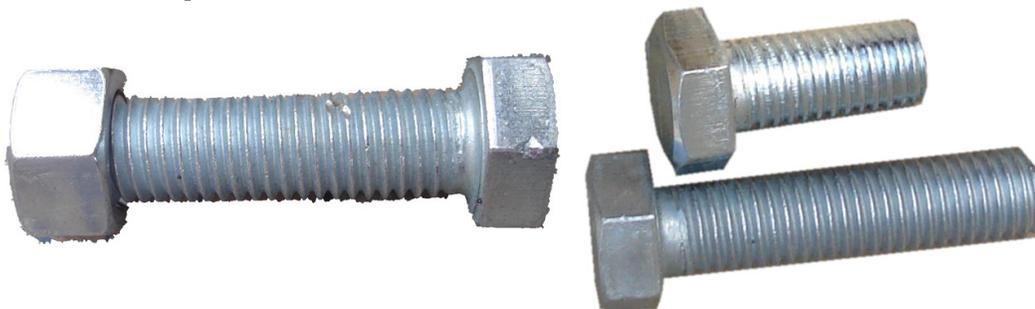
**Fig. 4. 9** Geometría de las uniones triangulares



**Fig. 4. 10 Geometría de las uniones triangulares**

Las uniones triangulares (Figs. 4.9, 4.10), al igual que las uniones cuadradas, son piezas prismáticas planas fabricadas a partir de láminas de acero utilizando los mismos procesos. Estas piezas se utilizan igualmente para hacer la conexión en los nodos superiores, pero únicamente en los bordes y esquinas de la estructura. Existen tres variaciones de esta pieza. Las primeras dos versiones se colocan en los bordes de la estructura y cuentan con cuatro barrenos para hacer la conexión de tres mallas superiores y las mallas diagonales, la diferencia entre ellas es la curvatura de las mismas. La tercera versión cuenta únicamente con dos barrenos para la conexión de dos mallas superiores y una malla diagonal, esta versión se utiliza únicamente en las esquinas. Para facilitar el ensamble, estas piezas también presentan relieves circulares que facilitan la ubicación de las mallas superiores en la posición correcta.

▪ **Tornillos y tuercas**



**Fig. 4. 11 Geometría de los tornillos que conforman la estructura**

Los tornillos y las tuercas (Fig. 4.11) son piezas cilíndricas. Ambas piezas se fabrican en aluminio utilizando procesos de torneado. Existen dos versiones en las cuales la única variación es la longitud del tornillo, por lo tanto, sólo se requiere un tipo de tuerca para ambas versiones. Los tornillos cortos se

emplean para sujetar las mallas superiores a las uniones cuadradas o triangulares, mientras que los tornillos largos se usan para sujetar las mallas diagonales y planas en los nodos inferiores.

- **Columnas**



**Fig. 4. 12 Geometría de las columnas**

Las columnas (Fig. 4.12) son piezas cilíndricas largas, éstas son las piezas de mayor tamaño y peso dentro de la estructura. Se fabrican con perfiles de acero mediante procesos de corte y soldadura. La función de las columnas es soportar la estructura y se localizan en los extremos y parte media de la misma. Las tres versiones difieren entre sí únicamente en la altura.

- **Soportes**



**Fig. 4. 13 Geometría de los soportes**

Los soportes (Fig.4.13) son piezas prismáticas largas que conectan las columnas con la red de mallas. Se fabrican a partir de perfiles de acero y procesos de soldadura, corte y torneado. Estas piezas se colocan en seis nodos inferiores del borde de la estructura. Cada soporte posee una base que se une a la columna y una cuerda en el extremo que sustituye al tornillo en el nodo.

- **Bases**



**Fig. 4.14 Geometría de las bases**

Las bases (Fig. 4.14) son piezas prismáticas cúbicas de ajuste utilizadas en el ensamblaje. Se fabrican con láminas de acero mediante procesos de corte, doblado y soldadura. En realidad, estas piezas no forman parte del diseño original de la estructura. Su función es correctiva debido a un error en el cálculo de la altura que las columnas deberían tener.

- **Rondanas**



**Fig. 4.15 Geometría de las rondanas**

Las rondanas (Fig. 4.15) son discos cuya función es de ajuste. Se fabrican mediante el troquelado de láminas de acero. La estructura incluye el ensamblaje de varias mallas en un nodo, las cuales se deben colocar en un orden determinado, de lo contrario, la diferencia de alturas impide el ajuste correcto del nodo. En el borde de la estructura, los nodos contienen un menor número

de mallas, por lo tanto, la función de las rondanas es compensar el espesor de las mallas faltantes en estos nodos.

- **Faldones**



**Fig. 4. 16 Geometría de los faldones del borde de la estructura**

Los faldones (Fig. 4.16) son piezas prismáticas largas. Estas piezas son perfiles cuadrados de acero cuya longitud se determina por un proceso de corte. La función de estas piezas es estética. Estos faldones presentan varias longitudes para formar un marco alrededor de toda la estructura. Se coloca un faldón vertical en cada uno los nodos superiores del borde, el cual descende hasta la barda de concreto del edificio. También se colocan faldones horizontales a diferentes alturas para formar dicho marco.

- **Placas**



**Fig. 4. 17 Geometría de las placas**

Las placas (Fig. 4.17) son piezas prismáticas planas fabricadas con láminas de acero, las cuales se someten a procesos de corte y doblado. La función de las placas es proveer de una superficie para soldar los faldones. Existen dos

versiones. La primera tiene un área pequeña y se suelda a los nodos de la parte lateral de la estructura. La segunda versión se suelda a los nodos de la parte posterior de la estructura, es de mayor área y tiene un doblez que permite fijar el faldón posterior.

- **Canalones**



**Fig. 4.18** Geometría de los canalones

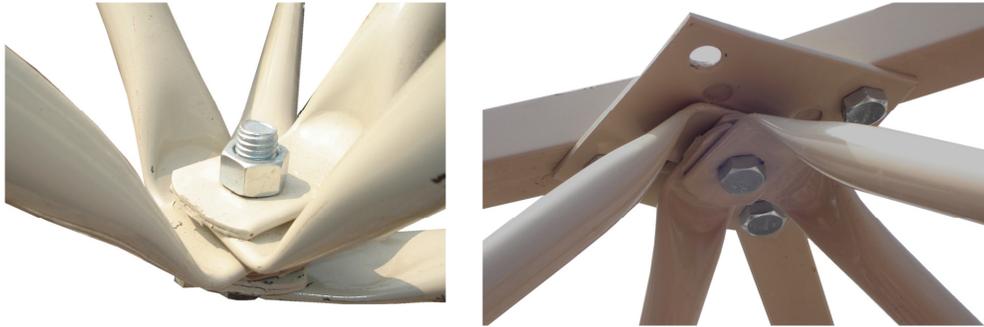
Los canalones (Fig. 4.18) son piezas prismáticas planas. Se fabrican a partir del corte de perfiles cuadrados de acero y un proceso posterior de unión por soldadura. Estas piezas se ubican al extremo de la estructura. Su función es crear una base para soportar un canal que dirija el flujo de agua pluvial hacia un costado del edificio.

### **IV.3. PROCESO DE ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA**

En esta sección se describe el proceso de ensamble utilizado para armar la estructura incluyendo los métodos empleados para el manejo de las piezas o subensambles grandes o pesados que se generan durante el proceso. El ensamble y manejo de piezas se realizó de manera manual en su totalidad.

#### **IV.3.1. Descripción del nodo**

La facilidad de ensamble depende del tipo de nodo de la estructura. El nodo, en este caso, es a base de tornillos y tuercas como se muestra en la imagen siguiente (Fig. 4.19):



**Fig. 4. 19** Nodos inferior y superior de la estructura

Existen dos tipos de nodos principales en esta estructura: nodos superiores y nodos inferiores.

Los nodos superiores se componen de:

- 1 unión cuadrada
- 4 mallas superiores
- 4 mallas diagonales
- 4 tornillos cortos
- 1 tornillo largo
- 5 tuercas

Los nodos inferiores se componen de:

- 4 mallas diagonales
- 4 mallas inferiores
- 1 tornillo largo
- 1 tuerca

En el caso de los nodos laterales, ubicados en los bordes de la estructura, los componentes son diferentes, puesto que algunas mallas diagonales se sustituyen por rondanas y se utiliza alguna de las versiones de uniones triangulares.

#### **IV.3.2. Ensamble del nodo**

El proceso utilizado para hacer el ensamble de los nodos se describe a continuación. Este proceso se repite en el ensamble de cada nodo y la facilidad

de ensamble del mismo determinará en gran medida el tiempo total de ensamble de la estructura.

El ensamble inicia en los nodos superiores con la colocación de un subensamble (Fig. 4.20) formado por una malla superior, una unión cuadrada y un tornillo corto.



**Fig. 4. 20** Subensamble unión-malla superior

Este subensamble se coloca ensamblando la malla superior del mismo a una unión cuadrada de un nodo previamente ensamblado. Este ensamble se compone de dos etapas. La primera es orientar la pieza, la cual debe alinearse con la esquina de las uniones cuadradas, para ello se debe insertar el primer barreno en el relieve circular de la unión cuadrada; esta acción facilita el ubicar la pieza y lograr la alineación de los barrenos donde entrará el tornillo; sin embargo, no se logra una alineación total, pues el relieve permite la rotación de la malla alrededor del mismo.

La siguiente etapa es la de inserción del tornillo. Éste se inserta por la parte inferior, y después se coloca la tuerca en la parte superior (Fig. 4.21).



**Fig. 4. 21** Geometría del relieve de posicionamiento y ubicación del tornillo

Posteriormente, se sujeta un tornillo largo y en él se insertan, con movimientos verticales descendentes, las cuatro mallas diagonales en el orden establecido (Fig. 4.22). Este orden es esencial y debe ser el mismo en todos los nodos puesto que existe una diferencia de alturas debido al espesor del extremo de la malla. El orden de inserción debe ser:

1. malla diagonal derecha anterior
2. malla diagonal derecha posterior
3. malla diagonal izquierda posterior
4. malla diagonal izquierda anterior



**Fig. 4. 22** Orden de inserción de las mallas del nodo superior

Una vez que se han insertado las mallas en el tornillo largo, este subensamble se inserta en el barreno central de la unión cuadrada, se coloca la tuerca y se atornilla. Cuando el nodo superior se ha ensamblado, se procede a ensamblar los cuatro nodos inferiores asociados a dicho nodo superior. Para ello, se procede a alinear en el orden correcto las mallas que ya se encuentran sujetadas por un extremo en los nodos contiguos. Después se sujeta un tornillo largo y en él se insertan las mallas restantes en el orden establecido (Fig. 4.23), el cual debe ser:

1. malla inferior posterior
2. malla inferior anterior
3. malla inferior izquierda
4. malla inferior derecha
5. malla diagonal derecha posterior
6. malla diagonal izquierda posterior

7. malla diagonal izquierda anterior
8. malla diagonal derecha anterior



**Fig. 4. 23** Orden de inserción de las mallas del nodo inferior

Una vez insertadas todas las mallas en el tornillo, se coloca la tuerca y se atornilla. Este proceso se repite en cada uno de los nodos inferiores de la estructura con excepción de los nodos de los bordes donde el espesor de la mallas diagonales e inferiores que ya no se requieren, se compensa insertando rondanas. Es conveniente resaltar que el ensamble de las mallas en el tornillo resulta complicado pues las piezas se atorán con la cuerda del tornillo y no existen guías en ángulo en los barrenos que ayuden a la inserción del tornillo. Dado que esta inserción se realiza dos veces por cada malla, resultaría conveniente facilitar el proceso de inserción.

El ensamble de ambos tipos de nodo se realiza insertando manualmente cada elemento en los tornillos y posteriormente colocando una tuerca. Es importante resaltar que inicialmente las tuercas se enroscan manualmente y no se les da torque alguno con la finalidad de que sea posible mover las piezas, cuyos extremos posteriormente se insertarán en otros nodos. Una vez que una zona de nodos esta ensamblada, se realiza una operación adicional de ajuste con una herramienta que proporciona el torque necesario al elemento de sujeción.

### IV.3.3. Ensamble de la estructura

El proceso de ensamble inicia con la llegada al lugar de todas las piezas que conforman la estructura. La zona de ensamble es la azotea del edificio cuyo único acceso será el elevador que aún no se ha instalado. Debido a esto el transporte se realiza manualmente subiendo las piezas por una escalera de aluminio. La mayoría de las piezas son piezas medianas que se pueden transportar por una persona; sin embargo, las piezas pesadas son transportadas por dos personas y se elevan mediante el uso de lazos y malacates.

El ensamble se realizó en siete etapas. En cada etapa se realizó el ensamble de distintas secciones de la estructura como se muestra a continuación (Fig.4.24).

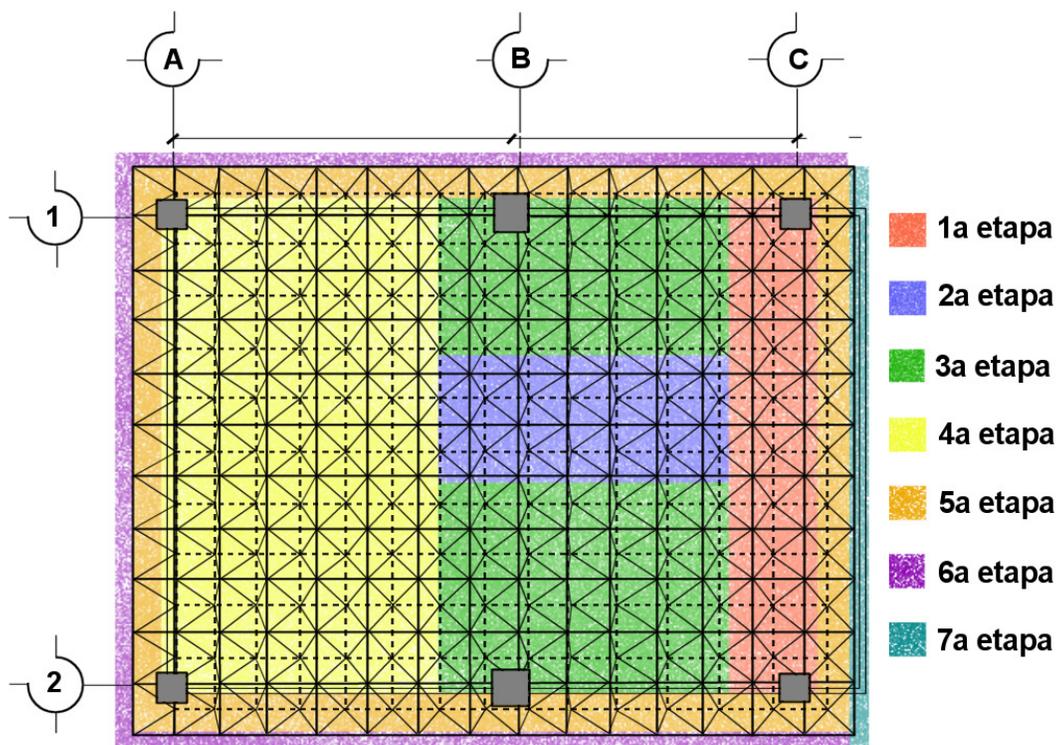
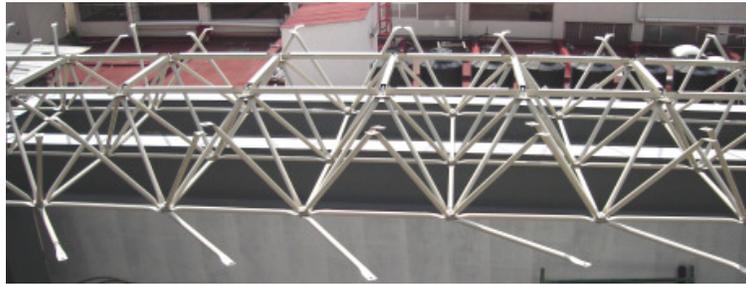


Fig. 4. 24 Etapas del proceso de ensamble de la estructura

#### ▪ 1ª ETAPA

El ensamble inicia en el extremo superior derecho de la vista superior. Se inicia ensamblando la hilera de nodos que se fijará a las columnas más cortas. Este

ensamble consta de dos hileras de mallas superiores y tres hileras de mallas inferiores como se muestra en la imagen (Fig. 4.25).



**Fig. 4. 25 Subensamle inicial**

Una vez que este subensamle esta completo, se realiza un levantamiento del mismo para poder colocar las primeras columnas que darán soporte. En esta etapa se puede observar la manipulación de una pieza pesada, donde el levantamiento se realiza utilizando malacates y andamios (Fig. 4.26).



**Fig. 4. 26 Levantamiento del subensamle inicial**

Una vez que se ha levantado la primera hilera, se hace el ensamble del nodo de soporte. Este ensamble es similar al ensamble de cualquier nodo inferior, la única diferencia es que el tornillo se sustituye por la cuerda del soporte que conecta las mallas con la columna. Este ensamble se suelda debido a los esfuerzos que soportará al sostener la estructura.

A continuación se suelda una base a la columna existente en el edificio y posteriormente, se suelda a ésta, la columna de menor longitud. En la

colocación de la columna (Fig. 4.27) se lleva a cabo un proceso de nivelado para asegurar que no exista inclinación en la misma.



**Fig. 4. 27** Colocación de la columna sobre la base

Posteriormente el soporte se coloca sobre la superficie plana de la columna para ser alineado y nivelado. La alineación se logra mediante operaciones de ajuste que consisten en golpes con martillo y el nivelado se hace con un nivel de burbuja. Una vez logrado esto se suelda el soporte a la columna (Fig.4.28).



**Fig. 4. 28** Colocación y soldadura del nodo de soporte

La colocación de la base, la columna y el soporte se realiza en ambos lados de la estructura.

#### ▪ 2ª ETAPA

En esta etapa se realiza el ensamble de la parte central de la estructura (Fig. 4.29). La finalidad de realizar el ensamble únicamente de las tres hileras centrales de nodos superiores es lograr la curvatura necesaria para rodear el elevador. Para lograr dicha curvatura es necesario levantar la estructura para posteriormente colocar las columnas de soporte. Debido a que el peso de la estructura es grande, se ensambla únicamente la parte central para que el manejo sea más fácil.



**Fig. 4. 29** Ensamble de las hileras centrales

Una vez ensamblados los nodos superiores e inferiores de la parte central de la estructura, éstos se apoyan en el techo del elevador. Como se puede observar en la imagen anterior (Fig. 4.29), el manejo de la carga de la estructura se realiza mediante el uso de tubos de aluminio o palos de madera que se apoyan en los nodos inferiores para dar soporte provisional hasta poder fijar las siguientes columnas.

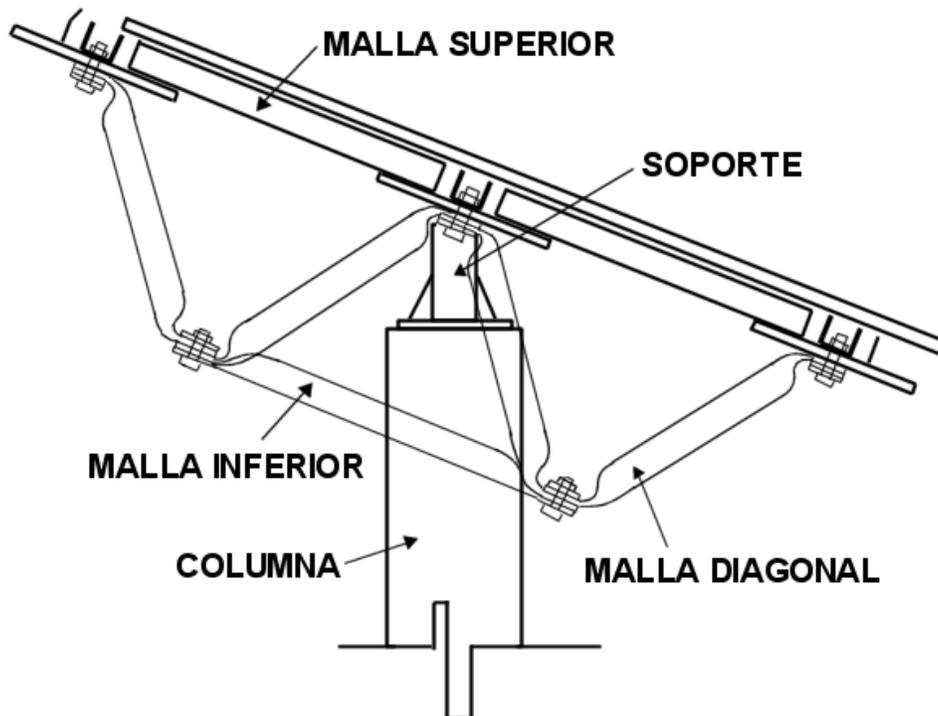
Una vez que se ha logrado apoyar la estructura en el techo del elevador, se procede a levantarla mediante el uso de palancas y se ajustan los soportes de madera y aluminio para conservar la altura lograda (Fig. 4.30).



**Fig. 4. 30** Levantamiento de las hileras centrales

▪ **3ª ETAPA**

En esta etapa se completan los costados de la estructura y se continúa el ensamble hasta llegar a la zona donde se apoyarán las siguientes columnas. Se realiza el ensamble de los soportes en los nodos que se conectarán a la columna de igual manera que los ensamblados previamente pero con la diferencia de que se les da una inclinación a los mismos como se muestra en la siguiente imagen (Fig. 4.31).



**Fig. 4. 31** Detalle del apoyo en la parte media de la estructura

Una vez que se ha completado este ensamble, se coloca, nivela y suelda una base a la columna existente en el inmueble, y se coloca y nivela también la columna de mayor longitud. En este punto se sujeta la estructura a la columna con el uso de un malacate para posicionar el soporte en el sitio correcto (Fig. 4.32). Posteriormente, éste se nivela y suelda a la columna. La colocación de la base, la columna y el soporte se realiza en ambos lados de la estructura (Fig.4.33).



**Fig. 4. 32** Sujeción de la columna a la estructura



**Fig. 4. 33** Vista lateral de la primera mitad de la estructura

#### ▪ **4ª ETAPA**

En esta etapa se completa el ensamble de todos los nodos inferiores y superiores exceptuando los nodos superiores que se ubican en los bordes de la

estructura (Fig. 4.34). También se colocan los últimos dos soportes en las esquinas de la estructura.



**Fig. 4.34** Ensamble de las mallas de la segunda mitad de la estructura

Una vez que se ha finalizado el ensamble de las mallas y los soportes, se colocan, nivelan y sueldan tanto las bases como las columnas de longitud mediana. Para la colocación de las columnas se hace una segunda operación de levantamiento mediante el uso de palancas y andamios hasta superar la altura de las columnas (Fig. 4.35).



**Fig. 4.35** Levantamiento de la estructura para la colocación de soporte y columna

El ensamble de las columnas se realiza colocando primero la columna del lado derecho y luego la del lado izquierdo (Fig. 4.36). Estas operaciones son similares a las del ensamble de las otras columnas; sin embargo, en el ensamble de la última columna se lleva a cabo la mayor operación de ajuste (Fig. 4.37). Esto se debe a que ésta es la última pieza que tiene la función de dar soporte a la estructura, es por ello que la nivelación de la misma y la del soporte que se soldará a ella requirieron de un tiempo considerablemente mayor al de las otras columnas.



**Fig. 4. 36** Colocación y nivelación de las columnas derecha e izquierda



**Fig. 4. 37** Ajuste de la columna del lado izquierdo

### ▪ 5ª ETAPA

En esta etapa se realiza el ensamble de los nodos superiores ubicados en los bordes de la estructura. En esta etapa los elementos que se añaden son mallas superiores y tornillos cortos para sujetarlas, únicamente en las esquinas se añaden uniones triangulares de tres barrenos. Es conveniente resaltar que esta etapa presenta dos operaciones de ajuste importantes que se describen a continuación.

En el ensamble de los nodos superiores, la dificultad de inserción es grande debido a la curvatura de la estructura. Esta dificultad se incrementa en los bordes debido a que en esta zona se debe lograr la cuadratura de la estructura. En el proceso observado, el ajuste en los bordes para lograr la inserción de la malla superior en el relieve se logra utilizando un cincel a modo de palanca que alinea los barrenos donde se alojará el tornillo (Fig. 4.38), y con ello, se logra alinear el relieve de las uniones triangulares con su barreno correspondiente.



**Fig. 4. 38** Alineación de los barrenos empleando un cincel

La inserción del tornillo también resulta complicada en los bordes, por lo que el ajuste se realiza golpeando la malla superior con el pie hasta que se alineen completamente los barrenos con la finalidad de que el tornillo no se encuentre inclinado para así poder dar el torque necesario con la herramienta.

En esta etapa también se sueldan las placas al costado de cada nodo ubicado en los bordes. Las placas planas se sueldan a los bordes laterales y al borde anterior, mientras que las placas con doblez se sueldan a los nodos del borde posterior (Fig. 4.39). Ambos tipos de placa se colocan en los nodos para proveer de una superficie de sujeción para los faldones. Para el ensamble de las placas se requiere una operación adicional que consiste en limar los bordes redondos que sobresalen de las mallas diagonales e inferiores (Fig. 4.40).



**Fig. 4. 3939** Ensamble de una placa plana y una placa con doblez



**Fig. 4. 4040** Limado de los bordes de las mallas

#### ▪ **6ª ETAPA**

En esta etapa se ensamblan los faldones. Cada faldón vertical abarca la distancia comprendida entre un nodo del borde de la estructura y la barda de concreto del inmueble, la cual se ubica a 90 cm del nivel del piso (Fig. 4.41). Los faldones horizontales abarcan la distancia comprendida entre faldones

verticales. El ensamble se realiza mediante un proceso de soldadura. Para la ubicación exacta de cada faldón no existe un guía que indique la posición exacta donde debe ensamblarse, únicamente se busca centrar el faldón en la placa que cubre lateralmente a cada nodo.



**Fig. 4. 41** Ubicación de los faldones en la estructura

#### ▪ **7ª ETAPA**

En esta etapa se ensamblan los canalones y se aplica pintura en las áreas en que hay soldadura. El ensamble de los canalones se realiza mediante un proceso de soldadura en el cual cada canalón se suelda a un nodo a lo largo de todo el borde anterior de la estructura (Fig. 4.42).



**Fig. 4. 42** Ubicación de los canalones en la estructura

El proceso de ensamble se concluyó en 9 días por 3 trabajadores, con un total aproximado de 140 horas de trabajo. El resultado final se muestra a continuación (Fig. 4.43 y 4.44).



**Fig. 4. 43** Vista frontal final de la estructura



**Fig. 4. 44** Vista final de la estructura

#### **IV.4. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE EL MÉTODO BOOTHROYD**

De acuerdo al método Boothroyd, a cada pieza se le asignan un código de manipulación y uno de inserción asociados a las características en que se llevan a cabo dichas operaciones. Con base en estas características, el método propone una estimación del tiempo para manipular e insertar cada pieza. El

código asociado a cada pieza y los tiempos requeridos para manipulación e inserción se presentan en la tabla siguiente (Tabla 4.1).

PIEZA	CÓDIGO DE MANIPULACIÓN	TIEMPO DE MANIPULACIÓN [s]	CÓDIGO DE INSERCIÓN	TIEMPO DE INSERCIÓN [s]
Mallas diagonales	91	3	01,98	11.5
Mallas superiores	91	3	01,98	11.5
Mallas inferiores	90	2	01,98	11.5
Uniones cuadradas	20	1.8	00,98	10.5
Uniones triangulares	30	1.95	00,98	10.5
Tornillo	10	1.5	09,98	16.5
Tuerca	00	1.13	39,98	17
Columna	99	9	02,95,98	19.5
Soporte	95	4	02,95,98	19.5
Base	91	3	00,95,98	18.5
Rondana	00	1.13	01,98	11.5
Faldón	92	2	08,95,98	23.5
Placa	10	1.5	06,95,98	22.5
Canalón	83	5.6	06,95,98	22.5

**Tabla 4.1** Códigos y tiempos de ensamble del método Boothroyd asociados a cada pieza

Cabe resaltar que todas las piezas se manipulan, por lo tanto, todas las piezas se penalizan con 9 segundos aumentando considerablemente el tiempo de ensamble estimado.

Con base en el tiempo propuesto para la manipulación y la inserción de cada pieza, el tiempo total de ensamble de la estructura se muestra en la siguiente tabla (Tabla 4.2).

PIEZA	NÚMERO DE PIEZAS	TIEMPO DE MANIPULACIÓN [s]	TIEMPO DE INSERCIÓN [s]	TIEMPO TOTAL DE ENSAMBLE [min]
Mallas diagonales	660	3	11.5	159.5
Mallas superiores	356	3	11.5	86.03
Mallas inferiores	304	2	11.5	68.4
Uniones cuadradas	140	1.8	10.5	28.7
Uniones triangulares	52	1.95	10.5	10.79

PIEZA	NÚMERO DE PIEZAS	TIEMPO DE MANIPULACIÓN [s]	TIEMPO DE INSERCIÓN [s]	TIEMPO TOTAL DE ENSAMBLE [min]
Tornillo	1069	1.5	16.5	320.7
Tuerca	1069	1.13	17	323.02
Columna	6	9	19.5	2.85
Soporte	6	4	19.5	2.35
Base	6	3	18.5	2.15
Rondana	104	1.13	11.5	21.9
Faldón	148	2	23.5	62.9
Placa	56	1.5	22.5	22.4
Canalón	12	5.6	22.5	5.62

**Tiempo total estimado de ensamble 1117.3015**

**Tabla 4.2** Estimación del tiempo total de ensamble de la estructura

Como se puede observar, el tiempo total de ensamble estimado mediante el método Boothroyd es de 18 horas con 37 minutos aproximadamente. Este tiempo difiere del tiempo real en el que se realizó el ensamble en más de 120 horas. Una de las razones que pueden ser la causa de esta diferencia es que el método considera que el proceso se realiza en condiciones ideales del área de trabajo y no considera tiempos de descanso, el ritmo de trabajo de los trabajadores, el tiempo de preparación de equipos ni el tiempo de traslado de los trabajadores encima de la estructura, teniendo estos factores un gran impacto en el tiempo total de ensamble.

Sin embargo, otra causa que también influye es que las estimaciones de tiempo que propone el método, sobre todo en la etapa de manipulación, no diferencian entre piezas con distinto peso. Un claro ejemplo es la evaluación de las columnas, que aunque presentan tres tamaños y pesos diferentes, se estima que su manipulación, orientación e inserción se realizan en 28.5 segundos. En realidad el tiempo requerido es mucho mayor y cada una requiere un tiempo diferente debido al peso y a la longitud de las mismas. Estas columnas son piezas grandes y pesadas cuya evaluación no se puede realizar con los métodos existentes.

Por otro lado, en el caso de las operaciones de ajuste, como lo es la nivelación de las piezas de la estructura, se considera un tiempo único sin considerar el tipo y facilidad de realización del ajuste. En la industria de la construcción las operaciones de nivelación son esenciales y se emplean gran cantidad de piezas grandes y pesadas, por lo que el método utilizado presenta grandes limitaciones para evaluar este tipo de piezas.

Es importante resaltar que la mayoría de las piezas que se utilizan en la estructura, se clasifican como piezas en las que se requieren dos manos para ser manipuladas debido al gran tamaño. Entre dichas piezas existen algunas cuyas dimensiones son mayores a un metro o cuyo peso es mayor a cinco kilogramos, por ejemplo, las columnas y los faldones. Las piezas restantes poseen dimensiones ligeramente menores a un metro, y con peso ligeramente inferior a 5 kilogramos, por lo que se pueden considerar como piezas medianas.

Adicionalmente, se puede observar que en el proceso de ensamble se maneja un subensamble clasificable como pieza grande y pesada, cuyo análisis tampoco es posible con el método Boothroyd, pues éste estima que la manipulación de dicho subensamble se realiza en 9 segundos y este tiempo difiere mucho del tiempo real.

Es importante observar que la secuencia de ensamble también tiene gran impacto en el tiempo requerido para el mismo, puesto que el manejo de diferentes subensambles y un orden diferente de las operaciones generan diferentes tiempos de ensamble.

# V. Análisis del proceso de ensamble de la estructura metálica

---

## V. ANÁLISIS DEL PROCESO DE ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

El proceso de ensamble de la estructura metálica se describió en el capítulo IV. La descripción del método actual es esencial para poder realizar el análisis del proceso, el cual se muestra en el presente capítulo y resalta las áreas dónde se pueden implementar mejoras al proceso.

El análisis del proceso de ensamble consta de dos secciones. La primera sección incluye el cursograma analítico de las actividades generales del proceso con el objeto de evaluar la necesidad de realizarlas, la posibilidad de eliminarlas y las modificaciones convenientes. La segunda sección se enfoca en el análisis de la facilidad de ensamble de las piezas respecto a su manipulación, inserción y ajuste.

### V.1. Cursograma analítico y clasificación de las actividades

El cursograma analítico es una herramienta que sirve para realizar el estudio de métodos. En este caso se analiza el proceso de manera general para identificar las operaciones no esenciales del proceso. El proceso de ensamble se muestra en el siguiente cursograma (Tabla 5.1).

CURSOGRAMA ANALÍTICO							
DIAGRAMA: 1	RESUMEN						
OBJETO: Estructura metálica	ACTIVIDAD					ACTUAL	
	OPERACIÓN	○					51
ACTIVIDAD: Proceso de ensamble	TRANSPORTE	⇒					17
	DEMORA	⊖					1
MÉTODO Actual	INSPECCIÓN	□					5
LUGAR: Xochimilco, último nivel del edificio	ALMACENAMIENTO	▽					0
	<b>TOTAL</b>						<b>74</b>
NÚMERO DE OPERARIOS: 3							
COMPUESTO POR: 3988 piezas	FECHA: 5-14 noviembre 2009						
DESCRIPCIÓN	○	⇒	⊖	□	▽	OBSERVACIONES	
Transporte de piezas al último piso del edificio		X					
Almacenamiento de las piezas en el último piso			X			Se almacenan en el piso inferior al área de ensamble.	

DESCRIPCIÓN	○	➔	◐	◻	▽	OBSERVACIONES
Traslado de algunas piezas hacia los nodos de ensamble		X				
Ensamble de las primeras 2 hileras de mallas superiores	X					No se ensamblan los nodos de los extremos
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento del subensamble previo	X					Se realiza con andamios, cuerdas y malacates
Subir las bases a la azotea		X				
Colocación del primer par de bases sobre las columnas del edificio	X					1 operario
Nivelación del primer par de bases	X					Se utiliza un nivel de burbuja
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las bases	X					Soldadura eléctrica
Subir las columnas a la azotea		X				Con malacates, lazos y andamios.
Colocación de las columnas cortas sobre las bases	X					2 operarios manualmente
Nivelación de las columnas cortas	X					Se utiliza una plomada
Soldadura de las columnas cortas	X					Soldadura eléctrica
Subir un par de soportes		X				
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Colocación de los soportes sobre las columnas	X					Uso de malacates, lazos y andamios
Nivelación de los soportes sobre las columnas	X					Con plomada y ajuste con martillo
Soldadura de los soportes	X					Soldadura eléctrica
Subir piezas al punto de ensamble		X				
Ensamble de las tres hileras centrales de la primer mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento de las hileras centrales	X					Con palancas de madera o metal, 2 operarios
Subir piezas al punto de ensamble		X				
Ensamble de las hileras laterales hasta la mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		

DESCRIPCIÓN	○	⇨	◐	□	▽	OBSERVACIONES
Levantamiento del subensamble previo	X					Con palancas de madera o metal, 3 operarios
Subir el segundo par de bases		X				
Colocación del segundo par de bases	X					1 operario
Nivelación del segundo par de bases	X					Se utiliza un nivel de burbuja
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las bases	X					Soldadura eléctrica
Subir columnas largas		X				3 operarios con malacates
Colocación de las columnas largas	X					2 operarios
Nivelación de las columnas largas	X					Se utiliza una plomada
Soldadura de las columnas largas	X					Soldadura eléctrica
Subir el segundo par de soportes		X				
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Colocación de los soportes sobre las columnas	X					Con ayuda de malacates
Nivelación de los soportes sobre las columnas	X					Con plomada y ajuste con martillo
Soldadura de los soportes	X					Soldadura eléctrica
Subir piezas al punto de ensamble		X				
Ensamble de las mallas de la segunda mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento del subensamble previo	X					Se utilizan palancas de madera y andamios
Subir el tercer par de bases		X				
Colocación del tercer par de bases	X					1 operario
Nivelación del tercer par de bases	X					Se utiliza un nivel de burbuja
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las bases	X					Soldadura eléctrica
Subir columnas medianas	X					2 operarios con malacates
Colocación de las columnas medianas	X					2 operarios

DESCRIPCIÓN	○	⇨	◐	□	▽	OBSERVACIONES
Nivelación de las columnas medianas	X					Se utiliza una plomada
Soldadura de las columnas medianas	X					Soldadura eléctrica
Subir el último par de soportes		X				
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Colocación de los soportes sobre las columnas	X					
Nivelación de los soportes sobre las columnas	X					Con plomada y ajuste con martillo
Soldadura de los soportes	X					Soldadura eléctrica
Subir piezas al punto de ensamble		X				
Ensamble del borde de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Subir placas al punto de ensamble		X				
Colocar y centrar placas en los nodos del borde	X					
Soldadura de las placas	X					Soldadura eléctrica
Subir faldones al punto de ensamble		X				1 ó 2 operarios
Soldadura de faldones a los costados de la estructura	X					Soldadura eléctrica
Subir canalones al punto de ensambles		X				
Soldadura de canalones	X					Soldadura eléctrica
Aplicación de pintura	X					En zonas de soldadura

**Tabla 5. 1** Cursograma analítico del proceso de ensamble

Este cursograma muestra la secuencia de las operaciones empleada para el ensamble de la estructura. Como se puede observar, únicamente el transporte inicial, el manejo de las piezas, los levantamientos a lo largo del proceso y las nivelaciones de ciertas piezas de la estructura son actividades de preparación, mientras que el ensamble y colocación de los componentes de la estructura son operaciones activas. En este caso no existen operaciones de salida debido a que el ensamble se efectúa en el lugar donde se requiere el producto.

Las actividades de preparación son susceptibles de ser eliminadas; sin embargo, en este caso, el transporte desde la planta hasta el último piso del edificio, el levantamiento de las secciones de la estructura y la nivelación son esenciales debido al manejo de subensambles pesados, el lugar de ensamble y el tipo de producto. La operación de transporte desde el último piso hasta la azotea podría ser eliminada para disminuir el tiempo.

En el caso de los métodos empleados en el levantamiento y nivelación son inadecuados. El levantamiento se hace mediante el uso de palos de madera o metal, ladrillos, palancas y andamios. Este método representa no sólo riesgo para los trabajadores sino una gran carga de trabajo y esfuerzo que se podría evitar con un método diferente.

En el caso de la nivelación, el nivel de burbuja y la plomada son adecuados para lograr el objetivo; sin embargo, el ajuste se realiza golpeando los soportes con un martillo. Este método de ajuste no proporciona un control sobre los movimientos y daña el acabado de la pieza, por lo que un método diferente puede agilizar y facilitar la operación sin dañar la pieza.

Las operaciones de ensamble y soldadura son operaciones activas. El ensamble de las mallas es un proceso realizado por trabajadores, quienes se suben a la estructura con el riesgo de sufrir una caída, por lo que debería de incrementarse la seguridad. En la operación de soldadura tampoco se utilizan todas las medidas de seguridad adecuadas. Los operarios utilizan careta pero no se colocan equipo de protección corporal como guantes, peto o polainas.

Por último, en la etapa de diseño, es necesario evitar la necesidad de agregar piezas de ajuste a un ensamble tan extenso. Esta situación se da en el caso de las bases, las cuales requirieron un tiempo considerable de colocación, nivelado y soldadura, siendo estas operaciones más tardadas y complejas que el ensamble de las mallas.

## V.2. Análisis de la facilidad de ensamble de las piezas

En esta sección se analiza el diseño de las piezas para ver la facilidad de ensamble de cada una y resaltar los aspectos en que el diseño actual es deficiente y susceptible de mejora. Este análisis se basa en las características que, según las reglas generales y los métodos de DFA, facilitan el ensamble. En la siguiente tabla (Tabla 5.2) se resumen dichas características.

Pieza	Fácil sujeción sin ayudas	Se atoran o enganchan o son flexibles	Piezas resbalosas, pegajosas o delicadas	Sujeción constante durante el ensamble	Ayudas para alinear o posicionar	Resistencia a la inserción	Requiere operaciones adicionales: atornillado, etc.	Necesidad de reorientación	Necesidad de ajustes	$\alpha$ ó $\beta = 360$
Mallas diagonales	Sí	No	No	No	No	Sí	No	No	No	No
Mallas superiores	Sí	No	No	No	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí
Mallas inferiores	Sí	No	No	No	No	Sí	No	No	No	No
Uniones cuadradas	Sí	No	No	No	Sí	Sí	No	No	No	Sí
Uniones triangulares	Sí	No	No	No	Sí	Sí	No	No	No	Sí
Tornillo	Sí	No	No	Sí	No	Sí	No	No	No	Sí
Tuerca	Sí	No	No	No	No	No	Sí	No	No	No
Columna	No	No	No	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí
Soporte	Sí	No	No	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Base	Sí	No	No	No	No	No	Sí	No	No	Sí
Rondana	Sí	No	No	No	No	Sí	No	No	No	No
Faldón	No	No	No	Sí	No	No	Sí	No	No	No
Placa	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	No	No	No
Canalón	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí	No	No	Sí

**Tabla 5. 2** Características de las piezas de la estructura

La geometría de cada pieza ya incluye algunos elementos que facilitan el ensamble; sin embargo, existen modificaciones que pueden reducir el tiempo de orientación y ajuste. A continuación se resumen las características presentes y ausentes en la geometría original de cada pieza y las posibles modificaciones de la misma que faciliten el ensamble.

### *V.2.1. FACILIDAD DE SUJECIÓN*

En este aspecto las piezas en general son fáciles de sujetar exceptuando las piezas más largas y pesadas: columnas y faldones. En este caso, por el tipo de producto no es factible cambiar las dimensiones de estas piezas; sin embargo, estas piezas no presentan ayudas para facilitar la manipulación de las piezas.

### *V.2.2. EVITAR PIEZAS QUE SE ATOREN, ENGANCHEN, DOBLEN, ETC.*

En este caso, todas las piezas poseen geometrías que no permiten que las piezas se enganchen o atoren.

### *V.2.3. EVITAR MATERIALES RESBALOSOS, PEGAJOSOS O DELICADOS*

Las piezas no presentan ninguno de estos problemas ya que el material de fabricación no posee características que las hagan resbalosas, flexibles, pegajosas o delicadas.

### *V.2.4. NECESIDAD DE SUJECIÓN DURANTE EL ENSAMBLE*

En este aspecto, algunas piezas requieren de sujeción constante durante el ensamble y las operaciones adicionales. Estas piezas son los tornillos, placas, canalones y faldones. Como se puede ver en la descripción de los elementos, 1285 piezas requieren sujeción y evitan que la mano del operador realice otra actividad, por lo que eliminar la sujeción durante el ensamble puede traer considerables beneficios.

### *V.2.5. AYUDAS DE AUTOLOCALIZACIÓN*

En este aspecto algunas piezas ya poseen características que asisten el posicionamiento de la pieza como es el caso de las uniones; sin embargo, el relieve permite la rotación de las mallas superiores antes de insertar el tornillo lo cual genera la necesidad de un ajuste para poder insertarlo. Hay otras piezas que requieren un ajuste considerable para la localización como las columnas, soportes y faldones por lo que resultaría conveniente incluir elementos que

posicionen estas piezas rápida y fácilmente. Otras piezas que podrían incluir elementos para posicionarlas son las placas y los canalones.

#### *V.2.6. RESISTENCIA A LA INSERCIÓN*

En este aspecto existen piezas que presentan una resistencia a la inserción. Estas piezas son los tres tipos de mallas y las rondanas, que al ensamblarse en los tornillos o en los soportes, se atascan ligeramente o requieren una fuerza adicional para lograr la inserción, esto sucede también con los barrenos de las uniones. Este aspecto podría eliminarse redimensionando los barrenos, colocando guías de inserción o cambiando el tipo de sujetador.

#### *V.2.7. OPERACIONES ADICIONALES*

Es este proceso de ensamble existen muchas piezas que requieren operaciones adicionales, en su mayoría de soldadura o atornillado. Las piezas que requieren estas operaciones son las tuercas, columnas, soportes, bases, faldones, placas y canalones. El total de estas piezas es de 1303 por lo que una gran cantidad de operaciones adicionales pueden reducirse añadiendo elementos de sujeción autónoma.

#### *V.2.8. REORIENTACIÓN*

En este caso, no es necesario reorientar las piezas o subensambles debido a que se colocan en el sitio final y casi todas se aseguran en el sitio y posición que ocuparán definitivamente. Las únicas reorientaciones que se llevan a cabo son los reposicionamientos de la estructura a lo largo del ensamble para elevarla y rodear el elevador, siendo estas reorientaciones complejas y con una gran carga de trabajo.

#### *V.2.9. AJUSTES*

Existen piezas que requieren ajustes adicionales posteriores a su inserción, como las mallas superiores, las columnas y los soportes. El ajuste en las mallas se da en el borde de la estructura y se deriva de las mallas superiores rotan ligeramente, desalineando los barrenos por los que atraviesa el tornillo, por ello, quien realiza el ensamble patear la malla para lograr la alineación y

poder atornillar. El ajuste de las columnas y soportes es una de las operaciones que requieren más tiempo, por lo que sería conveniente eliminarla.

#### *V.2.10. SIMETRÍA DE LAS PIEZAS*

Las piezas, en general, presentan valores  $\alpha$  y  $\beta$  menores o iguales a 180. Las mallas diagonales e inferiores tienen la mayor simetría posible, así como los faldones, las placas y las tuercas. Las uniones y las mallas superiores presentan también cierta simetría. Dicha simetría es menor que la de las demás piezas pero no es posible incrementarla debido a que la asimetría forma la curvatura de la estructura. Por lo tanto, las piezas susceptibles de un incremento en la simetría son las rondanas, los canalones y las bases.

# VI. Propuestas de mejora para el proceso de ensamble

## **VI. PROPUESTAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE ENSAMBLE**

En el presente capítulo se describen las modificaciones propuestas al proceso de ensamble con base en el análisis de dicho proceso. Las modificaciones involucran tanto a la geometría de las piezas como a las etapas del ensamble.

### ***VI.1. PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS PIEZAS***

La geometría de las piezas facilita o complica su ensamble. Es por ello que se proponen algunas modificaciones para las piezas que requieren mayor tiempo de ensamble.

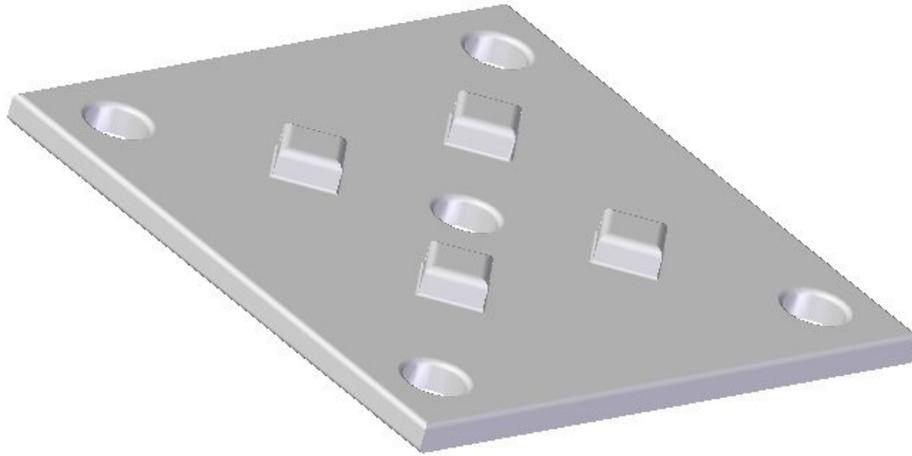
#### ***MALLAS DIAGONALES E INFERIORES***

Estas piezas poseen cierta resistencia a ser insertadas en los tornillos. Cerca de 1000 piezas son mallas diagonales e inferiores por lo que se puede ahorrar una cantidad considerable de tiempo si se elimina esta resistencia. Una alternativa es incluir chaflanes en los barrenos de las mallas para guiar la inserción del tornillo. Esta alternativa presenta el inconveniente de incrementar el tiempo de producción de las mismas y, por consiguiente, incrementar su costo. Por ello se propone una segunda alternativa que es incrementar ligeramente el diámetro del barreno, este incremento deberá ser mínimo para no afectar la funcionalidad de las mallas pero reducirá la dificultad y el tiempo de inserción.

#### ***UNIONES CUADRADAS Y TRIANGULARES***

En estas piezas se presenta un relieve circular que funciona como elemento guía para alinear un par de barrenos donde se insertará un tornillo; sin embargo, la alineación no se logra en las mallas del borde de la estructura debido a que éstas rotan ligeramente haciendo necesaria una operación de ajuste. Es por ello que se propone cambiar la geometría de dicho relieve de tal manera que la malla no pueda rotar. Se sugiere una geometría cuadrada que

localice la malla en el ángulo correcto de ensamble. La geometría del relieve, aplicable a uniones cuadradas y triangulares, se muestra a continuación (Fig. 6.1).



**Fig. 6.1** Geometría propuesta para el relieve de las uniones

### *MALLAS SUPERIORES*

La geometría de estas mallas incluye un par de barrenos en cada extremo, los cuales también presentan cierta resistencia a la inserción. La propuesta consiste en incrementar ligeramente el diámetro del barrero en el cual se inserta el tornillo, y que el otro barreno tenga una geometría cuadrada acorde a la modificación del relieve de las uniones cuadradas y triangulares. Este segundo barreno deberá ser de dimensiones tales que el perímetro de troquelado se conserve constante para no requerir mayor energía. La geometría propuesta se muestra en la siguiente imagen (Fig. 6.2).

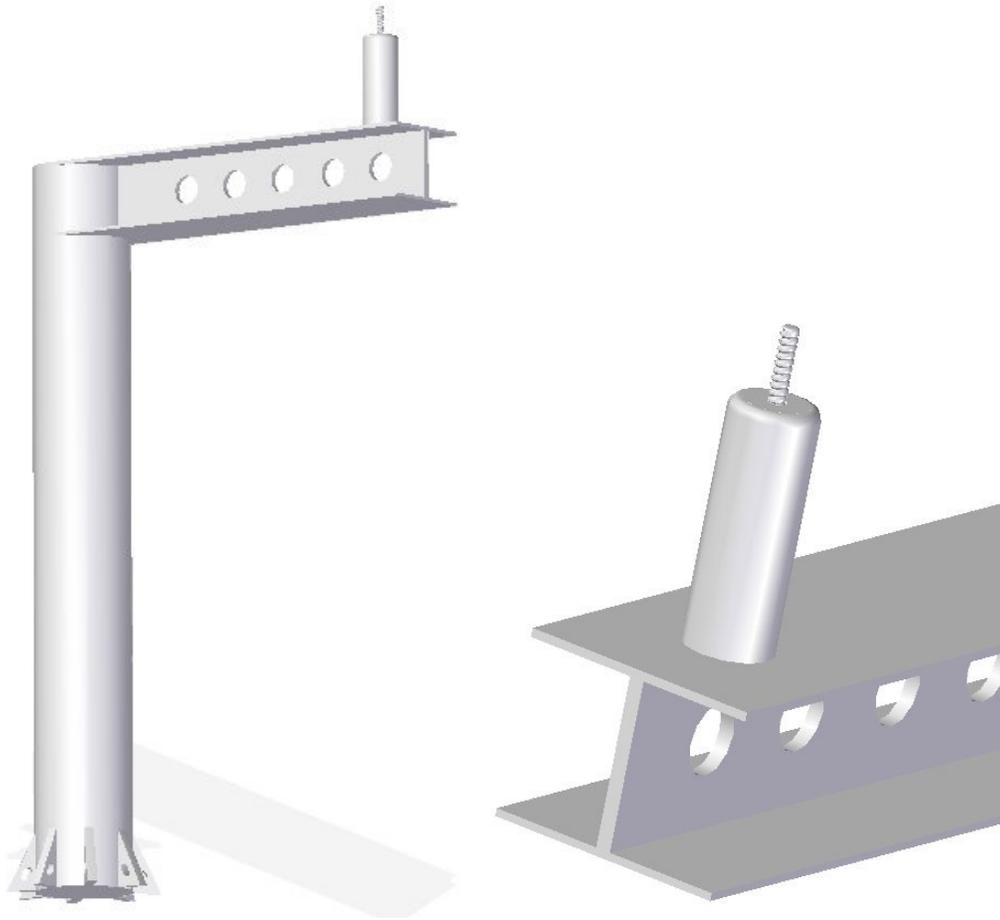


**Fig. 6.2** Geometría propuesta para las mallas superiores

### *COLUMNAS Y SOPORTES*

Las columnas son las piezas con la mayor dificultad de manipulación debido a su gran peso y tamaño. Por lo anterior, se sugiere añadir ayudas de sujeción

para facilitar la manipulación de las mismas. En este caso se añadieron orificios que faciliten la sujeción de las herramientas necesarias para la manipulación. Los soportes son las piezas que mayor tiempo de ajuste requieren por lo que se propone fusionar las columnas con los soportes para eliminar la necesidad de nivelar y ajustar en el sitio de ensamble. La geometría propuesta se presenta en la siguiente imagen (Fig. 6.3).



**Fig. 6. 3 Geometría propuesta para las columnas**

### ***RONDANAS***

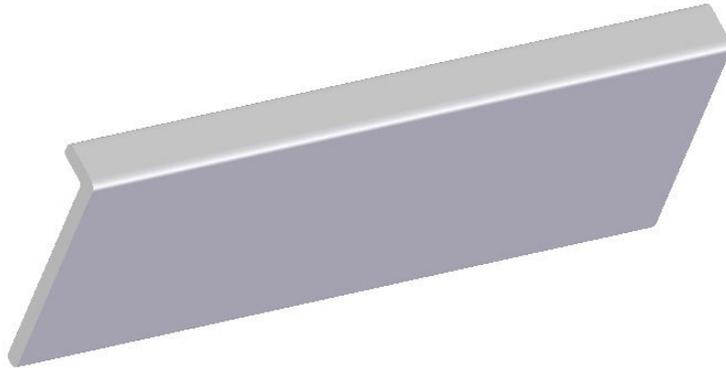
De igual manera que en el caso de las mallas, los barrenos de las rondanas presentan resistencia a la inserción. Por ello, se propone fabricar rondanas con un barreno de diámetro ligeramente mayor y de geometría redonda para evitar la necesidad de alinear los bordes planos. Esta nueva forma cumple la misma función usando menos material. La geometría sugerida para las rondanas se muestra en la siguiente imagen (Fig. 6.4).



**Fig. 6. 4 Geometría propuesta para las rondanas**

### *PLACAS*

Estas piezas requieren de un proceso de soldadura y de sujeción constante mientras se ensamblan, por lo tanto, se propone una geometría en ángulo recto para que se sostenga por sí misma permitiendo al trabajador utilizar su mano para alguna otra actividad y que la pieza quede alineada a las mallas superiores. La geometría propuesta es la siguiente (Fig. 6.5).



**Fig. 6. 5 Geometría propuesta para las placas**

### *CANALONES*

Estas piezas son susceptibles de una modificación para tener simetría y así reducir el tiempo de orientación. Esta modificación consiste en igualar la longitud de ambos lados del canalón para poder orientarlos con mayor rapidez. La geometría sugerida es la siguiente (Fig. 6.6).



**Fig. 6. 6 Geometría propuesta para los canalones**

## ***VI.2. PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN AL MÉTODO DE MANIPULACIÓN***

En relación con la manipulación se propone modificar el método de transporte puesto que una gran cantidad de tiempo es empleada para el traslado de las piezas desde el último piso del edificio a la azotea. Este tiempo podría ahorrarse eliminando dicho transporte y trasladando las piezas lo más próximo al punto de ensamble en el transporte inicial. Como se puede observar en el cursograma analítico del proceso (Tabla 5.1), las actividades de transporte representan un 23% del total, por lo que resultaría conveniente reducir la cantidad de transportes a realizar o emplear un método diferente que ocupe menos tiempo.

En este caso, es necesario considerar que el único acceso a la azotea del edificio será el elevador que se instalará posteriormente. El medio provisional de acceso es una escalera de aluminio. Esta situación genera que durante un largo tiempo, la mitad de los trabajadores se dediquen únicamente a transportar piezas mientras que los demás realizan la operación de ensamble, por este motivo, se sugiere que las piezas se transporten inicialmente lo más cerca al punto de ensamble. Además, el conjuntar los transportes en una sola actividad permite que éste se realice de manera más rápida eliminando el tiempo necesario para preparar las herramientas cada vez que se quiera realizar el transporte de alguna pieza.

Un método alternativo para realizar el transporte podría ser elevando un contenedor con una polea o un trinquete. Dicho contenedor debe tener la capacidad suficiente para transportar cualquier pieza mediana, es decir, exceptuando a las columnas y a los faldones. La capacidad propuesta es de 100 x 30 x 30 cm. Este método permitirá reducir el tiempo de transporte y manejar más fácilmente la carga acercando las piezas lo más posible al lugar final de ensamble. Para llegar hasta el nivel de la azotea, este sistema podría colocarse en el espacio que ocupará el elevador ya que tiene una trayectoria vertical sin obstáculos a lo largo de todo el inmueble y de dimensiones suficientes para contener este sistema.

En el caso de las columnas y los faldones, al ser piezas más pesadas, requieren mayor trabajo y esfuerzo para su transporte por lo que se propone simplificarlo empleando polipastos y sujetando las piezas por medio de las ayudas propuestas en la modificación de la geometría o del cuerpo tubular de las mismas (Fig. 6.3). Dicho transporte podría realizarse en un costado del edificio ya que el espacio del elevador resulta insuficiente.

Además de buscar un método de transporte más sencillo y rápido se pueden eliminar operaciones de transporte reduciendo el número de componentes dentro del diseño de la estructura. Debido a la importancia de la estética de la estructura, existen muchas partes que mecánicamente no resultan esenciales pero estéticamente sí son necesarias. Es por ello que las únicas piezas susceptibles de ser eliminadas son las bases, ya que fueron incluidas en este proyecto únicamente para corregir un error en los datos del mismo.

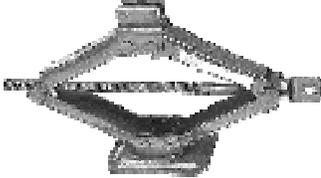
El añadir piezas adicionales al diseño original del proyecto requiere tiempo de manipulación, ajuste, nivelación y soldadura que pudo haber sido aprovechado en el ensamble de piezas esenciales. Por este motivo se sugiere hacer un análisis del lugar de ensamble registrando directamente del mismo la información más importante y no únicamente basarse en la información provista por el cliente. Esto puede ayudar también en la planeación del ensamble y la selección previa de herramientas adecuadas para manejar la carga.

Dentro de la manipulación es importante analizar también el método con el que se manipulan las cargas a lo largo del proceso. El levantamiento de las secciones de la estructura se realiza de maneras rudimentarias con palos de madera o metal que podrían no resistir el peso o resbalarse ocasionando un accidente. La propuesta consiste en modificar el método empleado para realizar dicho levantamiento.

El manejo de cargas muy pesadas suele realizarse con grúas para facilitar la manipulación; sin embargo, en este caso no puede realizarse con grúas debido al difícil acceso y complicado transporte de ésta a la zona de ensamble, por lo tanto, se propone elevar la estructura por debajo, y no por arriba, usando gatos mecánicos. Debido a la altura a la cual se debe elevar la estructura se sugiere utilizar gatos mecánicos para lograr parte de la elevación y utilizar soportes que cubran la altura necesaria restante, y sobre los cuales se puedan apoyar los gatos mecánicos.

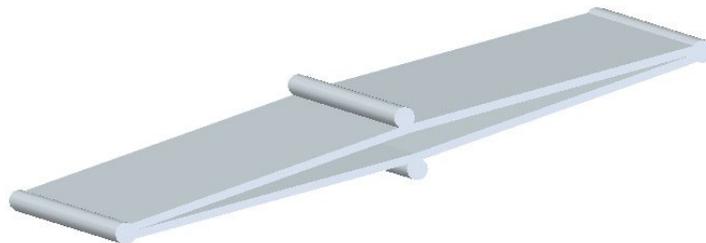
Un gato es una herramienta mecánica empleada para elevar cargas pesadas aplicando grandes fuerzas lineales que puede ser operado manualmente por una sola persona. Estas herramientas ofrecen ventaja mecánica para levantar varias toneladas mediante el giro de un tornillo que acerca o aleja los brazos del gato, elevando así el punto de unión de los mismos.

Se sugiere el uso de gatos mecánicos debido a que requieren poca superficie de apoyo, su peso es manejable por un operario y pueden alcanzar una altura considerable. La elección de los mismos depende de varios factores: la capacidad de carga, la altura máxima de elevación, el tamaño, el peso y la facilidad de manejo de los mismos. Ejemplos de los gatos mecánicos sugeridos son los siguientes (Tabla 6.1).

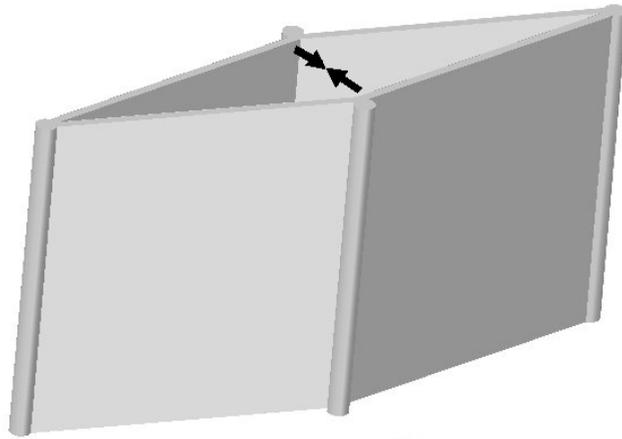
GATO MECÁNICO	FABRICANTE/ MARCA	CAPACIDAD	ALTURA MÁXIMA
	Jiangsu NAC Changsui Automobile Parts Co., Lt	1 Ton	350 mm
	Leon Weill S.A.	1.5 Ton	375 mm
	Crossman Co.	1 Ton	383 mm

**Tabla 6. 1** Ejemplos de gatos mecánicos para la elevación de la estructura

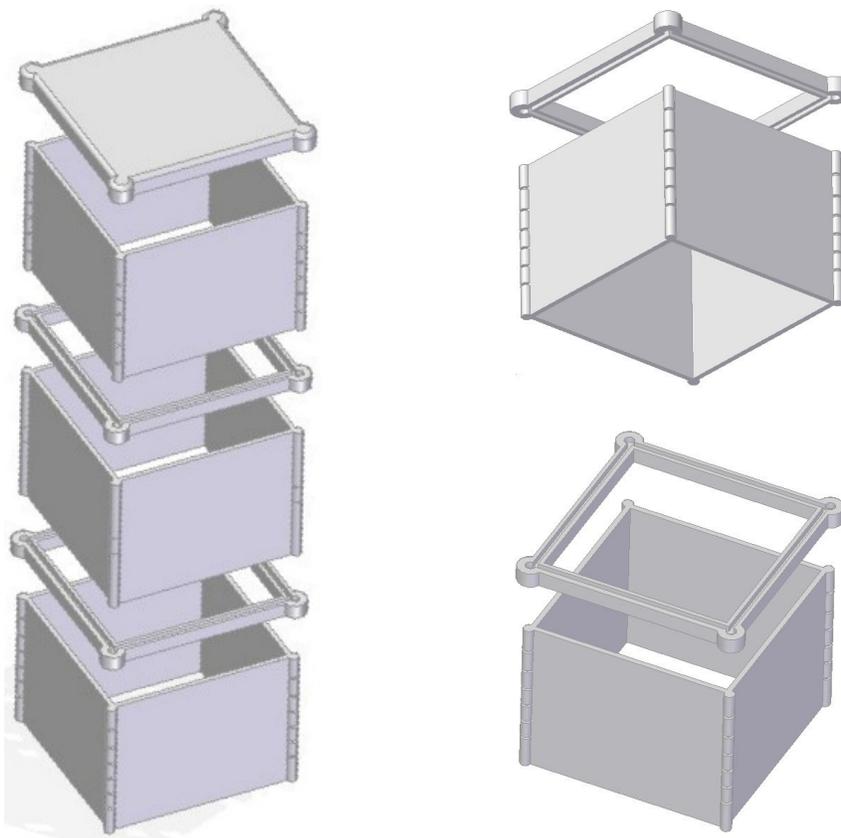
En el caso de los soportes, se sugiere que éstos sean ensamblables para poder ser utilizados en diferentes proyectos con diferentes necesidades de elevación y que ocupen poco espacio para su fácil transporte junto con las piezas de la estructura. Los soportes o bases que ayudarían a alcanzar la altura necesaria se muestran en las siguientes imágenes (Fig. 6.7, 6.8 y 6.9).



**Fig. 6. 7** Soporte plegado



**Fig. 6. 8** Soportes plegables



**Fig. 6. 9** Geometría de los soportes apilables para elevación

Los soportes pueden fabricarse con la misma materia prima con que se fabrican las uniones cuadradas y triangulares. El soporte se compone de cuatro láminas unidas con bisagras. Dichas bisagras se colocarán de manera que permitan el pliegue de las láminas como se muestra en la imagen (Fig. 6.7). Los soportes ya desplegados se unirán con un marco metálico. Este marco tendrá ranuras cuadradas para permitir la inserción de los soportes por ambos

lados, lo que mantendrá la geometría cuadrada y permitirá apilar varios soportes como se muestra en la imagen (Fig. 6.9).

El diseño propuesto ocupa poco espacio al permitir plegar los soportes, y por la geometría, provee resistencia suficiente para soportar el peso tanto del gato como de la carga a elevar. Estos soportes pretenden ser de fácil y rápido ensamble por lo que no se destinará gran parte del tiempo del proceso al mismo.

### ***VI.3. PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN AL MÉTODO DE UNIÓN***

Los métodos de unión empleados a lo largo del proceso son el uso de sujetadores (tornillos) y soldadura eléctrica. El uso de tornillos para el ensamble de los nodos no puede cambiarse debido a que el fabricante no desea usar un sujetador diferente. Por otro lado, la soldadura es adecuada para lograr la unión de elementos de metal por lo que no se recomienda cambiarla; sin embargo, el método actual no es seguro para los trabajadores.

Se sugiere implementar medidas de seguridad como el uso de protección corporal al soldar y el uso de arneses cuando exista el riesgo de una caída, por ejemplo, en el ensamble de las primeras columnas o en la soldadura de los canalones. La seguridad es importante para no incrementar el costo del producto afectando la utilidad de la empresa.

### ***VI.4. PROPUESTA DE ELIMINACIÓN DE OPERACIONES DE AJUSTE***

Las operaciones de ajuste son operaciones que no son indispensables y pueden eliminarse quitando o modificando las piezas que requieren estas operaciones.

Las piezas que requieren ajustes son las mallas superiores del borde de la estructura y los soportes. El método de ajuste empleado actualmente tiene algunas desventajas. En el caso de los soportes el ajuste se hace por medio de golpes con un martillo, y en él de las mallas se realiza con una patada. Este

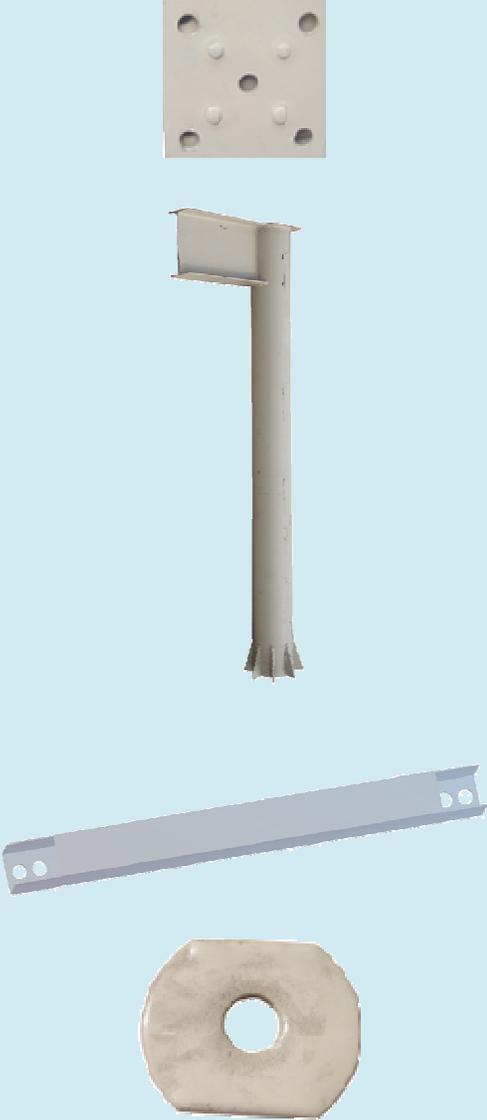
método es inadecuado debido a que, además de dañar el acabado de la pieza, no permite controlar qué tanto se desplaza el soporte o la malla en cada golpe, haciendo uso de una mayor cantidad de tiempo.

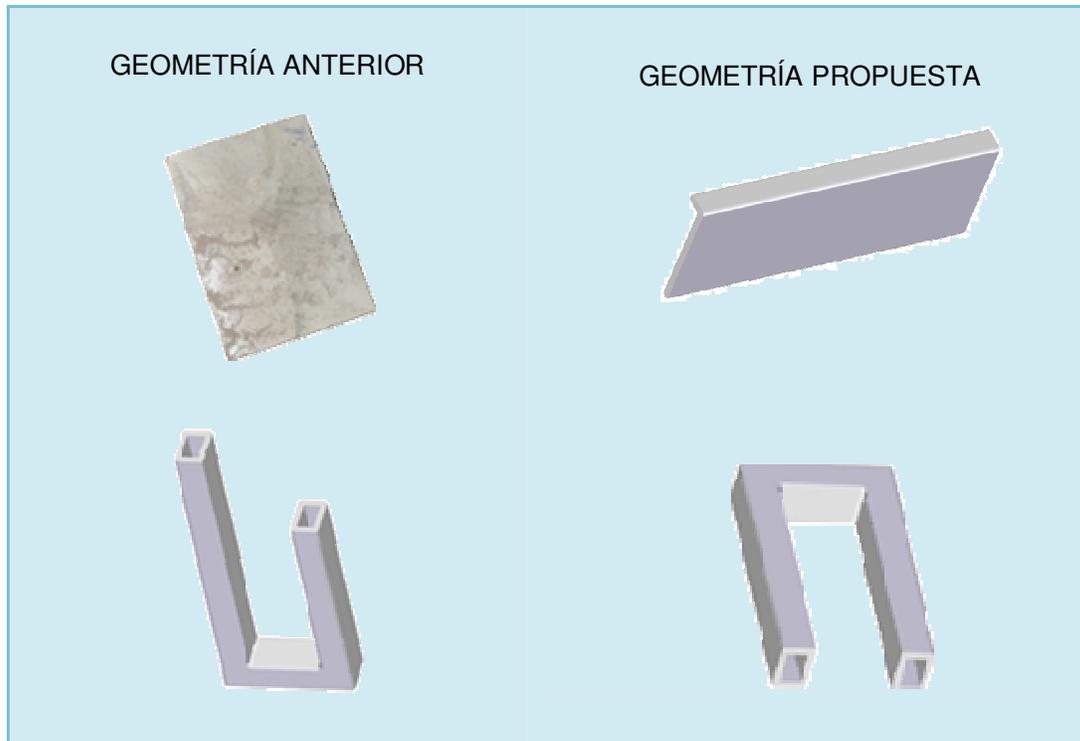
En la unión de los soportes a las columnas se presenta la operación de ajuste más larga de todo el proceso ya que los soportes deben nivelarse mientras el peso y la geometría de las mallas dificulta su alineación. Es por ello que es más conveniente eliminar las operaciones de ajuste del proceso de ensamble que modificar el método empleado. Dado que ambas piezas se unen permanentemente se propuso incorporar parte de la geometría del soporte a la columna como se mostró en la figura 6.3. De esta manera es más fácil nivelar y soldar las piezas en planta; sin embargo, el único inconveniente es que se debe lograr la posición exacta del tornillo del soporte para la posterior inserción de las mallas, o realizar primero la inserción de las mismas y luego la nivelación de la columna.

Por otro lado, el ajuste realizado en el borde de mallas superiores mediante una patada, se elimina con la modificación de la geometría del relieve de las uniones triangulares en la figura 6.1.

#### **VI.5. RESUMEN DE PROPUESTAS PARA EL PROCESO DE ENSAMBLE**

<b>PROPUESTA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Transportar desde el inicio hasta el punto de ensamble	Transportar mediante un contenedor a través del ducto del elevador.
Transportar las piezas grandes y pesadas con polipastos.	Transportar las columnas y los faldones con polipastos por el costado del edificio.
Registrar la información necesaria directamente del sitio de ensamble.	Registrar las dimensiones necesarias y observar las condiciones del sitio de ensamble.
Elevar la carga empleando gatos mecánicos y soportes plegables.	Utilizar soportes y gatos mecánicos para elevar la estructura y colocar las columnas.
Eliminar operaciones de ajuste.	Eliminar la operación de ajuste de los soportes fusionándolos con las columnas y de las mallas modificando el relieve de las uniones.

PROPUESTA	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="305 422 748 453">Modificar la geometría de las piezas</p> <p data-bbox="367 663 683 695">GEOMETRÍA ANTERIOR</p> 	<ul data-bbox="812 239 1339 632" style="list-style-type: none"> <li>▪ Aumentar mínimamente el diámetro de los barrenos en uniones, mallas y rondanas.</li> <li>▪ Utilizar un relieve rectangular en las uniones cuadradas y triangulares.</li> <li>▪ Fusionar la columna con el soporte</li> <li>▪ Fabricar rondanas redondas</li> <li>▪ Anadir un ángulo a las placas para sostenerlas.</li> <li>▪ Fabricar canalones con ambos extremos de la misma longitud.</li> </ul> <p data-bbox="915 663 1260 695">GEOMETRÍA PROPUESTA</p> 



**Tabla 6. 2** Resumen de propuestas

### **VI.6. CURSOGRAMA DEL MÉTODO PROPUESTO**

Las propuestas hechas surgieron de la posibilidad de eliminar algunas operaciones para reducir el tiempo de ensamble, es por ello que a continuación se muestran el cursograma del método propuesto (Tabla 6.3).

<b>CURSOGRAMA ANALÍTICO</b>						
DIAGRAMA: 2	RESUMEN					
OBJETO: Estructura metálica	ACTIVIDAD			ACTUAL	PROPUESTO	
	ACTIVIDAD: Proceso de ensamble	OPERACIÓN	○	51	32	
MÉTODO Propuesto	TRANSPORTE	⇨	17	1		
	DEMORA	⊖	1	0		
LUGAR: Xochimilco, último nivel del edificio	INSPECCIÓN	□	5	5		
	ALMACENAMIENTO	▽	0	0		
NÚMERO DE OPERARIOS: 3	<b>TOTAL</b>		<b>74</b>	<b>38</b>		
COMPUESTO POR: 3988 piezas	FECHA: 5-14 noviembre 2009					
DESCRIPCIÓN	○	⇨	⊖	□	▽	OBSERVACIONES
Transporte de piezas al punto de ensamble		X				Con un contenedor y/o polipastos
Ensamble de las primeras 2 hileras de mallas superiores	X					No se ensamban los nodos de los extremos

Verificar torque de tornillos				X		
DESCRIPCIÓN	○	⇒	◐	□	▽	OBSERVACIONES
Levantamiento del subensamble previo	X					Se realiza con gatos mecánicos.
Colocación de las columnas cortas sobre las vigas existentes	X					2 operarios manualmente
Nivelación de las columnas cortas	X					Se utiliza una plomada
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las columnas cortas	X					Soldadura eléctrica
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes de la columna	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Ensamble de las tres hileras centrales de la primer mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento de las hileras centrales	X					Con gatos mecánicos y soportes plegables
Ensamble de las hileras laterales hasta la mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento del subensamble previo	X					Con gatos mecánicos y soportes plegables
Colocación de las columnas largas sobre las vigas existentes	X					2 operarios
Nivelación de las columnas largas	X					Se utiliza una plomada
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las columnas largas	X					Soldadura eléctrica
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes de las columnas	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Ensamble de las mallas de la segunda mitad de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Levantamiento del subensamble previo	X					Con gatos mecánicos y soportes plegables

DESCRIPCIÓN	○	⇨	◐	◻	▽	OBSERVACIONES
Colocación de las columnas medianas	X					2 operarios
Nivelación de las columnas medianas	X					Se utiliza una plomada
Preparación del equipo de soldadura	X					
Soldadura de las columnas medianas	X					Soldadura eléctrica
Ensamble de los nodos de apoyo a los soportes de la columna	X					
Soldadura del nodo	X					Soldadura eléctrica
Ensamble del borde de la estructura	X					
Verificar torque de tornillos				X		
Colocar y centrar placas en los nodos del borde	X					
Soldadura de las placas	X					Soldadura eléctrica
Soldadura de faldones a los costados de la estructura	X					Soldadura eléctrica
Soldadura de canalones	X					Soldadura eléctrica
Aplicación de pintura	X					En zonas de soldadura

**Tabla 6. 3 Cursograma del método propuesto**

En el cursograma anterior muestra que la reducción de operaciones derivada de las propuestas realizadas es casi de la mitad. Esto no implica que el tiempo de ensamble se reduzca necesariamente a la mitad dado que cada actividad tiene diferentes tiempos de realización y las operaciones de ensamble de mallas y nivelación de columnas siguen presentes; sin embargo, se reduce el número de transportes al concentrarlos en uno solo y se reduce el tiempo del mismo empleando un nuevo método de transporte. También las operaciones de levantamiento a lo largo del proceso se facilitan con los métodos propuestos, por lo que al ser más sencillo, es también más rápido de realizar.

### **VI.7. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO**

En la elaboración de propuestas para mejorar un proceso es importante cuantificar en términos económicos el beneficio esperado y la inversión necesaria para evaluar si realmente se obtendrá un resultado positivo. En la determinación del beneficio económico intervienen principalmente los ahorros derivados de la reducción del tiempo de ensamble y el incremento del costo de

manufactura. En el caso de estudio presentado a lo largo de este trabajo, la principal limitante para el cálculo del beneficio esperado es que no se conocen los costos de materia prima, los costos de manufactura ni el costo hora-hombre para calcular con certeza el ahorro esperado; sin embargo, a continuación se presenta un análisis que permite identificar el incremento máximo en el costo de manufactura para que las propuestas sean útiles y generen un beneficio económico.

El costo total de la estructura se compone de muchos costos generados a lo largo de la fabricación y el ensamble. Todos estos costos se agrupan en cuatro categorías para facilitar el análisis. El costo total está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{Est} = C_{MP} + C_{Man} + C_{Tr} + C_{Ens} \dots \dots \dots (Ec. 6.1)$$

Donde:

$C_{MP}$  = son todos los costos derivados de la adquisición de materiales y materia prima necesarios para fabricar las piezas de la estructura

$C_{Man}$  = son todos los costos derivados únicamente de los procesos de manufactura utilizados para fabricar las piezas<sup>1</sup>

$C_{Tr}$  = son todos los costos derivados del transporte de las piezas y herramientas necesarias hasta el punto de ensamble

$C_{Ens}$  = son todos los costos derivados del pago a operarios por las horas-hombre necesarias para completar el ensamble

Para poder establecer el éxito de las propuestas, se establecerá el incremento en el costo de manufactura y el ahorro en el costo de ensamble. Con el fin de determinar lo anterior, se expresó el costo del método propuesto en términos de los costos del método actual. Los costos de ambos métodos se expresan en las siguientes ecuaciones:

- Método actual

$$C_{Est_{MA}} = C_{MP_{MA}} + C_{Man_{MA}} + C_{Tr_{MA}} + C_{Ens_{MA}} \dots \dots \dots (Ec. 6.2)$$

---

<sup>1</sup> No incluye el costo de materia prima como usualmente se maneja.

- Método propuesto

$$C_{Est_{MP}} = C_{MP_{MA}} + (1+a)C_{Man_{MA}} + C_{Tr_{MA}} + (1-b)C_{Ens_{MA}} \dots \dots (Ec. 6.3)$$

Donde:

$a$  = es el incremento en el costo de manufactura

$b$  = es la reducción en el costo del ensamble

Para determinar el costo del método propuesto se consideró lo siguiente:

1. El costo de materia prima se reduce ligeramente. Esto se debe a que la geometría de las piezas previas a los procesos de manufactura correspondientes son las mismas para ambos métodos; sin embargo, hay ligeros cambios en las rondanas y los canalones. Las rondanas, al ser completamente circulares, requerirán menor material y menor área de troquelado, por lo tanto, por cada lámina se podrá obtener un mayor número de rondanas. Los canalones tendrán menor longitud en uno de los extremos debido al incremento en la simetría, esto representa un menor consumo de perfil tubular. Estos ahorros en realidad son mínimos por lo que no se consideraron dentro del análisis. La relevancia de señalarlos es demostrar que en el costo de materia prima no se generan incrementos sino lo contrario.
2. El costo de manufactura se incrementa. Este incremento es el más significativo y se debe a las modificaciones en los procesos para fabricar las nuevas geometrías. Este incremento se debe a que el tiempo de producción de algunas piezas es mayor y esto genera un mayor gasto de energía, mayor desgaste de las herramientas y requiere más horas-hombre para completar los procesos.
3. El costo de transporte no se incrementa. En este caso se desconoce el medio de transporte empleado para trasladar las piezas; sin embargo, al no haber un ensamble previo en planta, las piezas a transportar son las mismas. La única diferencia será el transporte de los gatos mecánicos y

de los soportes plegables, los cuales sustituyen el transporte de andamios. Las dimensiones de estas herramientas no son significativas como para requerir un transporte con mayor capacidad que genere un costo mayor.

4. El costo de ensamble se reduce. Las propuestas están orientadas a un ahorro del tiempo de ensamble, y por consiguiente, de su costo. Este ahorro se deriva de una reducción en el número de operaciones, la facilidad de inserción de más de 1600 piezas, la eliminación de operaciones de ajuste y una mayor facilidad en la ejecución de las operaciones de transporte y elevación de las secciones de la estructura.

A continuación se muestra el análisis entre el incremento en los costos de manufactura y el ahorro en el costo de ensamble. Estableciendo una desigualdad entre ambas ecuaciones se tiene:

$$C_{Est_{MP}} \leq C_{Est_{MA}} \dots \dots \dots (Ec. 6.4)$$

$$C_{MP_{MA}} + (1+a)C_{Man_{MA}} + C_{Tr_{MA}} + (1-b)C_{Ens_{MA}} \leq C_{MP_{MA}} + C_{Man_{MA}} + C_{Tr_{MA}} + C_{Ens_{MA}}$$

Reduciendo términos semejantes se tiene:

$$\begin{aligned} \cancel{C}_{MP_{MA}} + (1+a)C_{Man_{MA}} + \cancel{C}_{Tr_{MA}} + (1-b)C_{Ens_{MA}} &\leq \cancel{C}_{MP_{MA}} + C_{Man_{MA}} + \cancel{C}_{Tr_{MA}} + C_{Ens_{MA}} \\ (1+a)C_{Man_{MA}} + (1-b)C_{Ens_{MA}} &\leq C_{Man_{MA}} + C_{Ens_{MA}} \\ a C_{Man_{MA}} - b C_{Ens_{MA}} &\leq 0 \\ b C_{Ens_{MA}} &\geq a C_{Man_{MA}} \dots \dots \dots (Ec. 6.5) \end{aligned}$$

Despejando la reducción del costo de ensamble y el incremento en el costo de manufactura se tiene:

$$b \geq \frac{a C_{Man_{MA}}}{C_{Ens_{MA}}} ; a \leq \frac{b C_{Ens_{MA}}}{C_{Man_{MA}}} \dots \dots \dots (Ec. 6.6)$$

El análisis anterior permitirá calcular el ahorro mínimo necesario para que las propuestas generen un beneficio económico o el incremento máximo en el costo de manufactura para lograr un ahorro determinado.

Dado que no se cuenta con la información necesaria para calcular el incremento porcentual en el costo de manufactura generado por las modificaciones a la geometría de las piezas ni los costos actuales de manufactura y ensamble se realizarán dos supuestos importantes:

1. Se manejará el costo total únicamente en términos de costo de manufactura y ensamble para facilitar el análisis. El costo total se analizará en porcentajes correspondientes a los costos de manufactura y de ensamble. Dichos porcentajes se asignarán debido a que afectan directamente a las variables de decisión  $a$  y  $b$ . Esto se debe a que el incremento en el costo de manufactura no debe ser mayor a la reducción en el costo de ensamble, pero si la mayor parte del costo total se debe a la manufactura el valor de  $a$  deberá ser mucho menor a una situación contraria donde el costo del ensamble represente la mayor parte del costo total.
2. Se establecerán tres porcentajes de ahorro en el costo de ensamble y tres del incremento en el costo de manufactura para cada escenario de análisis planteado en el supuesto anterior. Estos tres porcentajes corresponderán a las horas necesarias para reducir el tiempo de ensamble en 1, 2 y 3 días y al incremento en 10, 20 y 30% del costo de manufactura.

Los escenarios de análisis son los siguientes:

1. PORCENTAJES CORRESPONDIENTES AL COSTO TOTAL		
$C_{Ens}$ [%]	$C_{Man}$ [%]	RELEVANCIA
10	90	Un incremento en el costo de manufactura es tan significativo que probablemente no exista beneficio alguno
20	80	Situación probable según la ley de Pareto
30	70	Porcentaje menor al establecido por Boothroyd que posiblemente refleje el menor costo de la mano de obra mexicana
40	60	Porcentaje establecido por los estudios de Boothroyd
50	50	El costo total no se encuentra ponderado
60	40	Un ahorro en el costo de ensamble tendría mayor impacto en el costo total que el incremento en el costo de manufactura
70	30	Menos de un tercio del costo se debe a la manufactura
80	20	Situación probable según la ley de Pareto
90	10	Un incremento en el costo de manufactura es tan poco significativo que probablemente exista beneficio económico

**Tabla 6.4** Composición del costo total

Adicionalmente se analizará el incremento máximo en el costo de manufactura bajo las mismas condiciones del primer supuesto pero estableciendo como objetivo los siguientes porcentajes de reducción del tiempo de ensamble.

2. PORCENTAJES DE AHORRO EN EL TIEMPO DE ENSAMBLE			3. INCREMENTO EN EL COSTO DE MANUFACTURA
[horas]	[días] <sup>2</sup>	[%]	[%]
18	1	13	10
36	2	26	20
54	3	39	30

Tabla 6. 5 Valores para el análisis de  $a$  y  $b$

Con base en las desigualdades obtenidas en el análisis de las variables de decisión (Ec. 6.6) y en las situaciones generadas por los supuestos planteados se obtuvieron los valores de  $a$  y  $b$ . Dichos resultados se muestran en la siguiente tabla (Tabla 6.6).

$C_{Ens}$ [%]	$C_{Man}$ [%]	$\frac{C_{Ens}}{C_{Man}}$	$\frac{C_{Man}}{C_{Ens}}$	$a \leq \frac{b C_{Ens_{MA}}}{C_{Man_{MA}}}$ [%]			$b \geq \frac{a C_{Man_{MA}}}{C_{Ens_{MA}}}$ [%]			$b \geq \frac{a C_{Man_{MA}}}{C_{Ens_{MA}}}$ [horas]		
				$b=13$ %	$b=26$ %	$b=39$ %	$a=10$ %	$a=20$ %	$a=30$ %	$a=10$ %	$a=20$ %	$a=30$ %
10	90	1/9	9	1.4	2.9	4.3	90	180	270	126	252	378
20	80	1/4	4	3.3	6.5	9.8	40	80	120	56	112	168
30	70	3/7	7/3	5.6	11.1	16.7	23.3	46.7	70	33	65	98
40	60	2/3	3/2	8.7	17.3	26	15	30	45	21	42	63
50	50	1	1	13	26	39	10	20	30	14	28	42
60	40	3/2	2/3	19.5	39	58.5	6.7	13.3	20	9.3	19	28
70	30	7/3	3/7	30.3	60.7	91	4.3	8.6	12.9	6	12	18
80	20	4	1/4	52	104	156	2.5	5	7.5	3.5	7	11
90	10	9	1/9	117	234	351	1.1	2.2	3.3	1.6	3.1	4.7

probables casos de éxito

probables casos de fracaso

Tabla 6. 6 Cálculo de los valores de  $a$  y  $b$  según los supuestos

Dado que en los estudios realizados por el investigador Geoffrey Boothroyd se concluye que aproximadamente el 40% del costo de un producto se atribuye al ensamble, y considerando que la mano de obra mexicana es más económica que la estadounidense, en los resultados se resaltan los casos donde el costo del ensamble representa 40% ó menos del costo total, puesto que por el tipo de producto analizado, el número de piezas y los procesos necesarios para

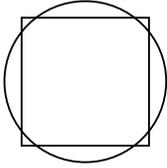
<sup>2</sup> Para el cálculo de los días ahorrados se consideró el trabajo de 6 horas diarias y de 3 trabajadores.

fabricar las geometrías diversas se espera que los costos de manufactura superen a los de ensamble.

También se resaltan los casos de éxito y de fracaso dentro de las diferentes situaciones de análisis. Para determinar que un caso es de éxito o de fracaso se consideró lo siguiente:

1. Dado que el valor de  $a$  es el incremento en el costo de manufactura, éste representa únicamente el costo adicional de manufactura de los siguientes cambios en las geometrías:

- Diámetro de troquelado circular ligeramente mayor (2744 barrenos)
- Menor área de estampado para el relieve cuadrado (716 relieves)



$$\begin{aligned} \varnothing_{\text{círculo}} &= 1\text{cm} & P_{\text{círculo}} &= \pi \times D = 3.1416\text{cm} \\ A_{\text{círculo}} &= \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0.7854\text{cm}^2 \\ \varnothing_{\text{círculo}} &= \varnothing_{\text{cuadrado}} & \ell_{\text{cuadrado}} &= P \div 4 = 3.1416 \div 4 = 0.7854\text{cm} \\ A_{\text{cuadrado}} &= \ell \times \ell = 0.6169\text{cm}^2 \end{aligned}$$

- Soldadura en planta del soporte a la columna (6 soportes)
  - Troquelado de ayudas de sujeción a las columnas (6 columnas)
  - Eliminación de la fabricación de bases (6 bases)
  - Menor perímetro de troquelado en rondanas (104 rondanas)
  - Doblado de las placas (56 placas)
2. El ahorro de tiempo necesario para cada incremento del costo de manufactura no debe ser mayor a un tercio del mismo, ya que aunque se eliminan las operaciones de mayor duración y se agiliza la realización de las demás, puede ser contraproducente esperar un escenario tan optimista.

### ***Análisis de los resultados***

En general se observa que las propuestas no serán de gran ayuda si el costo de manufactura comprende más del 80% del costo total de la estructura, pero en el caso de comprender menos de un 70% hay posibilidad de éxito.

Analizando la columna donde  $a$  es la variable independiente se tiene que se debe incurrir en un incremento menor al 10% en el costo de manufactura si se logra ahorrar poco más de un día de trabajo, que es el escenario más probable.

Analizando la columna donde  $b$  es la variable de decisión se concluye que si el incremento en el costo de manufactura es mayor a 20%, no habrá ahorro alguno; sin embargo, si éste es menor sólo se requiere un ahorro de entre 15 y 30% del tiempo de ensamble dependiendo de la influencia de los costos de ensamble y manufactura en el costo total para que las propuestas generen beneficio económico.

Por otro lado, es importante considerar el ahorro no sólo del ensamble del caso de estudio, sino de los proyectos futuros que pueden incluir estas propuestas en su diseño, es decir, el ahorro a largo plazo. Además, considero que es importante contemplar también los beneficios competitivos que se deriven de las propuestas. Una reducción significativa en el tiempo de ensamble permite una entrega más pronta lo cual es una ventaja competitiva tan necesaria en el entorno industrial actual. Otro aspecto importante a considerar es la reducción del riesgo de incurrir en gastos adicionales derivados de accidentes causados por emplear métodos no seguros. Ambas consideraciones traen un beneficio económico oculto, por lo que aunque el ahorro en cuestión de costos de manufactura y ensamble fuera nulo, la implementación de las propuestas es acertada.

## VII. Conclusiones

## VII. CONCLUSIONES

El proceso de ensamble de este tipo de estructuras presenta la característica de repetir muchas veces la misma operación de inserción y de manipular las piezas en un área de trabajo que añade dificultad al proceso. El estudio del trabajo y el diseño para ensamble son herramientas útiles para realizar el análisis de este tipo de procesos. Estas herramientas permiten analizar las operaciones del proceso, evaluar la necesidad de cada una e identificar las áreas de oportunidad dentro del mismo.

El beneficio principal de la aplicación del DFA es reducir el tiempo de ensamble y con ello reducir el costo del producto para ser más competitivos en el mercado. La reducción del tiempo de ensamble se logra facilitando la manipulación e inserción de cada pieza; sin embargo, los métodos existentes no pueden aplicarse en piezas grandes y pesadas. En el presente trabajo, donde se analizó el ensamble de piezas medianas principalmente, se pudo observar que incluso para estas piezas los métodos tradicionales no reflejan los tiempos reales de ensamble, es por ello que es necesario continuar la investigación en el área de DFA para generar una herramienta útil en la evaluación de la facilidad de ensamble de estas piezas.

Las propuestas realizadas son modificaciones simples que pretenden lograr una reducción del costo del producto lo cual genera beneficios económicos a la empresa. La reducción del tiempo de ensamble reduce las horas-hombre necesarias, y por consiguiente, el costo total del proyecto, y con ello también se genera una mayor competitividad ofreciendo menores tiempos de entrega que otros fabricantes.

Dentro de las propuestas, se presenta un método diferente para elevar la estructura durante el ensamble utilizando gatos mecánicos, y así evitar el uso de palos de madera, andamios y ladrillos. También se propone modificar el método

de transporte y la geometría de las piezas con el fin de lograr una manipulación y una inserción más fáciles. Adicionalmente, se propone la fusión de piezas y la eliminación de operaciones de ajuste.

En el caso de la estructura estudiada, la mayor limitación es la estética del producto, ya que las piezas no pueden ser modificadas sin afectar la apariencia del mismo, ni se pueden eliminar ya que todas en conjunto cumplen alguna función importante. Aunque el mayor beneficio del DFA se obtiene al reducir el número de componentes, en este caso, no fue posible reducirlos.

Es importante resaltar que las propuestas no implican una gran inversión de capital, por lo que se pueden obtener los beneficios con los recursos con que ya cuenta la empresa. Las nuevas geometrías de las piezas se pueden manufacturar con las máquinas existentes en la empresa y la adquisición de los gatos, las poleas y el equipo de seguridad no representan una gran inversión.

Aunque el beneficio global es la reducción del tiempo y costo del producto, las propuestas también permitirán a los trabajadores realizar las actividades con un menor esfuerzo y con mayor seguridad.

En el análisis de procesos de ensamble, siempre se evalúa la posibilidad de hacer un ensamble previo en planta dado que las condiciones del área de trabajo permiten un ensamble más fácil y rápido. En el caso del ensamble de este tipo de estructuras conformadas por muchos nodos iguales, se puede pensar en un subensamble previo de nodos para agilizar el proceso. Dicho subensamble deberá ser de nodos completos, debido al orden de inserción de las mallas mencionado en el capítulo IV, ya que resultaría contraproducente tener que remover la tuerca del ensamble previo para insertar nuevas piezas, y luego colocarla de nuevo.

Además, es importante considerar simultáneamente la facilidad de manejo, el lugar de ensamble, el espacio necesario para el transporte y el ahorro de tiempo

que se generaría en caso de emplear un ensamble previo. La mayoría de las piezas que conforman los nodos son medianas y los subensambles generados también se clasifican como piezas medianas aproximándose a tener las características de manejo de las piezas grandes y pesadas. En este caso, la reducción de tiempo de ensamble que puede obtenerse con nodos preensamblados seguramente será menor que el aumento del tiempo de manipulación causado por estos ensambles medianos, por lo que en lugar de reducir el tiempo, éste sólo se incrementaría, así como también la dificultad de manipulación.

Considerando las características del lugar de ensamble, el cual presenta difícil acceso para piezas grandes y equipo de manejo de carga, resultaría contraproducente manejar subensambles grandes o pesados, e incluso se puede incrementar el costo del producto al requerir vehículos de transporte de mayor capacidad. De hecho, sería necesario emplear un método de transporte similar al de las columnas.

Por último, es necesario resaltar que el tiempo empleado en el ensamble de cada malla es menor en comparación con el tiempo de ajuste, transporte y operaciones adicionales que requieren otras piezas. La cantidad de tiempo empleada en el ensamble de mallas se deriva del gran número de componentes, mas no de la dificultad de ensamble, por lo tanto se considera que no se obtendría una reducción significativa en el tiempo de ensamble si se llevaran preensambladas las mallas.

En el análisis costo-beneficio se puede apreciar que la reducción en el costo ensamble necesaria para financiar el incremento del costo de manufactura no es muy alta y por lo que la aplicación de las propuestas es acertada para obtener resultados económicos positivos, una ventaja competitiva y eliminar los gastos potenciales por el uso de métodos riesgosos.

En resumen, el DFA permite identificar las áreas de oportunidad para facilitar el ensamble aunque no existan métodos para estimar el tiempo de ensamble de piezas grandes y pesadas. Los principales beneficios que esta herramienta provee son la reducción de tiempo y facilitar las operaciones de ensamble.

## VIII. Bibliografía y mesografía

## VIII. BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA

### BIBLIOGRAFÍA

- Boothroyd, G., Knight, W., Dewhurst, P., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 2ª ed., Marcel Dekker, Inc., 2002
- Niebel, B., *Ingeniería Industrial. Estudio de Tiempos y Movimientos*, 9ª ed., AlfaOmega, 1996
- Kanawaty, G., *Introducción al estudio del trabajo*, 4ª ed., OIT, 1996
- Kim, G.J., Lee, S. Bekey, G.A., *Interleaving Assembly Planning and Design*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No.2, Abril 1996, pp. 246-251
- Xie, X., *Design for manufacture and Assembly*, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Utah, 2003, Salt Lake city, UT.
- *The billion dollar potential of DFA*, 1989, Journal of Assembly Automation, Vol.9, No. 4, pp.192-194
- Wong, J.H., Sturges, R.H., *Design for Assembly Factors for Large and Heavy Parts*, Transactions of the ASME, Vol. 116, Junio 1994, pp. 508-510
- Beiter, K. A., Cheldelin, B., Ishiii, K., *Assembly Quality Method: A Tool in Aid of Product Strategy, Design, and Process Improvements*, Departamento de Ingeniería Mecánica y División de Diseño de la Universidad de Stanford, Stanford, CA.

### MESOGRAFÍA

- Chan, V., Salustri, F. A., *DFA: The Lucas Method*, Diciembre 2005  
En internet: <http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmlucas.html>  
Consulta: 14 de julio de 2009
- Shipulski, M., *Successful Design For Assembly*, Febrero 2007  
En internet: [http://www.assemblymag.com/CDA/Articles/Feature\\_Article/BNP\\_GUID\\_9-5-2006\\_A\\_1000000000000059386](http://www.assemblymag.com/CDA/Articles/Feature_Article/BNP_GUID_9-5-2006_A_1000000000000059386)  
Consulta: 30 de julio de 2009

- Huang, Chen S., *Mechanical jack-Patent 5131628*, United States - You Jin Industrial Co., Ltd., 1992.

En internet: <http://www.freepatentsonline.com/5131628.htm>

Consulta: 28 de Abril de 2010