

FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS TUBULARES FORMADAS POR ELEMENTOS CURVADOS *

Los perfiles tubulares de sección circular (CHS) constituyen en la actualidad elementos esenciales en el diseño de la construcción moderna en acero. Sin embargo, en las últimas décadas se ha incrementado de manera considerable la utilización de estos perfiles con formas complejas en lugar de los simplemente rectos, debido fundamentalmente a su alto valor estético y, aunque en menor medida, también a su eficiencia estructural.

El diseño de edificios con formas suaves y naturales habitualmente carentes de ángulos, ha empujado al mercado a desarrollar técnicas de curvado para este tipo de perfiles de acero.

Uso del perfil tubular de acero curvado en Construcción

La principal ventaja que aporta esta solución es el valor estético de las es-

tructuras resultantes, que ofrecen al usuario luz natural y sensación del espacio y grandiosidad en lugares públicos como aeropuertos, estaciones, centros comerciales, ... En edificios industriales aportan un mayor atractivo estructural, evitando la imagen de austeridad típica de estas construcciones.

El coste adicional inherente al curvado es habitualmente pequeño en relación con el coste global de la estructura y puede incluso anularse en ocasiones por ahorros en los detalles de cumbrera y sus costes de sellado.

Los resultados obtenidos con estos elementos son estructuras que, en ocasiones, se parecen remotamente a pórticos, por lo que en esos casos, no pueden considerarse como tales a nivel de cálculo. Las bases matemáticas para describir estructu-

ras como éstas pasan de la Geometría analítica a la Geometría diferencial.

Para diseñar, especificar los detalles constructivos y fabricar este tipo de estructuras a un coste razonable y con altos estándares de calidad, se requiere de una cadena de procesos completa y computarizada. Limitarse a la generación de planos y datos no es suficiente, debe implementarse una fabricación de componentes asistida por ordenador, de tal forma que la soldadura sea la única operación susceptible de ser ejecutada manualmente.

La fabricación de estructuras a partir de perfiles tubulares de acero curvados requiere dos pasos fundamentales: el curvado de los perfiles y el corte de sus extremos con el correspondiente mecanizado de los contornos de la intersección.

* Del Boletín Informativo Construber de ICT

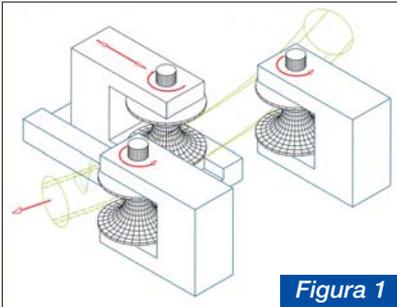


Figura 1

El curvado

La operación de curvado es relativamente sencilla mientras el radio de curvatura del perfil tubular sea constante. Lo contrario (radio de curvatura no constante) requiere procesos de fabricación de mayor complejidad.



El análisis de la curva que el perfil debe formar permitirá dividirla en porciones de radio constante, definiéndolas de manera apropiada tanto a nivel geométrico como tecnológico con objeto de obtener los parámetros necesarios para la programación de la máquina curvadora.

Existen un conjunto de parámetros que afectan al proceso de curvado, cuya influencia, en ocasiones, sólo puede cuantificarse por aproximación e incluso puede que no sea cuantificable en absoluto. Fundamentalmente son los siguientes:

- Límite elástico del tipo de acero.
- Porcentaje de alargamiento.
- Microestructura de grano del acero.
- Tolerancia del espesor y de la sección transversal del perfil tubular.
- Relación Diámetro de CHS ó Altura del RHS / Espesor de pared.
- Relación Radio de curvatura / Diámetro del CHS o Altura del RHS.

Sólo el operario en máquina puede compensar estos factores. Con este propósito, el elemento es medido

constantemente mientras es curvado, de manera que los parámetros de la máquina son ajustados en relación con los resultados obtenidos.

El curvado de perfiles tubulares es una operación bien conocida que viene aplicándose desde hace tiempo y sobre la que se debe hacer una primera distinción: si es realizada en *frío* o en *caliente*.

El método preferido por los fabricantes de estructuras de acero para el curvado en frío, consiste en pasar la pieza a curvar a través de tres rodillos paralelos (Fig.1).

Estos rodillos tienen la forma del negativo de la sección transversal del

perfil tubular. Los dos externos están fijos al utillaje, mientras que el central puede desplazarse en una línea perpendicular al eje del tubo determinando el radio de curvatura. El perfil tubular es desplazado a lo largo de su eje a través de la máquina mediante el giro de los rodillos motrices (externos), y de manera simultánea el rodillo central ejerce una fuerza constante que va curvando el perfil tubular de manera gradual.

Cuando se plantea el curvado de piezas *en caliente*, aunque también es utilizado el método de rodillos, los especialistas recurren en su mayoría al método por inducción. El principio de funcionamiento de estas máquinas está basado en el calentamiento por inducción, aplicado en una corta longitud del perfil bajo un estricto control de temperaturas. El curvado sólo se produce en la pequeña zona calentada y tras ello, el perfil tubular es impulsado hacia delante e introducida en el inductor la zona siguiente, se calienta, se curva y así sucesivamente.

Los procesos de curvado descritos proporcionan una calidad geométrica sorprendentemente alta en los elementos. Es posible reproducir las curvas requeridas (Fig.2) dentro de unas tolerancias del tubo de ± 10 mm, es decir, ningún punto de la superficie del perfil tubular curvado difiere de la geometría ideal en más de 10 mm.

El curvado causa la ovalización de la sección transversal del perfil. El pa-



Figura 2

rámetro con mayor influencia es el ratio diámetro/espesor del perfil tubular. Por otra parte, la ovalización crece cuando el radio de curvatura disminuye.

En muchos casos no es posible curvar el elemento en su totalidad, quedando los extremos del perfil inhábiles. Así pues, tras el proceso de curvado, estos extremos se deben cortar y desechar. La longitud de las partes no curvadas de forma apropiada es aproximadamente la mitad de la distancia entre los dos rodillos externos.

Aspectos metalúrgicos

- Durante el curvado *en frío*, el material supera el límite elástico y se crea por tanto una deformación permanente en el perfil. Para los aceros estructurales utilizados comúnmente, la deformación sufrida durante el proceso de curvado no es perjudicial, de tal manera que, tras el curvado, el material presenta las mismas características elásticas en la zona curvada que las que poseía antes del curvado. Sin embargo, parte de la capacidad de deformación del perfil ha sido ya utilizada.

Las secciones de acero sufren un endurecimiento por deformación debido al proceso de curvado y la cuantificación de este endurecimiento depende de la curvatura provocada y de

la geometría de la sección. Un ensayo de tracción sobre una probeta de acero tomada de un perfil que haya sido curvado en frío por medio de rodillos, mostrará una pequeña reducción de la ductilidad, pero un aumento en su tensión última. El efecto de esta pérdida de ductilidad para las aplicaciones estructurales habituales es mínimo y para la mayoría de las aplicaciones puede despreciarse.

- También se dan cambios en las propiedades mecánicas durante el proceso de curvado *en caliente*, pero en este caso, son las variaciones de temperatura que sufre el material las que más influyen en los cambios de sus propiedades mecánicas (más que la deformación). Se pueden producir cambios significativos en el material durante el proceso de curvado por inducción. Posttratamientos térmicos post-curvado pueden, en cualquier caso, establecer las propiedades del material si fuera necesario.

Actualmente no hay normativa europea o americana que predefina o limite el radio de curvatura de los perfiles estructurales, por lo que será necesario recurrir a la experiencia.

- En el proceso de curvado por inducción, la aplicación de calor permite la relajación de cualquier tensión residual, de manera que éstas, no son más importantes en los elementos curvados que en los elementos sin curvar.

El curvado en frío provoca tensiones residuales en el perfil curvado, que son función de las propiedades de la sección en el plano de curvado. En cualquier caso, estas tensiones residuales no afectan a la resistencia de la sección transversal del perfil.

Corte y preparación de los extremos

Tras el proceso de curvado y corte de la parte no útil del perfil, se debe producir el contorno de intersección de los extremos del perfil curvado.

Asumiendo que los diámetros de los perfiles tubulares más habitualmente utilizados suelen ser mayores de 200 mm y que los espesores rara vez son inferiores a 10 mm y que incluso no es extraño encontrar perfiles de más de 40 mm de espesor se con-

cluye que los métodos de corte por fusión son la única alternativa realista tanto desde el punto de vista económico como tecnológico.

Entre los métodos estimados como adecuados se incluyen el oxicorte y el corte por plasma. Ambos pueden considerarse igualmente efectivos bajo los aspectos mencionados en este artículo, a pesar de sus diferencias en lo que al proceso tecnológico se refiere.

- Mientras el oxicorte se utiliza para un amplio rango de perfiles, hasta algo más de 100 mm de espesor, el corte por plasma resulta más económico para espesores de hasta 20 mm aproximadamente.

En el corte de perfiles tubulares rectos, se hace girar al tubo alrededor de su eje longitudinal mientras la antorcha se mueve sobre él perpendicularmente al eje longitudinal del tubo y gira alrededor de dos ejes ortogonales. La máquina está quieta, el perfil se coloca y alinea según el sistema de coordenadas de la máquina por medio de un dispositivo rotativo (Fig.3).

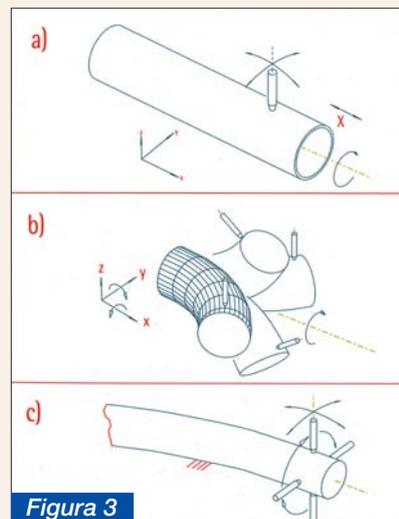


Figura 3

Sin embargo, cuando el eje del tubo y el eje de rotación no son idénticos, se requiere no sólo de una máquina con mayor número de ejes (Control numérico) y un mayor espacio para calcular secuencias de movimiento resultantes de bastante complejidad y trasladarlas al programa de la máquina. En cualquier caso, el procedimiento sólo podrá llevarse a cabo sobre perfiles tubulares curvos de longitud reducida.

Las tolerancias resultantes, provocadas tanto por el proceso de curvado como por la alineación de la máquina, afectarán de manera desproporcionada a la exactitud del contorno de corte en este método. Sin embargo, la experiencia de su utilización ha sido positiva. La figura 4 muestra el corte por este procedimiento de un perfil tubular CHS de dimensiones 406,4 x 40 mm.

Un procedimiento adecuado para realizar el corte de perfiles tubulares

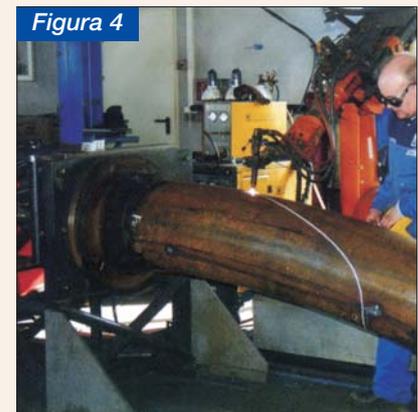


Figura 4

curvados largos, consiste en invertir el movimiento de los componentes involucrados en la operación, de tal manera que la antorcha se mueve alrededor del perfil (que se mantiene fijo) para producir el contorno de corte (Fig. 3c).

El proceso de corte debe desarrollarse en ángulo y, en el peor de los casos, en contra de la fuerza de la gravedad.

El proceso de corte en sí mismo sólo requiere unos minutos. Sin embargo, al contrario que con tubos rectos, los trabajos de colocación del elemento y los ajustes correspondientes son sustanciales. Estos pueden suponer el 95% del tiempo total de la operación. En cualquier caso, el corte a medida de tubos curvados requiere de tres a cinco veces más



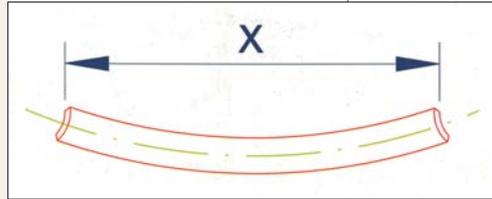


Figura 5

tiempo y coste que el equivalente con tubos rectos.

Ejemplo: Hangar 7 (Aeropuerto de Salzburgo)

El proyecto de construcción metálica del "Red Bull Hangar 7" en el Aeropuerto de Salzburgo (Fig. 5) tenía como objetivo definir una solución que permitiera el alojamiento más apropiado para los "Flying Bulls", una colección de aviones históricos, y que, además, pudiera albergar otro tipo de actividades. La idea básica era la de construir un espacio diáfano, una especie de corteza que asemejara al cielo sobre quien se cobijara bajo ella.



el hangar, externa e internamente: por un lado, las prominentes construcciones cilíndricas, y por otro, los aviones en el hangar, con una visión de la pista (aviones en movimiento).

Con este proyecto se inició el desarrollo de procedimientos adecuados par el corte de tubos curvados largos.

Se conjugó la Ingeniería mecánica con el software, se probó y comprobó en breve espacio de tiempo y, aunque existían experiencias anteriores en este tipo de procesos de fabricación, el curvado y corte de tubos representó un nuevo campo en lo que concierne a ámbito (alcance), precisión requerida, dificultad en la geometría y diversidad.

Asegurar la movilidad del equipo de corte, incluido la máquina que guía el movimiento, resultó ser la decisión correcta tanto en términos tecnológicos como económicos. Esto hizo posible ejecutar en taller aproximadamente el 80% de todas las operaciones de corte. La figura 6 muestra la máquina en



Figura 6

pleno proceso de corte del extremo del tubo curvado.

Medidas y precisión

Comparado con los tubos rectos, la medida y comprobación de los tubos curvados es sustancialmente más complicada. Dependiendo de su curvatura y posición tras la alineación, los elementos pueden tener diferen-

Especificaciones – Hangar 7

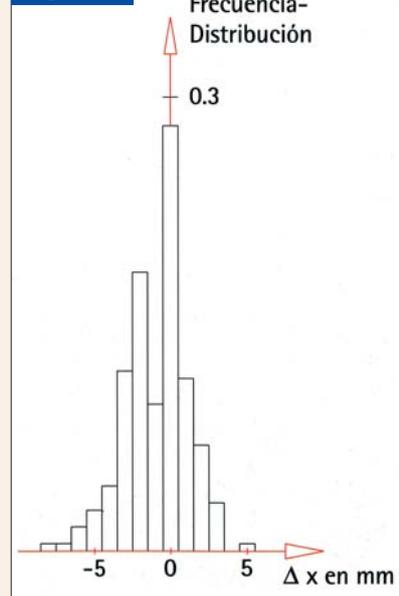
Superficie construida:	4.100 m ²
Superficie a nivel de suelo:	3.700 m ²
Estructura de acero:	1.200 m ²
Superficie acristalada:	6.000 m ²
Máxima luz sin soportes intermedios:	100 m x 67 m
Altura de coronación:	14,5 m

En términos urbanísticos, la intención era crear un núcleo separado, un módulo sobrio en la estructura amorfa del aeropuerto, que pudiera ser atractivo visto desde cualquier ángulo, especialmente desde el aire.

La solución adoptada consiste en un edificio cuya estructura tiene forma de cúpula basada en un elipsoide inclinado de ejes 110 m x 77 m la estructura consiste en una serie de viga de celosía resueltas con perfil tubular (CHS) situadas de forma radial conectadas entre sí mediante anillos concéntricos (Fig. 5).

Dos cilindros de cristal se sitúan dentro de esta cúpula para alojar en su interior zonas públicas como la entrada, facturación, restauración, sala de embarque... Se establece una conexión visual ente la zona urbana y

Figura 7



tes planos de referencia y puntos para medir y verificar.

La precisión en los elementos curvados es un prerrequisito fundamental para la precisión del corte. Si cada una de las fases de corte descritas están desarrolladas correctamente, es posible la producción de elementos curvados con tolerancias similares a las de los elementos rectos. La figura 7 muestra la precisión que puede alcanzarse en la práctica y la distribución estadística de las dimensiones nominales medidas sobre aproximadamente 200 elementos utilizados en el edificio. ■