

Aceros laminados TM- Material moderno de alto rendimiento para construcción metálica puntera

F. SCHRÖTER (*)

RESUMEN Aceros modernos, por ejemplo chapas de acero de laminación termomecánica (chapas TM), permiten al ingeniero obtener las más altas exigencias de estética y eficiencia en construcción metálica. Sin embargo, no solamente se saca provecho del alto grado de resistencia de estos aceros. Al contrario de la opinión general, las características de estos aceros son siempre muy buenas cuando se respetan un mínimo de restricciones. En particular, los aceros laminados TM demuestran unas propiedades de soldadura destacables. A lo largo de la última década, se ha ganado mucha experiencia en estos materiales, confirmando cuyas propiedades ventajosas de fabricación. Se presentarán en detalle algunos de estos ejemplos.

ROLLED STEEL PLATES (TM)- MODERN STEEL PRODUCTS, TO ENABLE THE ENGINEER WORKING

ABSTRACT *Modern steel products, for instance thermomechanically rolled steel plates (TM-plates), to enable the engineer working in steel and composite construction to exploit the highest demands on aesthetics and efficiency. However, not only the high yield strength and the toughness in which these steel grades can be delivered are advantageous. Contrary to the predominant opinion the fabrication properties of these steel grades are very good provided that some minor restrictions are respected. In particular the TM-roller steels show outstanding welding properties. Throughout the past decade substantial experience with these materials has been gained confirming the advantageous fabrication properties. Some of these examples will be presented in detail.*

Palabras clave: Laminación termomecánica; acero de construcción; trabajos del acero de construcción; soldadura; acero; puentes metálicos.

1. INTRODUCCIÓN

El tipo de aplicación deseado por los utilizadores de aceros estructurales fija unas directrices claras para las propiedades de los productos nuevos desarrolladas por los fabricantes de acero. Además de intentar conseguir buenas características mecánicas en un material –a menudo resultado de resolver el dilema entre resistencia límite elástico y resiliencia– las propiedades de fabricación son de suma importancia para permitir un proceso de fabricación lo más fácil y económico posible.

Con los aceros de laminación termomecánica (aceros TM) según EN 10 113-3 se ofrecen productos que cumplen de la mejor manera las exigencias de la industria de construcción. Además, por su uso intensivo especialmente en importantes proyectos, ya existe una gran experiencia. Estos proyectos de construcción han demostrado claramente que los costos de fabricación para la construcción de acero se pueden reducir de manera significativa utilizando acero de alta resistencia - garantizando un alto grado de seguridad tanto en la fabricación como en el montaje de estructura, y también durante la explotación las ventajas que ofrecen los aceros laminados TM serán contrastadas en este artículo.

2. POSIBILIDADES DE SUMINISTRO Y APROBACIONES

Los aceros laminados TM se pueden suministrar hoy en día en productos largos y planos con límite elástico de 275, 355, 420 y 460 MPa, de acuerdo con la norma Europea EN 10113-3 [1]. Además, muchos fabricantes de acero ofrecen sus propias marcas de acero TM, cuya composición química y características mecánicas sobrepasan a menudo los valores exigidos por la norma convencional.

Actualmente, la EN 10113-3 es limitada hasta un espesor máximo de 63 mm para productos planos. Sin embargo, ya hoy se pueden fabricar y utilizar productos de más espesor. Por ejemplo, chapas laminadas TM de 120 mm de espesor se emplearon recientemente en la construcción de un puente en Francia. Por consiguiente se supone que la futura norma EN 10025-4, que sustituirá a la norma actual dentro de 2 años aproximadamente, aumentará este espesor standard a 120 mm.

Para cada nivel de límite elástico hay dos tipos diferentes de ensayos de energía Charpy-V: el tipo M, por el que la energía de impacto se ensaya a -20°C y el tipo ML por el que la resiliencia se prueba a -50°C .

En la mayoría de los países europeos se fija la aplicación de estos tipos de acero mediante normas especiales. Por ejemplo en Alemania, estos materiales se pueden utilizar generalmente en productos planos hasta 100 mm de espesor en S355M/ML y hasta 80 mm en S460M/ML, y en

(*) Manager de Marketing, AG der Dillinger Hüttenwerke, P.O. Box 1580, D-66748 Dillingen.

	S 355 J2G3		S 355 ML		S 460 NL		S 460 ML	
	EN 10025	análisis típicos	EN 10 113-3	análisis típicos	EN 10 113-2	análisis típicos	EN 10 113-3	análisis típicos
C	< 0,22	0,17	< 0,14	0,08	< 0,20	0,17	< 0,16	0,09
Si	< 0,55	0,45	< 0,50	0,30	< 0,60	0,45	< 0,60	0,30
Mn	< 1,60	1,50	< 1,60	1,40	1,00-1,70	1,65	< 1,70	1,50
P	< 0,035	0,018	< 0,030	0,012	< 0,030	0,015	< 0,030	0,011
S	< 0,035	0,015	< 0,025	0,005	< 0,025	0,010	< 0,025	0,005
Nb	-	-	< 0,05	< 0,04	< 0,05	-	< 0,05	< 0,04
V	-	-	< 0,10	-	< 0,20	0,17	< 0,12	< 0,05
Mo	-	-	< 0,20	-	< 0,10	-	< 0,20	-
Ni	-	-	< 0,30	-	< 0,80	0,29	< 0,45	0,25
CE		0,42		0,35		0,50		0,40
Pcm		0,26		0,18		0,29		0,20
CET		0,32		0,25		0,34		0,28

carbono equivalente:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

TABLA 1. Comparación de los elementos de aleación para aceros TM y aceros convencionales del mismo límite elástico.

productos largos hasta 60 mm independientemente de la calidad del acero. En Francia, la certificación “NF-acier” permite la aplicación de chapas hasta 100 mm (S355M/ML) y 80 mm (S460M/ML) en construcción metálica. Además, en ambos países se permite y se ha utilizado productos de más espesor bajo vigilancia especial de la administración. En los países escandinavos, la aplicación de todos estos aceros laminados TM es asegurada por normas de construcción.

3. PROPIEDADES DE FABRICACIÓN DEL ACERO LAMINADO TM

El acero laminado TM se caracteriza por unos contenidos de baja aleación. Así, la Tabla 1 compara por una parte la composición química del acero TM S355M con la del acero estructural convencional S355J2G3 y, por otra parte la del acero TM de alta resistencia S460M con la de un acero normalizado de grano fino S460N.

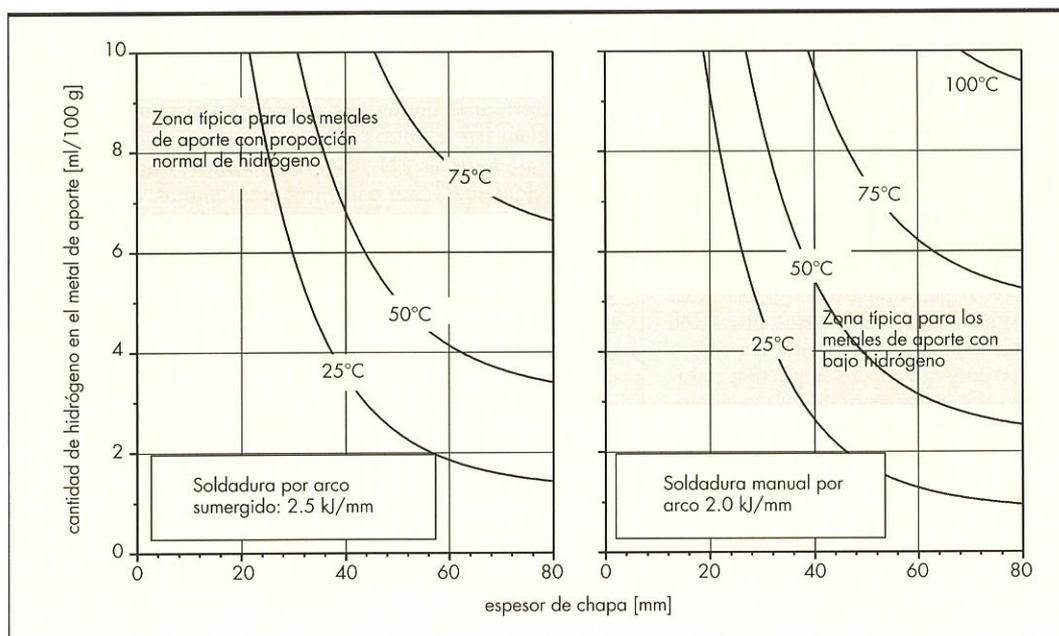


FIGURA 1. Temperaturas de precalentamiento para S355ML.

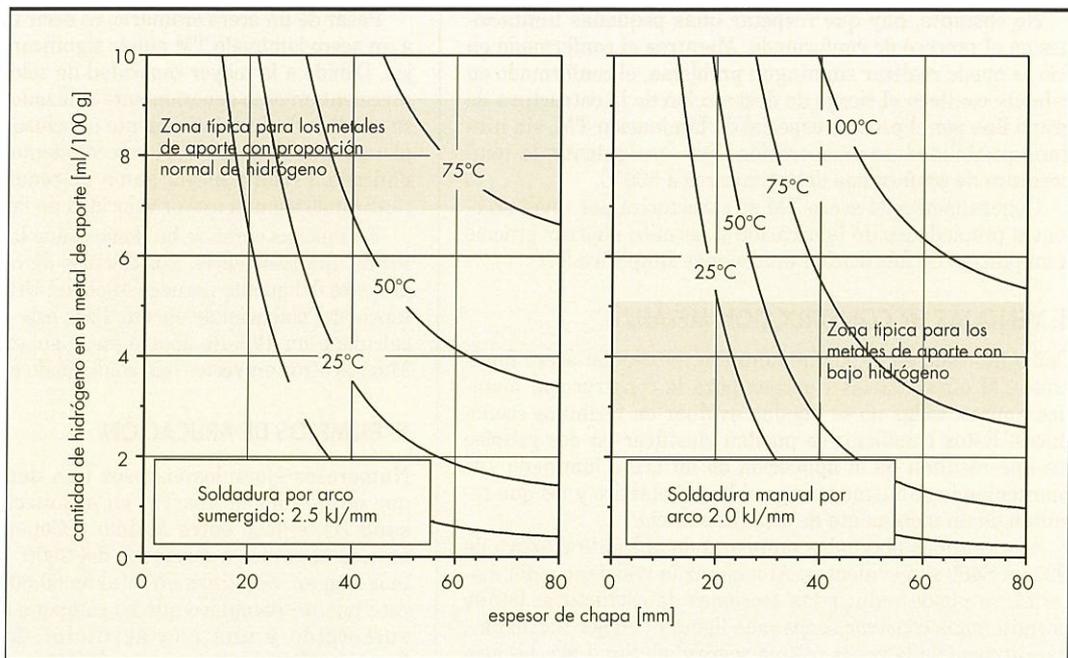


FIGURA 2.
Temperaturas de precalentamiento para S460ML.

Por eso, en la actualidad no solo se dan las exigencias de las normas respectivas sino también los análisis típicos de colada que suministran las acerías Europeas.

La principal ventaja del acero TM está clara: se puede alcanzar un carbono equivalente muy bajo por reducción de los elementos de aleación.

Este factor técnico influye naturalmente en la soldabilidad del material y por lo tanto de manera significativa en todo el proceso de soldadura. Por ejemplo, el precalentamiento que representa unos costos considerables en la puesta en obra de chapas gruesas, se puede reducir o hasta omitir totalmente. La Fig.1 resume las temperaturas de precalentamiento calculadas de acuerdo con EN 1011-2 [2], anexo C, método B, para un S355ML y dos aportes diferentes de calor en función del contenido de hidrógeno del metal de soldadura. Se entiende que se puede evitar totalmente el precalentamiento en condiciones adecuadas para esta calidad. Se ofrecen por lo tanto unas ventajas considerables si se compara con la S355J2G3 convencional que tiene que precalentarse a una temperatura de 130-150°C en las mismas condiciones de soldadura.

Fig.2 resume la temperatura necesaria de precalentamiento para la S460ML de alta resistencia. Se puede observar que el precalentamiento es necesario solo en caso de espesores mayores o de un metal de soldadura con mayor contenido en hidrógeno. Sin embargo, varios proyectos han demostrado que incluso chapas de 80 mm de espesor en esta calidad pueden soldarse sin ningún precalentamiento en función de la geometría de soldadura, asegurando al mismo tiempo un buen nivel de calidad.

Por otra parte, el acero TM no solamente se caracteriza por sus ventajas en el procedimiento de soldadura sino también por sus destacables propiedades en la zona afectada por calor (ZAC) después de soldar. Por ejemplo, la Fig. 3 indica los valores de energía de resiliencia Charpy-V después de soldadura en varios puntos de la zona ZAC, en función de la temperatura de calentamiento. Se puede ver claramente que se garantizan excelentes valores de resiliencia en la zona ZAC después de soldar, en muchos casos superiores a 100 J.

También se puede prever una buena ductilidad si se aplica un procedimiento de soldadura con alto aporte de calor. A sí, se puede obtener mayor energía de soldadura sin arriesgar la seguridad de la estructura. Damos más recomendaciones de soldadura del acero TM [3, 4].

Lo que se ha dicho para la soldadura – superioridad del acero TM sobre calidades convencionales normalizadas de misma resistencia – también se puede afirmar para el oxicorte [5]. Se puede realizar el oxicorte por líneas de calor, que calientan principalmente la superficie de la estructura, hasta una temperatura de 950°C sin que se observe una caída de resistencia o de ductilidad.

Cuando se oxicorta por puntos de calor, habrá que respetar una temperatura máxima de 700°C porque el tiempo de mantenimiento a alta temperatura es sensiblemente más largo. De cualquier modo, la reducción en resistencia y la tendencia a endurecer son de menor importancia si se compara con las calidades convencionales C-Mn.

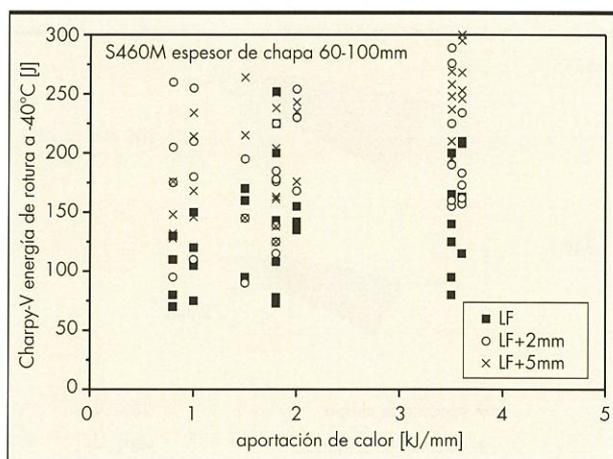


FIGURA 3. Energía de rotura después de soldadura en la zona afectada por el calor para S460ML.

No obstante, hay que respetar unas pequeñas limitaciones en el proceso de conformado. Mientras el conformado en frío se puede realizar sin ningún problema, el conformado en caliente conlleva el riesgo de destrucción de la estructura de grano fino por el proceso especial de laminación TM, sin ninguna posibilidad de recuperación. Por consiguiente, la temperatura de conformado debe limitarse a 580°C.

Generalmente, el acero TM se caracteriza por unas excelentes propiedades de fabricación y permite ahorrar gracias a un proceso de fabricación mucho más simplificado.

4. VENTAJAS EN CONSTRUCCIÓN METÁLICA

Como indicado en el párrafo anterior, el uso del acero laminado TM ofrece varias ventajas para la construcción metálica aunque todas no se puedan evaluar en términos económicos. Estos beneficios se pueden clasificar en dos grupos: los que resulten de la aplicación de un acero laminado TM manteniendo al mismo tiempo el límite elástico y los que resulten de un incremento de alta resistencia.

Las ventajas obtenidas aumentando el límite elástico de S355 a S460 son evidentes. Al mejorar la resistencia del material, se puede reducir las secciones de estructura, lo que permite unas construcciones más ligeras y mejor perfiladas, garantizando a la vez la misma seguridad. Sin duda, los aceros de alta resistencia serán relativamente más costosos comparados con aceros convencionales, pero, este encarecimiento es compensado en gran parte por la reducción del peso de material necesario.

Esta reducción de peso tiene efectos aun más provechosos tales como ahorro en costos de transporte y simplificación en proceso de montaje. Además, no hay que olvidar que permite estructuras más elegantes y estéticas en lo que se refiere a exigencias arquitectónicas.

La utilización de un acero de alta resistencia afecta también los costes de fabricación especialmente en la soldadura. Como lo muestra el ejemplo de una soldadura en doble V (Fig.4), solo se necesita una cantidad reducida de soldadura.

Esto produce:

- Ahorros de material de soldadura,
- Reducción de tiempo de soldadura,
- Reducción del tratamiento termico después de soldadura por menos dilatación,
- Reducción de tiempos de inspección de soldadura.

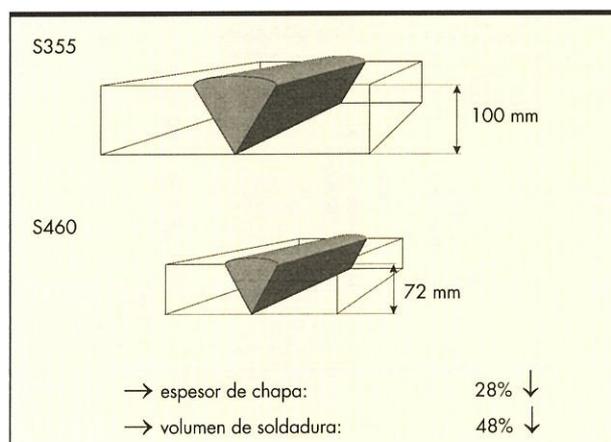


FIGURA 4. Reducción del volumen del cordón de soldadura utilizando aceros de alta resistencia.

Pasar de un acero ordinario, es decir un acero normalizado, a un acero laminado TM puede significar las siguientes ventajas. Debido a la mayor capacidad de soldar de un S460ML, el precalentamiento generalmente utilizado para chapas gruesas se puede reducir drásticamente o incluso se puede omitir completamente. En general, el procedimiento de soldadura es simplificado. Permite mayor gama de condiciones de soldar, garantizando así una mayor velocidad de fabricación.

En muchas obras se ha demostrado la eficiencia de los aceros de alta resistencia. Los cálculos de costos realizados en el proyecto del puente noruego Mjosund-Bridge indican la importancia del potencial de ahorro. Para este puente de 350T se ha calculado un 12% de ahorro en la superestructura de acero. Muchos otros proyectos han confirmado esta tendencia [6].

5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Numerosos ejemplos exitosos han demostrado la estética que ofrecen los aceros TM en arquitectura. El puente Øresund [7], enlace entre Malmö y Copenhague, que ha sido abierto al tráfico a mediados del 2000, puede ser el ejemplo más famoso. Se utilizó un total de 60.000T de acero TM para este puente de enlace que se compone también de un túnel sumergido y una isla artificial. Más de 25.500T de S460M/ML en espesores hasta 80 mm fueron empleadas para la estructura de los dos puentes de aproximación de la Fig. 5. Los tramos de la cubierta del puente se componen de 2 sujeciones paralelas de acero tipo Warren con diagonales de 45° y un módulo de sujeción de 20 m. Las partes superiores de las sujeciones se conectan por bloques de hormigón, mientras que la conexión de la parte inferior está garantizada por vigas transversales en cada nudo inferior. Gracias a la utilización de aceros de alta resistencia, Dragados Offshore fabricó de forma muy eficiente en sus talleres de Puerto Real (Cadiz) los 49 tramos en segmentos que se transportaron luego en barcaza hasta Malmö. Además, la longitud máxima de los tramos permitió reducir el número de pilas. Este aspecto fue particularmente importante para alterar lo menos posible las corrientes marinas muy sensibles en el estrecho de Øresund.

Otro ejemplo, que se puede señalar como verdadero hito, está todavía en construcción: el puente Ilverich que cruza el Rin al Norte de Dusseldorf y forma parte de un empalme de carreteras que completará la autopista del norte de esta ciudad a mediados del 2002. Fue un desafío especial para los di-

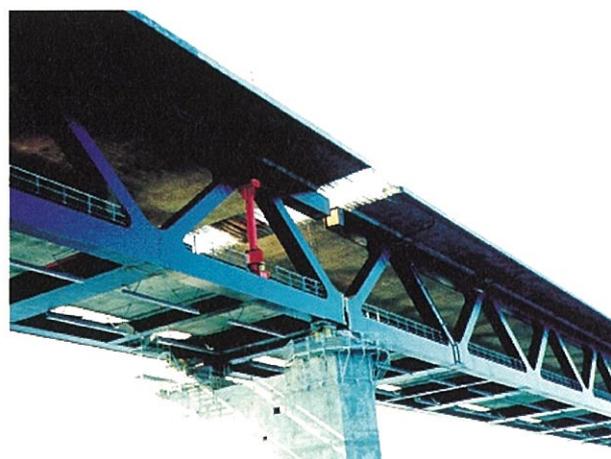


FIGURA 5. Construcción del puente Øresund (DK - S): 25.500 t S460ML.



FIGURA 6. Pilar durante la construcción del futuro puente Ilverich que cruza el Rin cerca de Düsseldorf (Alemania). Lo alto del pilar es fabricado con S460ML en espesores hasta 100 mm.

señadores limitar la altura de las pilas del puente a 34 m, debido a su proximidad de la zona de aterrizaje del aeropuerto situado en las inmediaciones. Las pilas fueron diseñadas en forma de V con una guía transversal en la parte superior (Fig. 6). Para soportar la tensión máxima en la estructura, la parte superior de la pila se fabricó en S460ML mod. con un peso de 300T por pila. El fabricante del acero tuvo que enfrentarse a un desafío ya que las autoridades oficiales exigieron una comprobación de las propiedades de resiliencia a -80°C con el fin de garantizar valores de resiliencia en la zona afectada por el calor después de soldadura. Se pudo realizar esta labor con éxito eligiendo una calidad especial -modificada a partir de calidades ya utilizadas en el sector Offshore.

Además, se emplearon chapas de espesor hasta 100 mm para la cabeza de la pila que soporta cargas en sentido transversal al espesor. Estas chapas TM, se suministraron en la misma calidad descrita antes, y son las de mayor espesor en S460M jamás utilizadas para construcción en Alemania. Por otra parte, ya se han utilizado chapas TM de espesor hasta 120 mm, para un puente autopista en el sur del Macizo Central en Francia.

Sin embargo, el uso de estos aceros no se limita solo a proyectos de gran prestigio. También se pueden aplicar a puentes con tramos de longitud mediana. Por ejemplo, la superestructura de acero de los puentes Zuid-Beveland en Holanda construidos en 1990 se compone de vigas longitudinales en S460M de espesores hasta 80 mm. Por la reducción de altura en las secciones transversales, se pudo conseguir un a luz máxima.

Asimismo, los aceros TM pueden mejorar las estructuras modernas que se componen de una estructura metálica y de una cubierta de hormigón. Por ejemplo, el puente Réroulins en el sur de Francia se compone de dos vigas longitudinales de acero y de un piso de hormigón. 465T de acero TM se utilizaron para las vigas, de las que 125T en S460ML en espesores hasta 80 mm. De esta manera, fue el primer puente en Francia cuyas vigas longitudinales fueron elaboradas totalmente en acero TM (Fig.7).

Sin embargo, la aplicación de los aceros TM no se limita a la construcción de puentes. También permiten responder a nuevas exigencias estéticas en grandes edificios. Un ejemplo típico se indica en la Fig.8, la torre Commerzbank en Frankfurt/Main de 298 m de altura, para cuya estructura se necesitaron 18.000T de chapas de acero. Espesores superiores a 30 mm se realizaron en S355M, mientras que las columnas soldadas de alta resistencia y las vigas se hicieron en S460M. Esta solución permitió reducir de forma notable los costos de construcción [9].

La industria eléctrica puede beneficiarse de las ventajas de estos aceros en la construcción de estructuras pesadas. Las columnas y vigas en cruz para la planta de energía térmica de



FIGURA 7. Puente de carreteras cerca de Réroulins (F). Vigas longitudinales en S460ML.

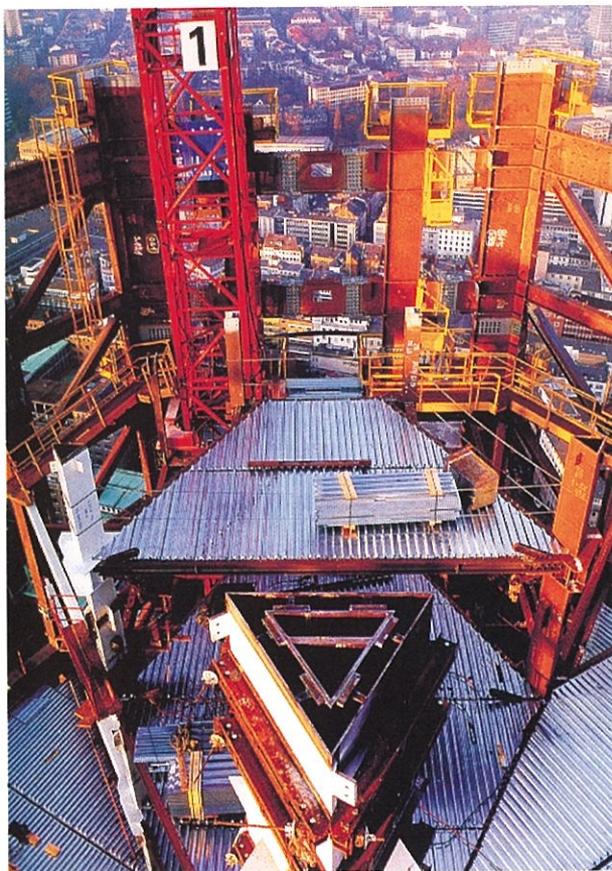


FIGURA 8. Columnas principales de la Commerzbank en Frankfurt/Main en acero de alta resistencia.

carbono en Alemania del Este Schwarze Pumpe fueron realizadas en S355M/ML, con chapas hasta 65 mm de espesor.

El uso de los aceros TM ya no se limita a la construcción metálica de puentes y edificios, sino también a otros campos tales como estructuras hidráulicas y offshore [10].

6. CONCLUSIONES

Para garantizar su competitividad, la construcción metálica siempre está en busca de materiales modernos a costos reducidos. Por consiguiente es un error comparar los diversos materiales solo desde el punto de vista de su precio de venta relativo. Los aceros TM se caracterizan por sus propiedades de puesta en obra, permitiendo a menudo soluciones muy provechosas analizando todas las repercusiones económicas de fabricación, transporte, montaje y mantenimiento. Estos aceros ofrecen un diseño muy estético de estructura. Muchos ejemplos en Europa demuestran la excelente experiencia con estos aceros.

REFERENCIAS

- [1] EN 10 113-3: Hot-rolled products in weldable fine grain structural steels. Part 3: Delivery conditions for thermomechanically rolled steels. 1993.
- [2] pr EN 10 11-2: Welding - Recommendation for welding metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steel. 1999.
- [3] Benkířer, G; Horn-Samodelkin, G.; Meyer, B.; Nolde, P.: Zur Schweißbeignung thermomechanisch gewalzter Baustähle, Schweißen und Schneiden '94, DVS-Berichte Bd. 162. Düsseldorf: DVS-Verlag 1994. p 143-147.
- [4] Hubo, R.; Hanus, F. E., Streißelberger, A.: Manufacturing and fabrication of thermomechanically rolled heavy plates, Steel Research 64 (1993) No. 8/9.
- [6] Hanus, F.E., Hubo, R.: Flame straightening of thermomechanically rolled structural steel, Steel Research 70 (1999) no 4/5 p. 193-197.
- [7] Hubo, R.; Hanus, F. E.: Thermomechanisch gewalzte Grobbleche für den Stahlbau, Schweiß- und Prüftechnik 7 (1996) p. 112-116.
- [8] Krumbach, G.; Hamm, S.: Die Öresundbrücke - Verbindung zwischen Schweden und Dänemark, Stahlbau 69 (2000) no 5 p. 349-357.
- [9] Kuhlmann, U.: Perspektiven im Verbundbrückenbau. Stahlbau 65 (1996) no 10 p. 331-337.
- [10] Hubo, R.; Martin, F.; Schröter, F.: Grobbleche für wirtschaftliche Stahlbau- und Offshore-Konstruktionen, Stahl und Eisen 120 (2000) no 11 p. 101-106.