

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ENDEREZADO POR LLAMA E IMPACTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

J. García¹, R. Lacalle¹, D. Ferreño¹, J. A. Álvarez¹, F. Gutiérrez-Solana¹

¹ Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avda/ Los Castros s/n, 39005 Santander, España.
E-mail: garciaacidj@unican.es

RESUMEN

El enderezado por llama es un proceso de calentamiento efectuado sobre componentes metálicos que permite distorsionar o rectificar la geometría de un elemento con el fin de conseguir adecuarla a los requerimientos de construcción o ejecución. Se basa en la aplicación de calor para lograr que el material experimente tensiones térmicas que deformen el elemento de forma permanente. El propósito del estudio recogido en este artículo es el de ilustrar el procedimiento y examinar las consecuencias del sobre las propiedades del material. El estudio se realizó sobre placas de cinco aceros diferentes sometidas previamente a un proceso de deformación mediante calentamiento por llama.

PALABRAS CLAVE: enderezado por llama, S235JR, S355J2, SA460ML, S690QL, S890QL, tensiones térmicas.

ABSTRACT

Flame straightening is a heating process performed on metallic components which allows to distort or to straighten the geometry of an element with the purpose of adapt it to construction or execution requirements. The process settles its basis on a heating applying to achieve thermal stresses on the material which, in result, deform the element. The purpose of this study is to illustrate the procedure and to examine the consequences of flame straightening on the material properties. The study was performed on plates of five different steel grades, which had been flame straightened previously.

KEYWORDS: flame straightening, S235JR, S355J2, SA460ML, S690QL, S890QL, thermal stresses.

1. INTRODUCCIÓN

El enderezado por medio de llama resulta una práctica común en el procesado de aceros estructurales. El objetivo que se persigue con dicha técnica consiste en introducir o revertir modificaciones en la forma del componente metálico con el fin de ajustarse a una geometría dada. Las deformaciones introducidas, de origen térmico, se consiguen mediante la aplicación de un flujo de calor sobre el componente, dando lugar a expansiones térmicas durante el proceso y a contracciones permanentes tras el enfriado.

El espectro de posibilidades de deformación de los componentes estructurales se obtiene mediante las distintas configuraciones posibles de los patrones de aplicación de llama [1, 2]. Hasta ahora, al ejecutar la técnica del enderezado por llama no se conoce con certeza la respuesta del componente tras el proceso, dado que es un proceso basado en el conocimiento adquirido con la experiencia del operario. El hecho de que el proceso esté influido por un gran número de parámetros ha dificultado desde sus orígenes el estudio teórico que permitiese delimitar su alcance y diseñar con

antelación el proceso en función de los objetivos de deformación deseados.

Este artículo es el resultado de un proyecto que trata de dotar al proceso del enderezado por llama de una base teórica que respalde la visión del proceso desde una base científica. En particular, en él se presentan los estudios realizados sobre las consecuencias del proceso de enderezado en las propiedades mecánicas y microestructurales de cinco aceros estructurales de amplia difusión en el mundo de la construcción y de la industria.

2. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ENDEREZADO POR LLAMA

Los mecanismos desencadenados por la aplicación de la llama sobre el material son dos, como se recoge en [3] y [4]. Durante la etapa de calentamiento se genera un flujo plástico de material debido a la expansión térmica del mismo. El material no calentado situado en el entorno de la zona calentada sirve de restricción a dicha elongación. Por otra parte, durante el enfriamiento, aparece una contracción longitudinal permanente. Esta

deformación final es la deformación objetivo del proceso de enderezado.

La llama se aplica directamente sobre el material mediante un equipo de oxi-fuel. El aporte de calor se realiza siguiendo patrones específicos de calentamiento (bandas, uves, líneas) correspondientes al tipo de deformación deseada y a la forma del componente a enderezar.

Para el caso de elementos estructurales de grandes dimensiones, tales como perfiles metálicos, la deformación se consigue mediante combinación y repetición de dichos patrones de calentamiento. Por lo general, la responsabilidad del diseño de las pautas y de la secuencia de aplicación de la llama recae en el juicio del operario. En la Figura 1 se observa la combinación y repetición de patrones de calor en alma y ala de un perfil HEA para conseguir una flexión sobre el eje mayor de inercia.



Figura 1. Enderezado por llama sobre perfil metálico

El flujo de calor se controla para que en la superficie del metal no se superen temperaturas que pudieran resultar en un cambio de fase en la composición del acero, usualmente no superando el límite postulado general de 750 °C. Este límite de temperatura, en realidad, depende de la calidad del acero. En el taller, el control de la temperatura es un control visual basado en la escala cromática del acero al aumentar de temperatura. Dicho control, naturalmente, presenta grandes desventajas en cuanto a variabilidad y subjetividad [5].

3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y MATERIALES EMPLEADOS

3.1. Procedimiento experimental

Para llevar a cabo el estudio se calentaron mediante llama placas rectangulares de dimensiones 500mm x 600mm x20mm de cinco aceros diferentes. El esquema de la Figura 2 ilustra el procedimiento de aplicación de la llama. El patrón de calentamiento se aplicó en sentido longitudinal, con una velocidad lineal que permitiese asegurar que en la superficie del metal se alcanzaban temperaturas por encima de las temperaturas recomendadas para cada metal por los expertos en enderezado por llama, por ejemplo en [3] y [6], tratando

de exponer al material a la condición pésima de calentamiento desde el punto de vista metalúrgico. El marco de sujeción de la placa permite la libre expansión en todas las direcciones.

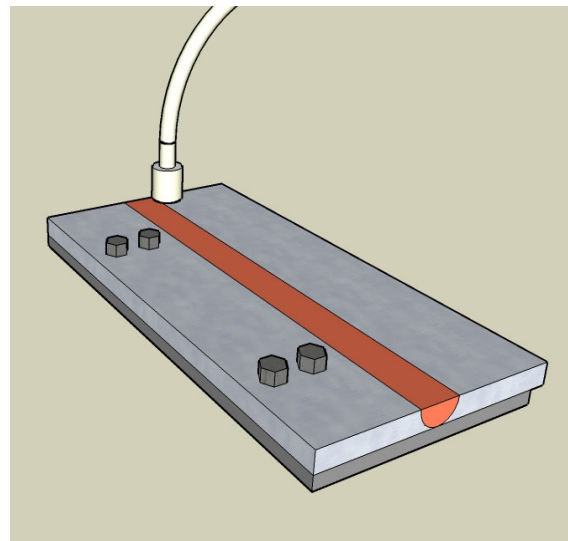


Figura 2. Esquema de la aplicación de la llama

3.2. Materiales empleados

Los aceros ensayados fueron cinco aceros estructurales, S235JR, S355J2, SA460ML, S690QL y S890QL [7]. La muestra de materiales escogidos para el ensayo cubre un amplio espectro de aceros en cuanto a diversidad de propiedades resistentes y características. La composición química de los cinco tipos de acero se recoge en la Tabla 1

Tabla 1. Composición química de los aceros

Acero	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S235JR	0,16	0,22	1,04	0,017	0,017	<0,08	<0,03
S355J2	0,106	0,493	1,57	0,013	0,0008	0,058	0,045
SA460ML	0,108	0,436	1,60	0,016	0,0006	0,050	0,052
S690QL	0,170	0,298	1,30	0,011	0,0008	0,030	0,034
S890QL	0,161	0,273	0,87	0,009	0,0010	0,51	0,471

El estudio del enderezado por llama sobre los aceros S235JR y S355J2 permite conocer las consecuencias del enderezado por llama en aceros dúctiles de bajo límite elástico de baja aleación. El acero SA460ML representa la oportunidad de conocer como afecta el enderezado a un acero laminado termomecánicamente. Las posibles desventajas o limitaciones de la técnica en templados y revenidos de alta resistencia se analizan a través del ensayo de los aceros S690QL y S890QL. Los aceros S235JR, S355J2 y SA460ML fueron calentados hasta una temperatura máxima de 850°C, mientras que los aceros de alta resistencia S690QL y S890QL hasta una temperatura máxima de 750°C.

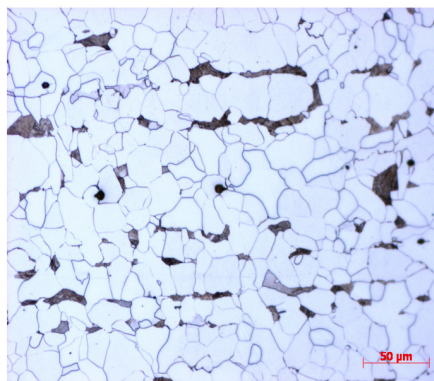
4. ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CALENTAMIENTO EN EL MATERIAL

El estudio realizado sobre las propiedades del material post-calentamiento trata de valorar el efecto del aporte de calor sobre las mismas. Con este fin, se comparó la microestructura, la dureza, el comportamiento a tracción y la resistencia al impacto mediante ensayos Charpy, del material calentado y el material base.

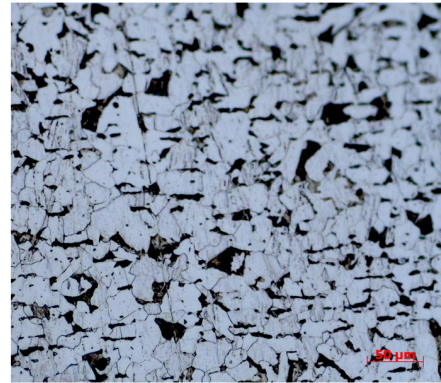
4.1. Impacto en la microestructura

En relación al posible cambio microestructural del material como consecuencia de una reordenación o transformación de fases debida al calentamiento, se realizaron análisis mediante microscopía óptica en secciones de orientación T-S de la zona directamente calentada y de sus proximidades. Las Figuras 3 a 7 presentan la comparación entre la microestructura del material base y la microestructura existente en la zona correspondiente a la superficie directamente calentada, para todos los aceros.

Se puede observar en las mismas Figuras 3 a 7 que el material ensayado exhibe un cambio en la microestructura para los cinco casos. En el caso de los aceros que presentan microestructura ferrítico-perlítica (S235JR, S355J2, SA460ML) se evidencia un refinamiento del grano así como la pérdida de la disposición bandeada de la perlita en favor de una disposición más caótica de la misma. Para el caso de los aceros de alta resistencia (S690QL, S890QL) se pierde la microestructura de bainita revenida en la zona calentada, dando lugar a la formación de ferrita y perlita con grano fino.

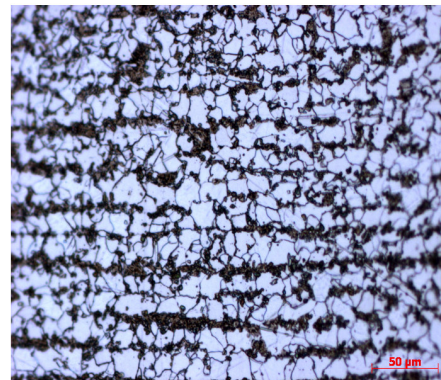


S235JR

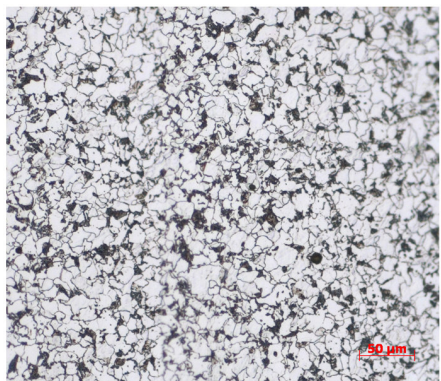


S235JR ENDEREZADO

Figura 3. Microestructuras acero S235JR

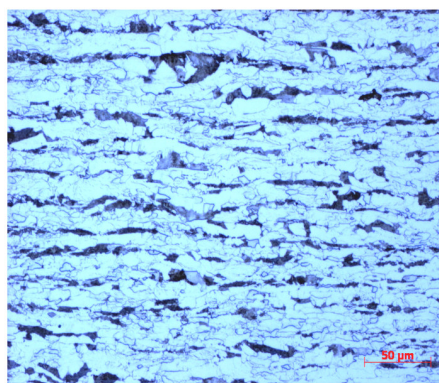


S355J2

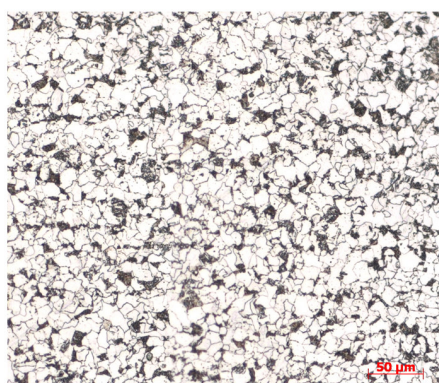


S355J2 ENDEREZADO

Figura 4. Microestructuras acero S355J2

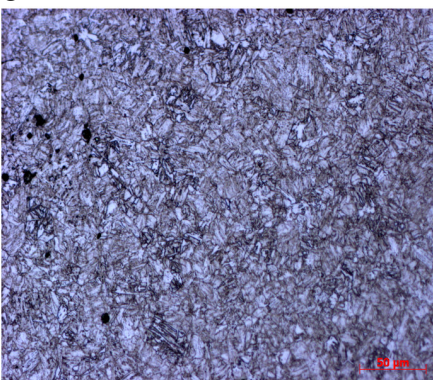


SA460ML

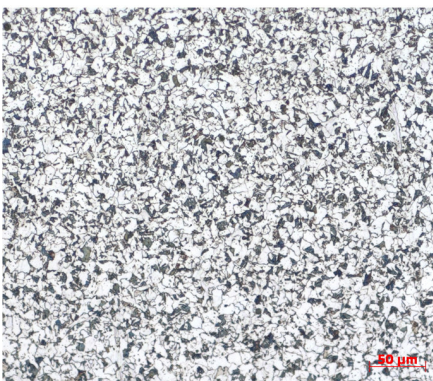


SA460ML ENDEREZADO

Figura 5. Microestructuras acero SA460ML

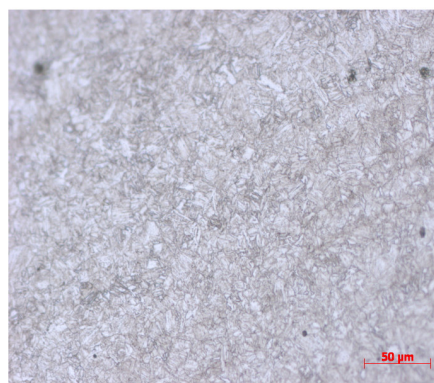


S690QL



S690QL ENDEREZADO

Figura 6. Microestructuras acero S690QL



S890QL



S890QL ENDEREZADO

Figura 7. Microestructuras acero S890QL

4.2. Impacto en la dureza

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers 1 kg [8] sobre el material calentado para determinar los efectos del enderezado por llama sobre la dureza del material. La Tabla 2 recoge la comparación de los valores medios de la dureza a lo largo de perfiles de dureza de los 20 mm de espesor de los cinco aceros, entre el caso del material calentado y el material base.

Tabla 2. Comparación de los valores de dureza

	S235	S355	SA460	S690	S890
Mat. base	185.8	191.9	228.0	290.9	354.1
Mat. Calentado	126.4	172.9	172.4	214.9	294.5

Se comprueba en general un descenso de la dureza en los cinco aceros, cuya explicación puede realizarse a través de los hallazgos del análisis microestructural. En los aceros de microestructura original ferrítico-perlítica (S235JR, S355J2, SA460ML) tiene lugar una difusión del carbono mientras que en los aceros de alto contenido en carbono (S690QL, S890QL), la bainita de la superficie se reconvierte en una microestructura con agrupaciones de ferrita, más blanda en general.

4.3. Impacto en las propiedades de tracción

En relación a las propiedades de tracción [9], se extrajeron probetas de tracción pertenecientes a la zona directamente calentada por la llama para su ensayo. Los resultados del límite elástico al 0,2 %, $Re\ 0.2\%$, y de la tensión de rotura, σ_u , se recogen en la Tabla 2. La comparación visual de la repercusión del enderezado sobre el límite elástico y la tensión de rotura se representa en las Figuras 8 y 9.

Tabla 2. Propiedades a tracción del acero base (B) y calentado (C)

	S235 B	S235 C	S355 B	S355 C	S460 B	S460 C
Re 0.2% (Mpa)	284	247	379	349	469	470
σ_u (Mpa)	402	410	512	505	597	596
	S690 B	S690 C	S890 B	S890 C		
Re 0.2% (Mpa)	732	688	910	891		
σ_u (Mpa)	809	767	972	961		

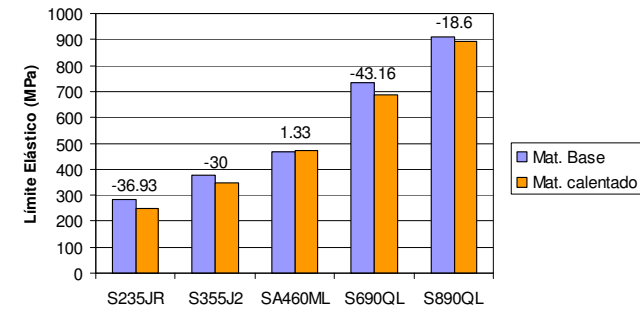


Figura 8. Comparación del límite elástico tras enderezado.

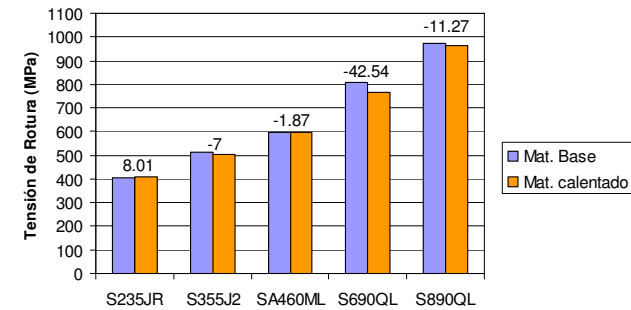


Figura 9. Comparación de la tensión de rotura tras enderezado

4.2. Impacto en la resistencia al impacto

El estudio de los efectos que el enderezado por llama provoca sobre el material se completó con el cotejo de las propiedades ante el impacto antes y después del calentamiento. Se extrajeron probetas Charpy de la zona calentada de las chapas en dirección LT para ser ensayadas. La curva Charpy resultante se comparó con la curva Charpy obtenida con el material base. Las figuras 10 a 14 recogen la superposición de ambas curvas para cada acero.

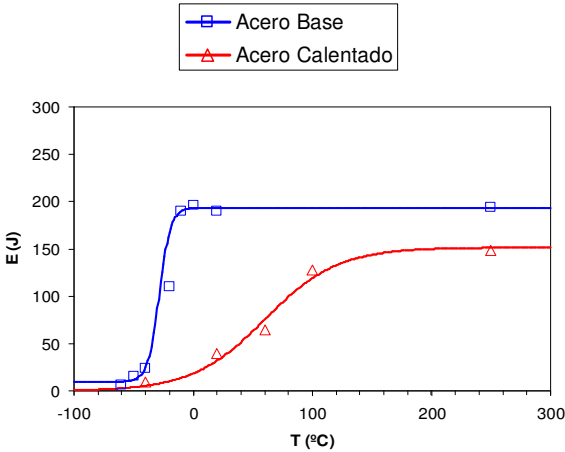


Figura 10. Comparación de resultados de impacto Charpy, acero S235JR

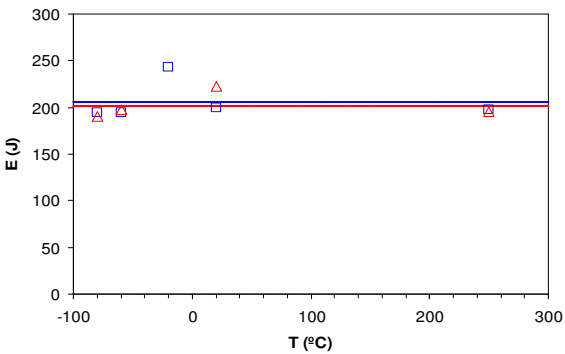


Figura 11. Comparación de resultados de impacto Charpy, acero S355J2

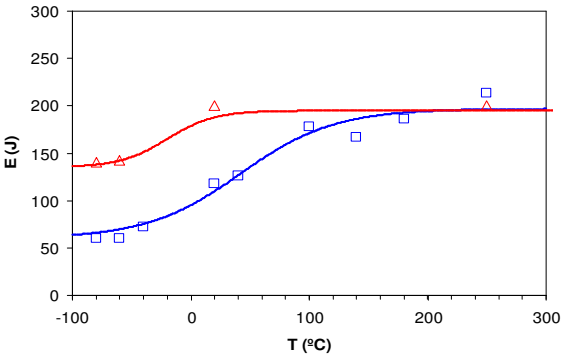


Figura 12. Comparación de resultados de impacto Charpy, acero SA460ML

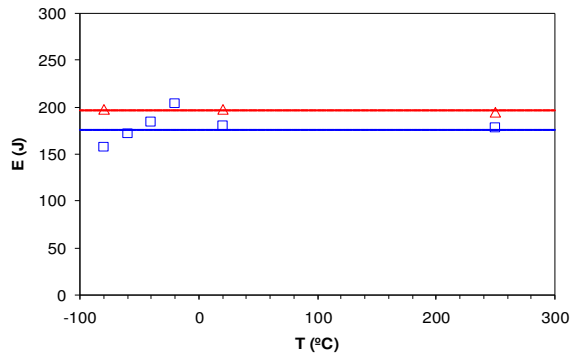


Figura 13. Comparación de resultados de impacto Charpy, acero S690QL

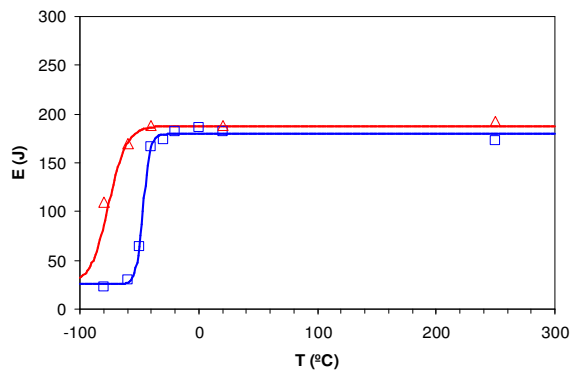


Figura 14. Comparación de resultados de impacto Charpy, acero S890QL

5. CONCLUSIONES

Es evidente, tras el estudio, que existe un cambio microestructural, más o menos acusado en función de la naturaleza del acero, tras la aplicación de la llama. Sus consecuencias más directas son la pérdida de homogeneidad en la dirección del bandeo de la perlita en los aceros ferrítico-perlíticos. Los aceros de alto contenido en carbono presentan una transformación de la microestructura en ferrita en la zona calentada.

Dichos cambios microestructurales se traducen en un descenso de la dureza del material en la zona calentada para todos y cada uno de los casos.

En cuanto a las propiedades de tracción, el calentamiento provoca un leve descenso en el límite elástico y en la tensión de rotura.

El comportamiento de los aceros calentado frente al ensayo de impacto no presenta características comunes.

Por una parte el acero S235JR presenta un desplazamiento de la temperatura de transición hacia la derecha así como un descenso en el Upper Shelf, señalando un rasgo de fragilización.

Los aceros S355J2 y S690QL no muestran evidencias de cambio en sus curvas Charpy.

En el caso de los aceros SA460ML y S890QL, sus propiedades ante el impacto mejoran levemente.

REFERENCIAS

- [1] Avent, R. R., Mukai, D. J., Robinson, P. F. “ Heat-Straightening Repairs of Damaged Steel Bridges, A Technical Guide and Manual of Practice”, *Report No FHWA-IF-99-004, Federal Highway Administration*, 1998.
- [2] Avent, R. R., Mukai, D. J. ,“ Heat-Straightening Rolled Shapes, A Technical Guide and Manual of Practice”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, pag. 755-763, 2000.
- [3] *Guidance for forming structural steels in processing*, D.D. CEN/TR 10347:2006
- [4] Avent, R. R., “ Engineered heat straightening comes of age”, *Modern steel construction*, pag. 32-39, Feb 1995.
- [5] Avent, R. R., “ Designing Heat Straightening Repairs”, *Proc., Nat. Steel Constr. Conf., American Institute for Steel Construction*, 1992.
- [6] Dennin, G.,“ Einfluss des Flammrichtens auf das Verformungsverhalten und die Korrosionsbeständigkeit von Grobblechen aus unlegierten und legierten Stählen”, *Schw. Schn* 28, pag. 421-425 1976.
- [7] UNE-EN 10025 “Productos laminados en caliente de acero para estructuras”
- [7] UNE-EN ISO 6507 “Materiales metálicos: Ensayo de dureza Vickers”
- [8] UNE-EN ISO 10002 “Materiales metálicos: Ensayo de tracción”