

# EL EUROCÓDIGO 9 "PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO"

(THE EUROCODE 9 "DESIGN OF ALUMINIUM STRUCTURES")

José Luis Ramírez Ortiz, Dr. Ingeniero Industrial  
LABEIN Centro Tecnológico

Fecha de recepción: 26-IV-99  
750-13

ESPAÑA

## RESUMEN

*El aluminio es un material estructural de interés, por unir ligereza y mínimas necesidades de protección, junto con una resistencia importante.*

*La falta de conocimiento de las reglas de proyecto con el material, debido a la escasa disponibilidad de guías o recomendaciones de diseño, junto con un precio elevado, son factores que condicionan la muy escasa presencia del aluminio en la construcción de estructuras.*

*En el presente artículo se expone una visión sucinta de la tipología y propiedades de las aleaciones de aluminio y se describe el contenido del Eurocódigo 9 "Proyecto de estructuras de aluminio" aprobado por el CEN (Comité Europeo de Normalización) en mayo de 1998 y que aparecerá en castellano en breve publicada por AENOR, como Norma Europea Experimental.*

## ABSTRACT

*Aluminium is an interesting structural material because its lightness and minimum maintenance needs, together with its important strength.*

*The lack of knowledge of design rules with this material owing to the shortage of design guides, together with its higher cost, are factors that lead to the very scarce use of aluminium in the construction of structures.*

*In present article it is dealt with a brief look to the typology and properties of the structural aluminium alloys, and it is described the content of Eurocode 9 "Design of aluminium structures", approved by CEN (European Committee for Standardization) in may 1998 that it is foreseen to be published in spanish by AENOR in short time.*

## INTRODUCCIÓN

Cuando imaginamos aplicaciones estructurales de aleaciones de aluminio pensamos de inmediato en la aeronáutica y los cerramientos de edificios y, últimamente, también en los ferrocarriles y automóviles. No tenemos, pues, muy presentes las importantes posibilidades y realizaciones de dichas aleaciones de aluminio en el campo de la construcción y, muy probablemente, ignoramos la existencia de un Eurocódigo concreto dedicado a ellas.

El presente artículo tiene su origen, precisamente, en recordar la aparición, en mayo de 1998, de tres documentos, publicados por el CEN (Comité Europeo de Normalización), con los textos definitivos del Eurocódigo 9 "Diseño de Estructuras de Aluminio", destinados al proyecto de edificios y trabajos de ingeniería civil y estructural en aluminio. Dichos documentos son:

ENV 1999-1-1:1998 Eurocode 9: Design of aluminium structures

## Part 1-1: General rules and rules for buildings

ENV 1999-1-2:1998 Eurocode 9: Design of aluminium structures

## Part 1-2: General rules-Structural fire design

ENV 1999-2:1998 Eurocode 9: Design of aluminium structures

## Part 2: Structures susceptible to fatigue

En este momento estos documentos están en vías de traducción a los diferentes idiomas, estando ya avanzada la versión al castellano, siendo previsible que aparezcan publicados como Norma Europea Experimental por AENOR, en el plazo de pocos meses.

## EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

## Consideraciones generales

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre pero su proceso de obtención exige un elevado consumo energético. Normalmente se parte de la bauxita que, con sosa, resulta, en una alta proporción de alúmina, sobre la que se trabaja por electrólisis ígnea para obtener el aluminio.

Las propiedades del aluminio, sin embargo, compensan dicho balance energético, inicialmente desfavorable. En efecto, tienen un bajo punto de fusión, 660 °C, frente a los 1.537 °C del hierro, siendo fácil de conformar. El proceso de extrusión permite obtener perfiles de forma cualquiera, que no pueden ser obtenidos por laminación.

El aluminio de pureza comercial (más de 99% de Al) no puede considerarse estructuralmente, debido a las bajas resistencias, siendo necesario acudir a elementos de aleación que mejoran sensiblemente las características mecánicas, aunque algunas otras propiedades resulten disminuidas.

Como propiedades genéricas de las aleaciones se pueden destacar, además del bajo punto de fusión y de tratamientos térmicos, la baja densidad (un tercio de la del acero), la elevada resistencia a la corrosión y la facilidad de mecanizado y fabricación, dentro de un nivel de resistencia importante y ductilidad suficiente. Por otra parte, el módulo de elasticidad (del orden de la tercera parte de la del acero) puede conducir con más facilidad a inestabilidad o deformaciones importantes y la resistencia de los materiales, en una unión soldada, resulta, generalmente, disminuida. Lo anterior hace que haya que utilizar estos materiales de forma ventajosa, con un diseño adecuado específicamente, aprovechando las ventajas y minimizando el efecto de los inconvenientes.

## Las aleaciones de aluminio

El mundo de las aleaciones de aluminio es amplio, un tanto complejo y bastante desconocido.

Las aleaciones de aluminio se clasifican, según el proceso de fabricación, en dos grandes familias: las llamadas de *forja*, para laminación o extrusión, que admiten operaciones de conformación posterior y las de *moldeo*, que pretenden disponer de propiedades, con el fin de obtener las formas finales mediante el llenado de moldes.

La designación de las aleaciones que ha tenido un uso más generalizado (adoptada en las EN y en el Eurocódigo) es la de tipo numérico, derivada, a su vez, de la nomenclatura americana (Aluminium Association), representada por un número de cuatro dígitos para las aleaciones de forja. Si la primera cifra es 1, significa que el contenido en Al es mayor del 99%. La primera cifra, del 2 al 8, denota otras aleaciones, identificando el principal elemento de aleación. En particular, existe la siguiente correspondencia:

1 x x x	Aluminio puro ( más de 99%)
2 x x x	Cobre
3 x x x	Manganeso
4 x x x	Silicio
5 x x x	Magnesio
6 x x x	Magnesio y silicio
7 x x x	Zinc
8 x x x	Otros elementos

El segundo dígito suele significar modificaciones de la aleación y, las dos últimas cifras, identifican la aleación dentro de cada grupo. Para las aleaciones de colada se utiliza un sistema similar.

En la especificación de las aleaciones figura, a continuación de la designación química, un símbolo, con letra y números, que se refieren a su estado metalúrgico. Así tenemos :

F x (x)	Estado bruto de fabricación
O x (x)	Recocido
H x (x)	Endurecido por deformación en frío
W x (x)	Templado no estabilizado
T x (x)	Con tratamiento térmico

Así pues, por poner un ejemplo, una aleación bastante utilizada, estructuralmente comparable, desde el punto de vista resistente, con el acero S235, podía ser la:

EN AW - 6061/T6 de  $f_{0.2} = 240$  MPa

que es una aleación al silicio y magnesio (6xxx), calentada a temperatura elevada y enfriada rápidamente, para sorprender la estructura solubilizada no trabajada en frío y envejecida artificialmente (T6).

No todas las familias de aleaciones aparecen en el

Eurocódigo 9 como utilizables, pero podemos reflejar sus propiedades de una manera sucinta:

Serie 1000: Aluminio muy puro, muy dúctil, de muy baja resistencia, pero de muy alta resistencia a la corrosión.

Serie 2000: Pueden tener elevada resistencia, comparable con los aceros S275 y S355, pero tienen baja resistencia a la corrosión y baja soldabilidad. Se emplean en construcción aeronáutica, en que las uniones son remachadas.

Serie 3000: Algo mayor resistencia que la Serie 1000. Gran resistencia a la corrosión. Aplicación específica en sistemas de paneles y tejados.

Serie 4000: Similares en propiedades a la Serie 3000, y son las aleaciones de moldeo por excelencia.

Serie 5000: No admiten tratamiento térmico y la mejora de resistencia se hace por deformación en frío. Muy buena resistencia a la corrosión. Muy buena soldabilidad con moderado descenso de resistencia en la zona afectada por el calor. Muy utilizada en estructuras marinas, barcos y vehículos.

Serie 6000: Fácil de laminar y extruir. Buena resistencia a la corrosión, incluso marina. Fácil soldadura. Muy utilizada en estructuras, por las propiedades anteriores, junto a resistencias comparables al acero S235.

Serie 7000: Elevadas resistencias (comparable al S275). Presentan buena resistencia a la corrosión y se usan en estructuras soldadas, debido a que son autotemplables, lo que permite la misma resistencia en la zona afectada por el calor. Si se añade cobre se obtienen las aleaciones de mayor resistencia ( $f_{0,2} = 500 \text{ MPa}$ ), pero con poca soldabilidad y resistencia a la corrosión.

### Propiedades físicas y mecánicas

Si consideramos los parámetros físicos más relevantes para el uso estructural y con relación al acero, podríamos decir que :

La densidad del aluminio es algo menor que la tercera parte de la del acero.

El módulo de elasticidad también es del orden del tercio del acero.

El coeficiente de dilatación térmica es del orden del doble del acero.

En cuanto a propiedades mecánicas, nos hemos referido ya a posibilidades de resistencias análogas a las de los aceros S235 y S275, con suficiente ductilidad. Se utiliza

el valor  $f_{0,2}$  como límite elástico convencional para los cálculos, ya que el diagrama carga-deformación es una curva continua, sin escalón de cedencia.

Se puede también hacer notar que estas aleaciones no pierden resistencia a bajas temperaturas y, más aún, no tienen una temperatura de transición definida a la que pueda pensarse que sobreviene la rotura frágil. Puede, pues, decirse que las aleaciones de aluminio son menos susceptibles que los aceros a la rotura frágil, sea a bajas temperaturas o ambientales. Por ello no se suelen requerir exigencias de ensayos de tenacidad en las especificaciones.

En cuanto a fatiga, la construcción en aluminio es más sensible que en acero, siendo, las carreras de tensiones admisibles, claramente menores, para igual número de ciclos y detalle estructural semejante.

### Comportamiento a la corrosión

La protección del acero es cara, pues, sin medidas específicas, el proceso de corrosión tiende a acelerarse. Como contraste, los procesos de corrosión en el aluminio tienden a cesar naturalmente con la formación de una capa natural de óxido muy fina, estable y adherente.

En cualquier caso, los perjuicios de una oxidación en el aluminio son estéticos y no estructurales. Cuanto más puro es el aluminio mayor es su resistencia a la corrosión y tiene propiedades excelentes en ambientes industriales, marinos y en presencia de agua de pH neutro.

La resistencia a la corrosión está condicionada por los elementos de aleación: el magnesio, por ejemplo, la mejora y el cobre la disminuye. De ahí que para elegir una aleación haya que buscar un equilibrio entre propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas.

### INTERÉS DEL EMPLEO ESTRUCTURAL DEL ALUMINIO

Después de haber considerado, sucintamente, las propiedades y peculiaridades de las aleaciones de aluminio, podemos imaginar en qué terrenos podría competir con el acero.

Probablemente, las dos propiedades diferenciales fundamentales son: la ligereza y la llamada resistencia a la corrosión.

La ligereza, densidad del orden de la tercera parte de la del acero, hace que las aleaciones de aluminio tengan una resistencia específica del doble o triple que las de los aceros. Ello facilitará las situaciones en donde el peso propio es importante:

- . Facilitando el montaje.
- . Permitiendo el transporte de grandes conjuntos.
- . Menores cargas en cimentación.
- . Menor gasto energético durante la fabricación o en estructuras en movimiento.

La ausencia de corrosión, hará posible:

- . Reducidos gastos de mantenimiento.
- . Permanencia de una estética interesante.
- . Permanencia de prestaciones estructurales.

Todo lo anterior hace que sean utilizaciones típicas:

- . Cubiertas de gran luz, en donde las cargas muertas pueden ser grandes, respecto a las sobrecargas.
- . Estructuras construidas en lugares poco accesibles, en donde el transporte y montaje pueden resultar enormemente costosos. Por ejemplo, una torre de transporte eléctrico puede ser conducida in situ, totalmente montada, por medio del helicóptero.
- . Estructuras cuyo mantenimiento cree problemas de servicio, como pórticos de señalización viaria.
- . Estructuras situadas en cubiertas húmedas o corrosivas, como cubiertas de piscinas y depósitos, puentes sobre ríos y estructuras hidráulicas.
- . Estructuras con partes móviles, como puentes, vehículos, ferrocarriles, aparatos de elevación,....
- . Estructuras como puentes o aparatos de elevación y que, renovados en aluminio, permiten el aumento de la carga de servicio.

## EL EUROCODIGO 9 (EC9)

### Redacción

El Eurocódigo 9 es el más joven de dichos códigos. Aunque la primera reunión plenaria tuvo lugar en noviembre de 1992, las actividades de los grupos de trabajo que se constituyeron se iniciaron a comienzos de 1994, quedando aprobadas las últimas correcciones en una última reunión plenaria en octubre de 1997. Finalmente, en mayo

de 1998, fueron publicadas en inglés, por el Comité Europeo de Normalización, los tres documentos referenciados a principio del artículo, relativos a: Reglas Generales, Fuego y Fatiga. No se prevé la preparación de algún otro documento de este Eurocódigo en un futuro próximo. En estos momentos se está realizando la versión al castellano, esperándose que puedan aparecer los tres documentos publicados en el plazo de unos meses.

La preparación de este Eurocódigo ha seguido muy de cerca el modelo del de la Estructura de Acero y muchas de las comprobaciones, respecto al dimensionamiento estructural, son parecidas. Nuestro propósito ahora es señalar los aspectos del EC9 que pueden ser más peculiares.

### Materiales

El panorama complejo de tipos de materiales que antes hemos presentado está en el EC9 con toda su riqueza, pero con una clara especificación de propiedades y guías, para la elección del tipo más conveniente.

Se dispone de cinco tablas de características mecánicas para las diversas aleaciones de la Serie 3000, 5000, 6000 y 7000, para materiales laminados, extruidos, forjados y colados, con límites elásticos convencionales y que van de 70 MPa a 280 MPa. Se dispone, igualmente, de tablas de características de remaches y tornillos en aluminio, acero y acero inoxidable y de las aleaciones a utilizar como metal de aportación en la soldadura. En relación con esto último, se especifican las posibilidades o los tratamientos a realizar para el contacto entre metales en las uniones y el tipo de material de aportación correspondiente a las diferentes combinaciones de aleaciones a unir.

Finalmente, es digno de destacar que las diferentes aleaciones estructurales tienen una clasificación respecto a durabilidad y que, en función de ella, del espesor y del tipo de ambiente, se especifican los tipos de protección adecuados.

Insistimos, pues, que la elección del material, más compleja que en los casos del acero, queda ayudada y clarificada en el Capítulo 3, Materiales y en el Anejo B, titulado Selección de Materiales.

### Estados límite últimos

Este capítulo es muy completo y de cierta complejidad puesto que incluye los modos de rotura por flexión y compresión, que, a su vez, encierran un gran número de comprobaciones relativas al abollamiento de los planos integrantes de los perfiles, debido a lo crítica que es la inestabilidad en las estructuras de aluminio, por lo que respecta al módulo de elasticidad, la tercera parte del que corresponde al acero.

Esta materia está complementada por varios anexos informativos especializados, tales como el del "Cálculo de fuerzas y momentos internos", "Métodos de análisis global", "Modelos analíticos de la relación tensión-deformación", "Estabilidad de pórticos", "Comportamiento de las secciones transversales más allá del límite elástico", "Pandeo lateral con torsión" y "Propiedades torsionales de perfiles de pared delgada".

Por lo que respecta al pandeo por flexión, a diferencia del acero, da dos curvas de pandeo, para las aleaciones con tratamiento térmico o no, respectivamente. Otras influencias como la asimetría de la sección, la frecuencia de elementos de clase 4 y la influencia de las soldaduras, se dan por medio de coeficientes multiplicadores.

El tema de la disminución de resistencia en la zona afectada por la soldadura (HAZ), variable con las aleaciones, por la condición metalúrgica y el tipo de soldadura, está presente continuamente y se traduce, en general, afectando a la sección transversal, haciendo necesaria la utilización de un valor eficaz reducido en las comprobaciones estructurales, o bien disminuyendo la resistencia adecuadamente para comprobaciones tensionales directamente en la zona afectada por el calor.

En la figura 1, tomada del EC9, se dan las extensiones de las HAZ en distintos tipos de uniones, oscilando los valores de  $b_{\text{haz}}$  entre 20 y 40 mm, dependiendo de los espesores y, en la tabla 1, igualmente del EC9, se dan los factores de reducción de resistencia o de sección, según se trate de comprobaciones tensionales o de cálculo de secciones eficaces.

### Uniones

En este capítulo se da una información completa respecto a la forma de diseño de uniones remachadas, atornilladas y soldadas y, lo que resulta más novedoso, la referencia a uniones con adhesivo.

En uniones por fricción atornilladas a base de tornillos de alta resistencia, se han llegado a tomar, para coeficientes convencionales de rozamiento, los obtenidos por nosotros (3) y en uniones soldadas hay que contar con el problema de reducciones de resistencia en la zona afectada por el calor, citado en el apartado anterior.

Con respecto a la novedad que presentan las uniones pegadas, se restringen a uniones de cortante (no de fuerzas que tiendan a abrir la junta), dándose recomendaciones

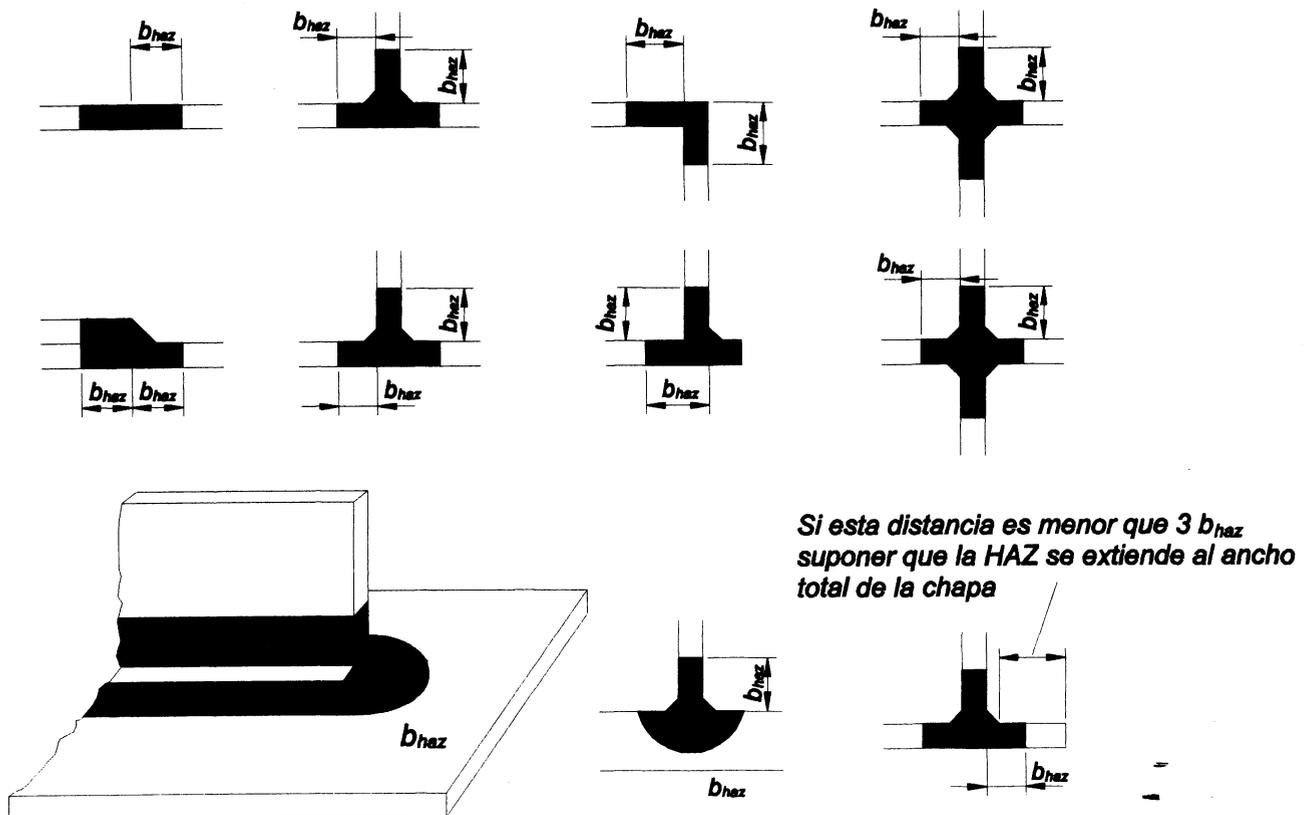


Figura 1.- Extensión de la zona afectada por el calor (HAZ).

Tabla 1 : Factor de reducción en la HAZ ( $\rho_{\text{haz}}$ )

Para todas las aleaciones suministradas como extrusiones, chapa, tubo estirado y forjas en las condiciones O y F			
Extrusiones, chapa, tubo estirado y forjas en aleaciones Serie 6xxx y 7xxx en condiciones T4, T5 y T6			
Aleación serie	Condición	$\rho_{\text{haz}}$ (Soldadura MIG)	$\rho_{\text{haz}}$ (Soldadura TIG)
6xxx	T4	1,00	--
	T5	0,65	0,60
	T6	0,65	0,50
7xxx	T6	0,80	0,60
		1,0	0,80
Chapa o forja en aleaciones 5xxx, 3xxx y 1xxx ( en condición de endurecimiento por deformación H)			
Aleación serie	Condición	$\rho_{\text{haz}}$ (Soldadura MIG)	$\rho_{\text{haz}}$ (Soldadura TIG)
5xxx	H22	0,86	0,86
	H24	0,80	0,80
3xxx	H14,16,18	0,60	0,60
1xxx	H14	0,60	0,60

Tabla 2: Resistencia característica a cortadura de adhesivos

Tipo de adhesivo	$F_{v, \text{adh}}$ N/mm <sup>2</sup>
1 Componente, curado en caliente, epoxy modificado	35
2 Componentes, curado en frío, epoxy modificado	- 25
3 Componentes, curado en frío, acrílico modificado	- 20

sobre los tipos de adhesivos y pretratamientos superficiales, dándose las resistencias características a cortante de adhesivos en la tabla 2, a fin de poder ser utilizados con coeficientes de seguridad relativos al material 3, valor alto, justificado por la dispersión de resultados en los adhesivos y la insuficiente experiencia de que se dispone.

### Fuego

El diseño -frente a incendio- de estructuras de aluminio se trata en la Parte 1-2. Reglas generales "Diseño estructural a fuego" y se basa, bien en métodos simples de cálculo, aplicado a elementos individuales o, también, en métodos de cálculo generales, que asumen el concepto de curva de incendio natural. Cuando no se puede disponer de métodos simplificados de cálculo, que dan lugar a resultados conservadores, es necesario acudir a un método basado en ensayos o a un método de cálculo general.

En el documento se dan abundantes datos de las propiedades en caliente de las aleaciones de aluminio, de la transferencia térmica con los perfiles y de parámetros de radiación.

### Fatiga

Esta importante condición de diseño es objeto de un documento específico: la Parte 2 "Estructuras susceptibles a la fatiga", presentando reglas de diseño a través de los métodos de vida de fatiga, tolerancia al daño y diseño por ensayos.

Para el cálculo a fatiga normal, son de gran utilidad las tablas incorporadas en las Categorías de Detalle para material base, elementos soldados, atornillados e incluso uniones, por medio de adhesivo.

Respecto a este tema, podemos decir que hemos tenido también ocasión de colaborar aportando los resultados de un proyecto de investigación que realizamos

recientemente, en el marco del programa EUREKA, sobre resistencias a fatiga de uniones atornilladas pretensadas (4).

Aun reconociendo que la normativa debe ser prudente y proporcionar valores suficientemente ratificados, estimamos que se podría haber asignado categoría de detalle algo más alta a este tipo de uniones sin dificultad, separando el tratamiento superficial de chorreado, de otro que consiste en el simple desengrasado, englobándose, en el Eurocódigo, en el mismo apartado de fatiga.

### Conclusión

Se ha pretendido, con el presente artículo, la divulgación de la aparición de tres documentos del Eurocódigo 9 "Diseño de Estructuras de Aluminio", en cuya elaboración hemos tenido la ocasión de colaborar, destacando la amplia disponibilidad de datos y metodología, con lo que ello presupone para el diseño de estructuras de aluminio, quizás todavía poco extendidas, pero de propiedades muy ventajosas.

### BIBLIOGRAFÍA

- (1) MAZZOLANI, F.M.: "Aluminium Alloy Structures" Pitman Publishing Limited-London 1985
- (2) LOUIS RAMPA, E: "El Aluminio: propiedades, aleaciones, transformación" Jornadas Técnicas sobre Estructuras en Aluminio. Bilbao Noviembre 1978
- (3) RAMÍREZ, J.L.: "Aluminium Structural Connections: Conventional Slip Factors in Friction Grip Joints" Internacional Conference on Steel and Aluminium Structures. Cardiff U.K. Julio 1987
- (4) ATZORI, B.; RAMÍREZ, J.L.: "Experimental Investigation and Evaluation of aluminium Bolted Connections" Stahlbau 67 (1998)

\*\*\*