



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Desarrollo de curvas S-N en aceros con agujeros circulares obtenidos con corte térmico

Trabajo realizado por:

Javier Alvado Benítez

Dirigido:

D. Sergio Cicero González

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Mención Construcciones Civiles

Santander, Febrero 2016

TRABAJO FINAL DE GRADO





1. Introducción	5
2. Estado del Arte	8
2.1. Introducción	8
2.2. Fatiga	11
2.2.1. Introducción	11
2.2.2. Iniciación de fisuras	14
2.2.3. Propagación de Fisuras	17
2.2.4. Evaluación de la vida a fatiga en un componente	20
2.2.4.1. Introducción	20
2.2.4.2. Parámetros de análisis	21
2.2.4.3. Ley de Basquin y Ley de Coffin-Mason	23
2.2.5. Curvas S-N	26
2.2.5.1. Introducción	26
2.2.5.2. Relación entre el rango de tensiones y los ciclos hasta rotura	28
2.2.5.3. Ajuste de resultados	29
2.2.5.4. Método de regresión por mínimos cuadrados	32
2.2.5.5. Tamaño de la muestra	33
2.2.5.6. Definición de las curvas S-N de diseño	35
2.2.6. Normativa de diseño a fatiga	41
2.2.6.1. Introducción	41
2.2.6.2. Eurocódigo 3	42
2.3. Métodos de corte	44
2.3.1. Introducción	44
2.3.2. Oxicorte o corte por llama	44
2.3.2.1. Concepto	44
2.3.2.2. Equipo	46
2.3.2.3. Parámetros de corte	48
2.3.3. Corte por plasma	49
2.3.3.1. Concepto	49
2.3.3.2. Equipo	51
2.3.3.3. Parámetros de corte	52
2.3.3.4. Materiales y espesores de corte	53
2.3.4. Corte por láser	54
2.3.4.1. Concepto	54
2.3.4.2. Tipologías de corte por láser	55
2.3.4.3. Equipo	57
2.3.4.4. Parámetros de corte	58
2.3.4.5. Materiales de corte	60
3. Programa Experimental	61
3.1. Introducción	61
3.2. Selección de materiales	61
3.2.1. Aceros S355M y S460M	63
3.2.2. Aceros S690Q y S890Q	63
3.2.3. Espesores de chapa	63
3.3. Caracterización del acero	64
3.3.1. Composición química	64
3.3.2. Microestructura	65
3.3.3. Propiedades a tracción	68
3.4. Análisis de los agujeros y las superficies de corte	71
3.4.1. Rugosidad	71
3.4.2. Tolerancia geométrica	74



3.5.	Definición del programa experimental	76
3.5.1.	Introducción	76
3.5.2.	Diseño de las probetas	76
3.5.3.	Parámetros de corte	78
3.5.3.1.	Oxicorte o corte por llama	78
3.5.3.2.	Corte por plasma	79
3.5.3.3.	Corte por láser	80
3.5.4.	Definición de los parámetros en los ensayos de fatiga	81
3.5.4.1.	Número de probetas	83
3.5.4.2.	Relación de tensiones	84
3.5.4.3.	Límite de fatiga	85
3.5.4.4.	Rangos de tensiones	85
3.5.5.	Realización de los ensayos de fatiga	85
4.	Resultados y experimentales	87
4.1.	Introducción	87
4.2.	Resultados de las probetas ensayadas	87
4.2.1.	Acero S355M y 15 mm de espesor	87
4.2.2.	Acero S460M y 15 mm de espesor	91
4.2.3.	Acero S460M y 25 mm de espesor	95
4.2.4.	Acero S690Q y 15 mm de espesor	99
4.2.5.	Acero S890Q y 15 mm de espesor	103
5.	Análisis de los resultados	107
5.1.	Introducción	107
5.2.	Influencia del proceso de corte térmico	108
5.2.1.	Acero S355M y 15 mm de espesor	108
5.2.2.	Acero S460M y 15 mm de espesor	109
5.2.3.	Acero S690Q y 15 mm de espesor	110
5.2.4.	Acero S890Q y 15 mm de espesor	111
5.2.5.	Acero S460M y 25 mm de espesor	112
5.2.6.	Influencia del tipo de acero	113
5.3.	Influencia del espesor de la probeta	115
5.4.	Comparación con los resultados de fatiga correspondientes a agujeros taladrados y punzonados	118
5.5.	Evaluación de la normativa de fatiga: Eurocódigo 3	122
6.	Conclusiones	126
7.	Bibliografía	128

1. Introducción

Los procesos de corte térmico constituyen la tecnología más extendida para la fabricación de componentes demandados por un gran número de sectores, que incluyen entre otros la construcción de puentes y estructuras metálicas, industria naval, maquinaria de construcción y la industria del automóvil. Los mayores inconvenientes de estos procesos son las condiciones resultantes en la superficie de corte obtenida y los cambios microestructurales que aparecen en la región anexa al borde de corte, los cuales pueden afectar al comportamiento del componente en servicio, especialmente si está sometido a cargas cíclicas.

El oxicorte es el sistema de corte térmico tradicional, pero sin embargo en la actualidad el corte por plasma y el corte por láser presentan una amplia implantación en el ámbito industrial, y se han constituido como alternativas tecnológicas tanto por su calidad de corte y precisión como por su mayor productividad y flexibilidad. A pesar de estas ventajas, los fabricantes ven limitada su aplicación en muchos casos en tanto que las normativas de diseño presentan cierta obsolescencia, ya que definen criterios referidos exclusivamente a bordes oxicortados o en algunos casos los requerimientos se extrapolan directamente a bordes cortados por plasma y por láser, siendo necesario el mecanizado de las superficies cuando no es posible el cumplimiento de los mismos (con el sobre coste que ello conlleva).

El trabajo se ha centrado en el análisis de la influencia de los agujeros circulares cortados térmicamente sobre la resistencia a fatiga de aceros estructurales. Además, se ha querido comprobar la posibilidad de emplear los procesos de corte térmico frente a los procesos tradicionales de taladrado y punzonado para la fabricación de agujeros en piezas sometidas a cargas cíclicas.

Por otro lado, se han considerado cuatro aceros estructurales (S355M, S460M, S690Q y S890Q) ampliamente utilizados en estructuras metálicas, puentes y maquinaria de construcción, y que cumplen un amplio espectro de comportamientos mecánicos. Así mismo, se han adoptado dos espesores diferentes, 15 y 25 mm.

Se ha completado una profunda búsqueda bibliográfica con objeto de disponer de resultados procedentes de programas experimentales anteriores que corroboren las recomendaciones que se proponen. Con todo ello ha sido posible proponer curvas de diseño a fatiga para aceros estructurales cortados térmicamente, en detalles estructurales con agujeros circulares. Las curvas de diseño se han obtenido para la normativa europea de amplia utilización: el Eurocódigo 3.

Este análisis aquí realizado pretende ser un punto de partida para futuras modificaciones del Eurocódigo 3.



Thermal cutting processes are the most widespread technology for the manufacture of components demanded by a large number of sectors, including among others bridge construction and steel structures, shipbuilding, construction machinery and the automobile industry. The major drawbacks of these processes are the conditions resulting in the cut surface obtained and the microstructural changes that appear in the area adjacent to the cutting edge region, which can affect the behavior of the component in service, especially if subjected to cyclic loading.

Oxyfuel is the traditional thermal cutting system, but at nowadays plasma cutting and laser cutting have a wide presence in the industrial field, and have become technological alternatives for their quality and precision cutting for greater productivity and flexibility. Despite these advantages, manufacturers are limited in their application in many cases while the design regulations have a certain obsolescence, as they define criteria relating exclusively to flame cut edges, or, in some cases the requirements are extrapolated directly to plasma cut edges and laser, with machining of the surfaces to be necessary when it is not possible to comply with them (with the additional cost that this entails).

The work has focused on the analysis of the influence of thermally cut circular holes on the fatigue strength of structural steels. Furthermore, we have tried to test the possibility of using thermal cutting processes over traditional processes for drilling and punching holes in manufacturing parts subjected to cyclic loading.

On the other hand, four structural steels (S355M, S460M, S690Q and S890Q) widely used in steel structures, bridges, construction machinery, have been considered, and these meet a wide range of mechanical behaviors. Likewise, two different thicknesses, 15 and 25 mm, have been adopted.

A wide bibliographic search has been undertaken in order to have results from previous experimental programs to substantiate the recommendations proposed. With this performance, It has been possible to propose design fatigue curves for structural steels thermally cut in structural details with circular holes. Design curves have been obtained for widely used European standards: Eurocode 3.

This analysis is intended to be seen as starting point for future modifications of the Eurocode.



2. Estado del Arte

2.1. Introducción

Todo componente fabricado en acero y empleado en sectores como la construcción (puentes, estructuras metálicas o maquinaria), industria naval y calderería, es sometido, previamente a su ensamblaje final, a operaciones de transformación intermedias. Por lo general, el material suministrado por la industria del acero presenta una geometría estandarizada. Sin embargo, las estructuras reales están constituidas por componentes con unas dimensiones y geometrías determinadas. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un proceso que permita transformar el acero suministrado a gran escala en componentes listos para ser ensamblados. El corte del acero representa la primera de las etapas del proceso de transformación.

Los distintos procesos de corte y preparación de bordes pueden ser clasificados según se recoge en la Figura 2.1:

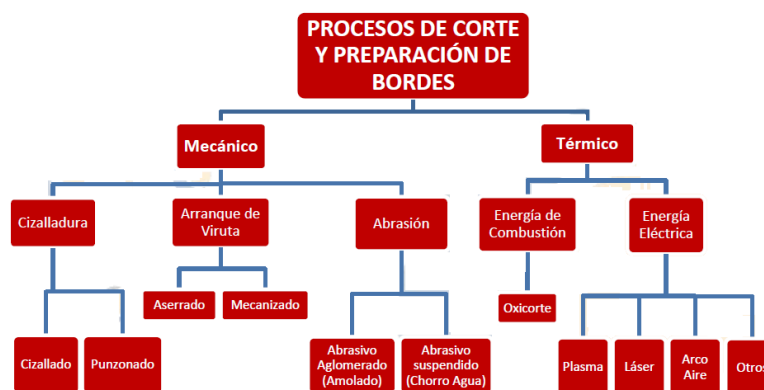


Figura 2.1 – Procesos de corte y preparación de bordes en función de su naturaleza [1].

Los procedimientos de corte principalmente empleados por la industria pesada de transformación intermedia, son los denominados sistemas de corte térmico, en los cuales la geometría final de la pieza se produce por el aporte de energía externa, provocando una fusión o combustión del material base. Dentro de estos procesos, se pueden distinguir dos tipos en la Figura 2.2:

- Procesos en los que la energía calorífica proviene de la combustión de elementos, como el oxicorte o corte por llama.
- Procesos en los que la energía aportada es suministrada por una fuente que tiene como origen la electricidad, como es el caso del corte por plasma y corte por láser.

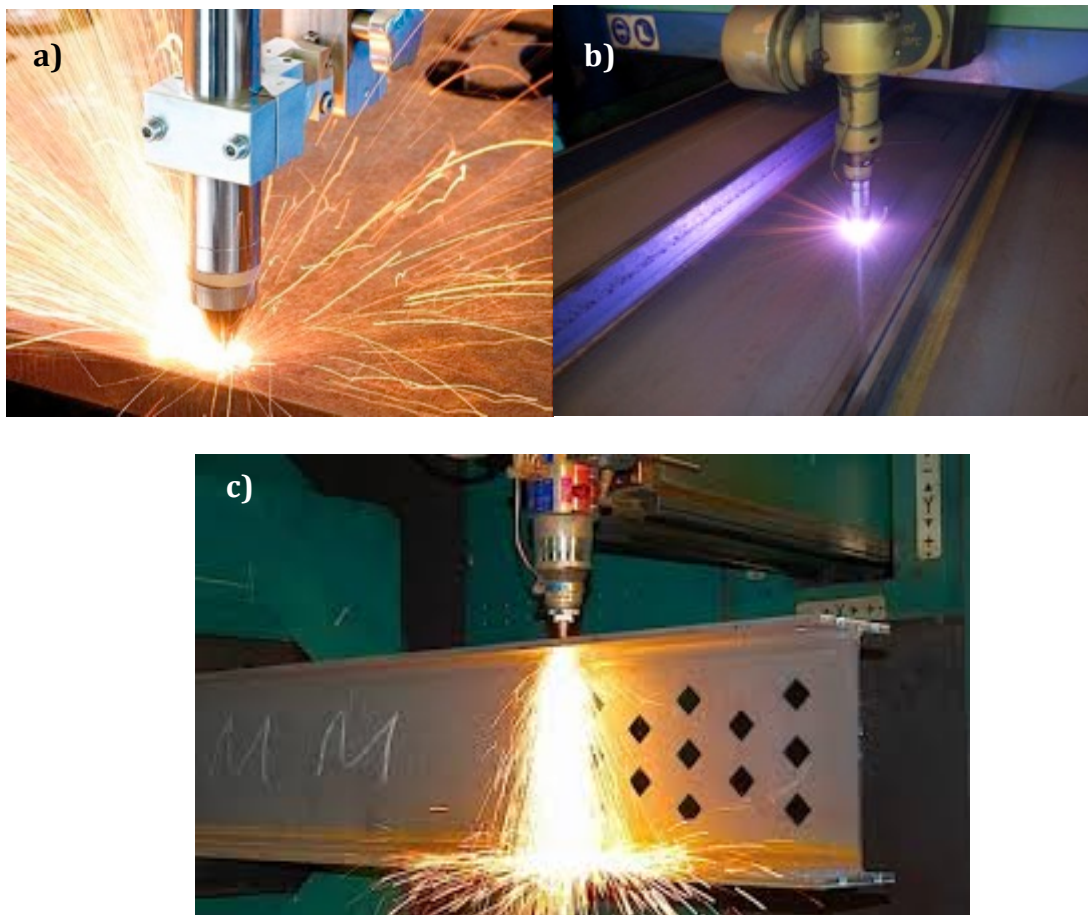


Figura 2.2 – Procesos de corte en el acero: a) oxicorte o corte por llama; b) corte por plasma; c) corte por láser.

El oxicorte representa la tecnología de corte tradicional, mientras que el corte por plasma y el láser constituyen actualmente alternativas por las que están apostando actualmente los fabricantes, tanto por su calidad de corte y precisión como por su mayor productividad y flexibilidad. Salvo para grandes espesores (mayores de 60 milímetros, donde el oxicorte no encuentra competidor), las velocidades de procesamiento y calidades obtenidas con el corte por plasma y por láser son significativamente mayores. Cabe destacar que el corte por láser presenta dificultades en espesores superiores a 20–25 milímetros.

Dependiendo del tipo de estructura, el borde obtenido tras el proceso de corte puede ser soldado a otro elemento o bien quedar como un borde libre. Un claro ejemplo de ambas situaciones puede encontrarse en las denominadas vigas armadas: los extremos de las alas están constituidos por bordes libres, mientras que los extremos del alma (previamente cortados) quedan soldados a la parte central de las alas.

En el caso de los bordes soldados, las características del proceso de soldeo serán las que determinen principalmente el comportamiento estructural del componente, ya



que durante dicho proceso de unión se produce la fusión de los bordes a conectar, alterando las condiciones originales del material en esa región.

Por el contrario, cuando se presentan bordes libres, tanto las características de la superficie de corte como la modificación de las propiedades microestructurales del material durante el proceso de corte serán las que condicionen la durabilidad de las estructuras de acero y su sensibilidad frente a las condiciones de fatiga y fractura. Si bajo cargas estáticas las propiedades del material no dependen en gran medida de la calidad de la superficie, es bien conocido que los sistemas de corte térmico afectan de manera importante a la vida en fatiga [2].

Con objeto de regular el diseño de componentes que presentan superficies de corte libres, las normativas de diseño y fabricación de componentes metálicos establecen una serie de restricciones en cuanto al uso de los sistemas de corte térmico, especialmente cuando las estructuras están sometidas a cargas dinámicas. Sin embargo, a pesar de la aplicación creciente del corte por plasma y láser por parte de la industria, los códigos de diseño actuales presentan cierta obsolescencia en el tratamiento del plasma y del láser, los cuales por lo general son obviados.

En este capítulo se procede a mostrar cual es el estado del arte que se ha tomado como referencia a la hora de planificar y llevar a cabo la presente investigación. Para ello, se comenzará realizando una descripción sobre el fenómeno de la fatiga y su importancia en la integridad estructural de los componentes. Así mismo, se analizará la metodología en la que se sustentan las distintas normativas de diseño de estructuras en fatiga.

A continuación se procederá a describir los fundamentos en los que se basan los tres sistemas de corte térmico analizados, haciendo referencia a la física del proceso, las distintas variantes que existen y cuáles son las principales condiciones de aplicación.

Una vez descritos los procesos de corte térmico, se analizarán las propiedades del material que se ven afectadas y las repercusiones que ello supone sobre la vida a fatiga. Se hará referencia a las principales investigaciones que se han realizado hasta el momento en lo que respecta a la influencia del corte térmico en la vida a fatiga, tanto en bordes rectos como en agujeros.

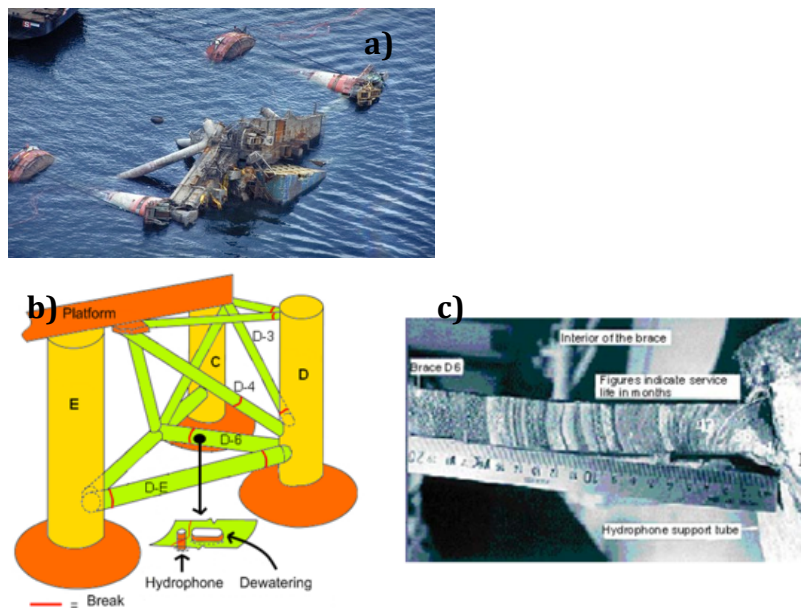
Finalmente, se llevará a cabo una revisión de las distintas normativas empleadas a nivel mundial a la hora de diseñar y fabricar estructuras y componentes metálicos, analizando los requisitos exigidos a los elementos cortados mediante un sistema de corte térmico.

2.2. Fatiga

2.2.1. Introducción

El fallo por fatiga de componentes metálicos representa un problema técnico de gran transcendencia en la actualidad, tanto desde un punto de vista del riesgo de pérdida de vidas humanas como por el impacto económico que lleva asociado. Ya desde siglo XVIII se tiene constancia de los primeros casos de fallo por fatiga, y desde entonces la historia de la ingeniería se ha visto salpicada por un gran número de accidentes catastróficos causados por el fallo de algún componente por fatiga, como explosiones de depósitos o colapso de puentes [3].

Un caso especialmente relevante y relativamente reciente fue la muerte de 123 personas en el hundimiento de la plataforma petrolífera Alexander L. Kielland, en Noruega, el cual fue originado por el fallo de un rigidizador debido el crecimiento de una fisura por fatiga a partir de una soldadura mal ejecutada [4].



**Figura 2.3 – a) Hundimiento de la plataforma petrolífera Alexander L. Kielland [5].
b) Rotura por fatiga del rigidizador D-6 y fallo por fatiga del resto de elementos [6]
c) Superficie de fractura con claro crecimiento de fisura por fatiga [7].**

Teniendo en cuenta solo estructuras metálicas, Oehme [8] llevó a cabo un estudio sobre las causas de fallo en una gran variedad de componentes, analizando un total de 448 casos. En función del tipo de estructura, la distribución de los fallos analizados se recoge en la Tabla 1.1

Tabla 2.1 – Distribución de los tipos de fallo en función del tipo de estructura.

Tipología de estructura	Porcentaje
Edificación (incluyendo construcciones industriales)	45.1 %
Puentes de ferrocarril	16.1 %
Grúas	15.0 %
Puentes de carretera	8.7 %
Maquinaria empleada en minería	8.0 %
Torres y postes eléctricos	5.8 %
Otras estructuras metálicas	1.3 %

La importancia de la fatiga queda reflejada en la Tabla 1.2, donde se observa cómo representa la tercera causa de fallo de todos los casos analizados en, y la primera en el caso de los puentes.

Tabla 2.2 – Causas de fallo en puentes y edificación.

Causa del Fallo	Total		Edificación		Puentes	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Rotura Estática	161	29.7	102	33.6	19	14.8
Estabilidad (local o global)	87	16.0	62	20.4	11	8.6
Fatiga	92	16.9	8	2.6	49	38.3
Deformación elástica	15	2.8	14	4.6	1	0.8
Rotura frágil	15	2.8	9	3.0	5	3.9
Ambiente	101	18.6	59	19.4	41	32.0
Esfuerzos de origen térmico	23	4.2	23	7.6	0	0
Otros	5	0.9	2	0.7	0	0

En la Figura 2.4 se muestran dos ejemplos de fisuras por fatiga encontradas en elementos constituyentes de puente metálicos.

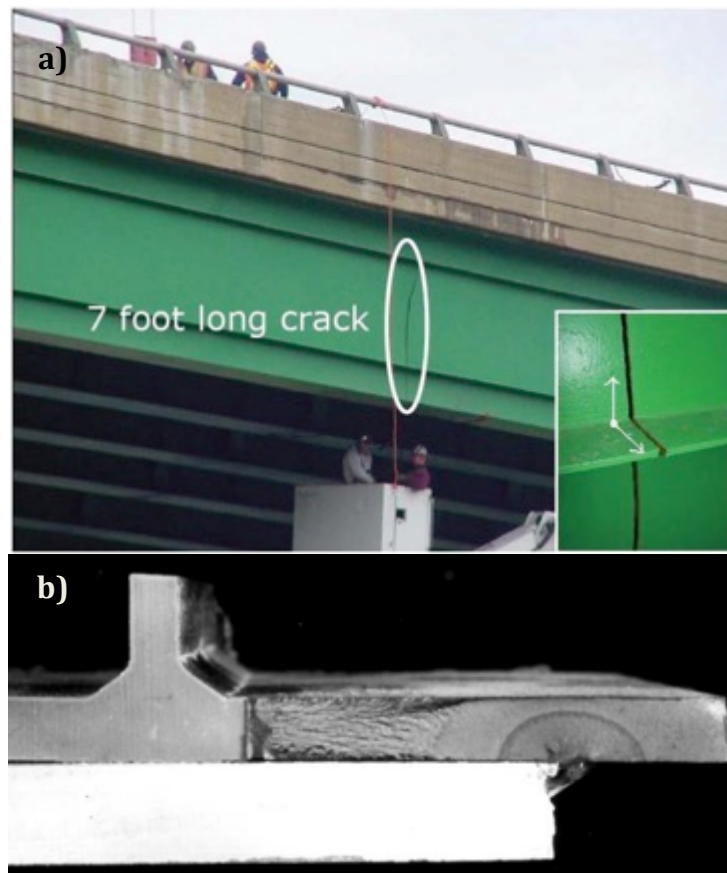


Figura 2.4 – a) Fisura por fatiga originada en la soldadura de un cajón metálico [9];
b) Fisura por fatiga a partir de la soldadura entre una viga y una placa de refuerzo [10].

En un componente sometido a cargas cíclicas, la vida a fatiga se subdivide en dos etapas, una primera de iniciación y una segunda de propagación. El periodo de iniciación suele incluir el crecimiento de microfisuras, las cuales, debido a sus reducidas dimensiones, no son visibles. Durante el periodo de propagación, las fisuras crecen hasta provocar la rotura final del componente. En la Figura 2.5 se muestran las distintas etapas que componen la vida a fatiga de un componente:

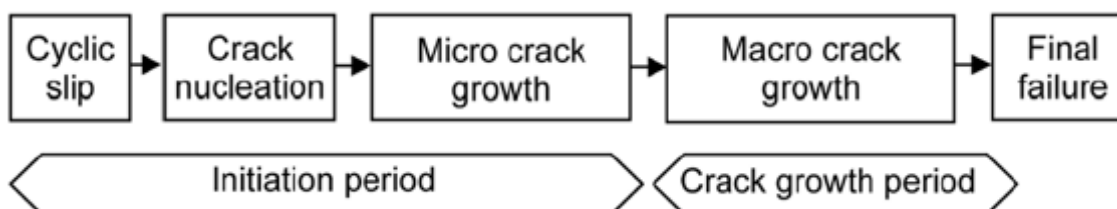


Figura 2.5 – Diferentes etapas en la vida a fatiga de un componente [3].



El análisis por separado de estas dos etapas es muy importante, ya que algunos condicionantes pueden tener una influencia determinante sobre la etapa de iniciación, pero despreciable durante el proceso de crecimiento.

2.2.2. Iniciación de fisuras

La iniciación de fisuras por fatiga se define generalmente como un proceso de superficie, provocado por la formación de bandas de deslizamiento en la superficie del material, con la formación de intrusiones, extrusiones y/o pares intrusión-extrusión.

A pesar de que las tensiones aplicadas puedan ser significativamente inferiores al límite elástico, un número limitado de granos pueden presentar una deformación plástica. Esta microplasticidad tiene lugar principalmente en los granos situados en la superficie del material, los cuales presentan un grado de constricción significativamente menor. En los bordes libres, el material solo se encuentra rodeado por un lado, mientras que por el otro únicamente está en contacto con el medio, el cual puede ser gaseoso o líquido. Como consecuencia de ello, la deformación plástica es mayor en los granos de la superficie, ya que están sometidos, por parte del resto del material que los rodea, a una menor constricción que los granos situados en el interior del material.

De esta manera, al aplicar la carga, una serie de granos de la superficie se ven sometidos a deformaciones plásticas, lo que conlleva el deslizamiento de algunos de sus planos cristalográficos. Este mecanismo se limita a unos pocos granos del material en la superficie que presentan una orientación de los planos cristalográficos desfavorable respecto a la dirección de las máximas tensiones tangenciales. Cuando la carga se revierte (cambia de sentido), los planos de deslizamiento no vuelven a su posición debido al efecto de endurecimiento provocado por la deformación cíclica. En lugar de ello, durante la carga en sentido inverso se produce la cedencia de los planos vecinos por deslizamiento en la dirección opuesta (Figura 2.6). El resultado es la aparición de extrusiones e intrusiones sobre la superficie del metal, las cuales actuarán como microfisuras y a partir de ellas comenzará el avance del frente de fisura.

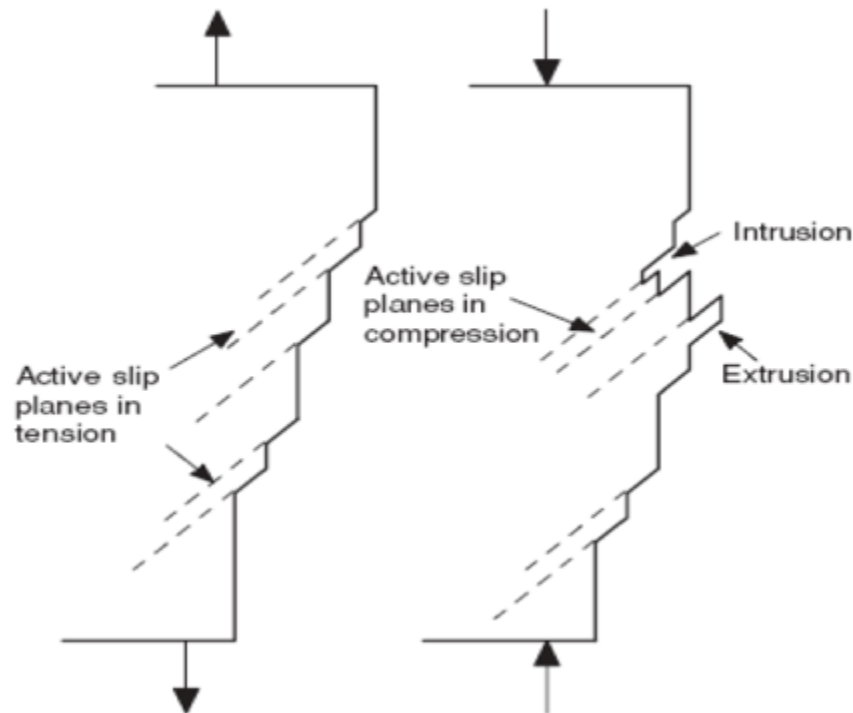


Figura 2.6 – Esquema de los micromecanismos de inicio del fenómeno de la fatiga [11].

Sin embargo, a pesar de que la limitada constricción de las bandas de deslizamiento en la superficie del material se ha considerado como una condición favorable para la iniciación de fisuras a partir de superficies libres, existen otra serie de condicionantes que pueden favorecer dicha iniciación. Por ejemplo, la distribución de tensiones provocada por un concentrador de tensiones (agujero) puede dar lugar a que la tensión máxima tenga lugar en la superficie del material. De la misma manera, la rugosidad también puede favorecer la iniciación de fisuras a partir de la superficie. En la Figura 2.7, se muestran algunos de los aspectos que condicionan el proceso de iniciación de las fisuras por fatiga.

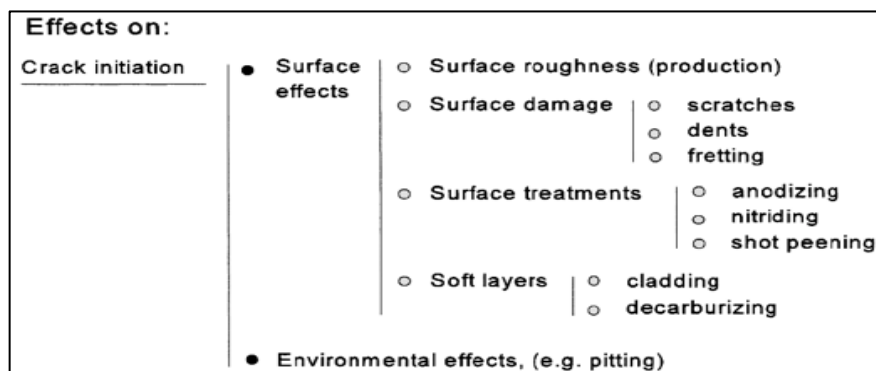


Figura 2.7 – Condicionantes de la iniciación de fisuras por fatiga [3].

El hecho de que la superficie libre del material no sea perfectamente lisa da lugar a que pequeños concentradores de tensión se distribuyan en toda la superficie del mismo, favoreciendo la formación de bandas de deslizamiento y la nucleación de fisuras en su superficie. Sin embargo, es importante mencionar que la influencia de la rugosidad sobre el periodo de iniciación varía en función del nivel tensional. En una investigación realizada por *de Forest [11]* se muestra como las diferencias en el periodo de iniciación provocadas por la rugosidad son tanto mayores cuanto más bajas son las cargas aplicadas, mientras que en el periodo de propagación son prácticamente nulas. Como consecuencia de ello, y teniendo en cuenta que la vida a fatiga total es la suma del periodo de iniciación y el periodo de rotura, en la Figura 2.8 se observa como un aumento de la rugosidad provoca una pequeña disminución en la vida a fatiga total para elevados valores de nivel tensional y, sin embargo, da lugar a una disminución muy significativa del límite de fatiga. Así mismo, la diferente sensibilidad frente a la rugosidad en función del nivel tensional da lugar a una mayor dispersión en los resultados experimental cuanto menores son las cargas aplicadas.

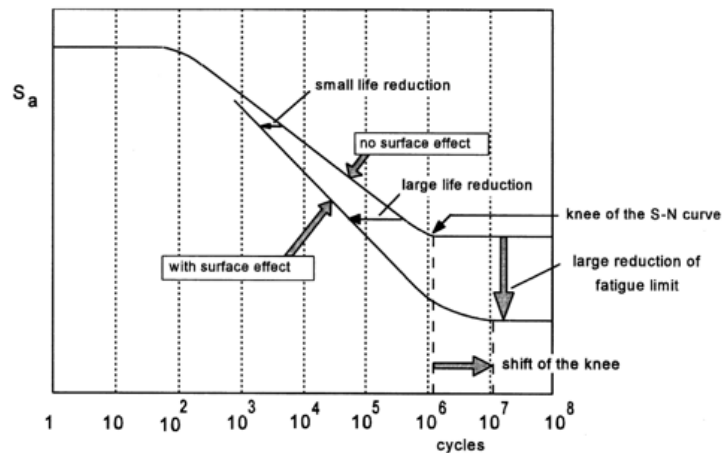


Figura 2.8 – Efecto de la rugosidad sobre la curva S-N. S_a : amplitud tensional [3].

Cuando la longitud de la microfisura está todavía en el orden de magnitud del tamaño grano, su crecimiento está condicionado por la presencia de un material anisotrópico con una estructura cristalina y con un cierto número de bandas de deslizamiento posibles, de tal manera que más de una puede ser activada. Sin embargo, a medida que se produce el avance de la fisura, la constricción en las bandas de deslizamiento aumenta debido a la presencia de granos adyacentes. De esta manera, se modifica la dirección de crecimiento de la microfisura, la cual se desvía de la banda de deslizamiento original. Por lo general, como se observa en la Figura 2.9, la tendencia observada es que el crecimiento se produzca en la dirección perpendicular a la de aplicación de la carga.

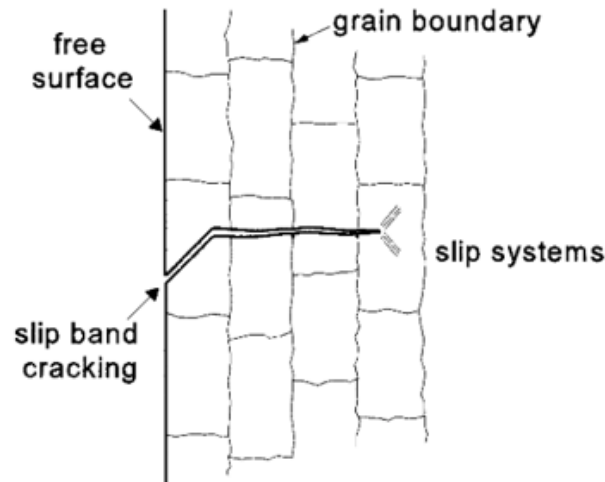


Figura 2.9 – Sección transversal de una microfisura [3].

2.2.3. Propagación de Fisuras

La transición entre el periodo de iniciación y el de crecimiento difícilmente puede definirse en términos cuantitativos. Por ello, generalmente se establece que el periodo de iniciación finaliza cuando la microfisura es lo suficientemente grande como para no depender de las propiedades del material en la superficie libre. El tamaño de la microfisura en la transición entre estos dos periodos varía significativamente en función del tipo de material, ya que las barreras que se oponen a la propagación de las microfisuras no son iguales para todos los materiales.

En condiciones de carga uniaxiales, el crecimiento de la fisura es macroscópicamente perpendicular a la dirección de aplicación de la carga. Llegados a este punto, las deformaciones en el frente de la fisura tienen lugar en más de un plano de deslizamiento. Como se observa en la Figura 2.10, durante la aplicación de la carga, la punta de la grieta se abre a través de dos planos de deslizamiento simétricos. De esta manera, en cada ciclo de aplicación de carga, se generan nuevas superficies en el frente de la grieta, las cuales se traducen en unas marcas denominadas estrías, visibles mediante un microscopio electrónico de barrido.

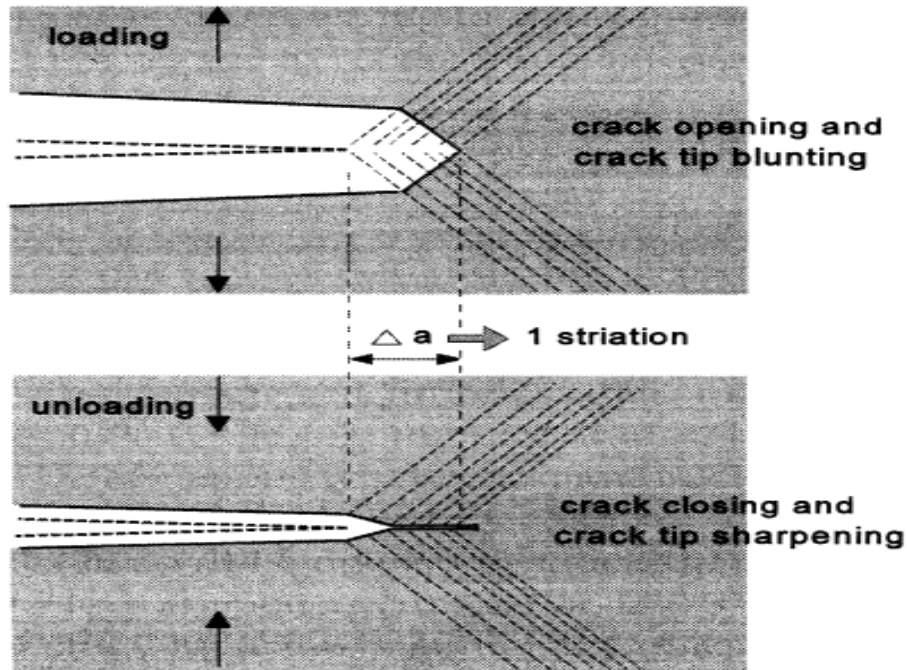


Figura 2.10 – Extensión de una fisura durante un ciclo de carga [3].

En la fase de propagación, Paris [12] observó experimentalmente que la velocidad de crecimiento de las fisuras (da/dN) dependía de la variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK) durante la aplicación de cada ciclo de carga:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (2.1)$$

ΔK depende del rango de tensiones (S), la longitud la fisura (a) y el factor geométrico (Y) según se recoge en la ecuación (1.2).

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y\sigma_{max}\sqrt{\pi a} - Y\sigma_{min}\sqrt{\pi a} = YS\sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

La típica representación en escala doblemente logarítmica de la relación entre da/dN y ΔK se muestra en la Figura 2.11.

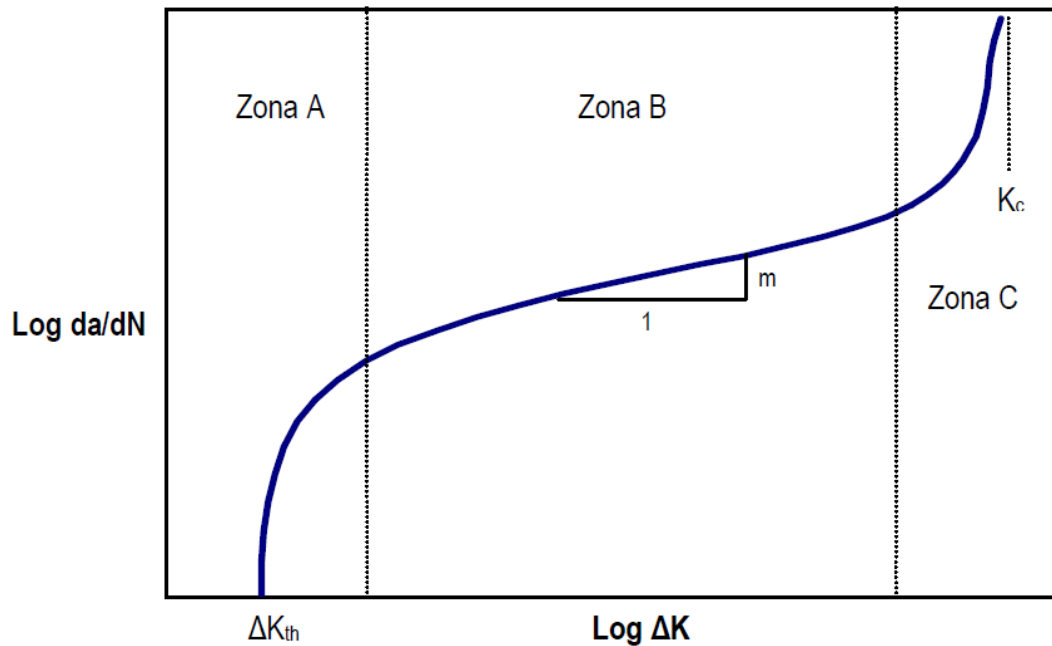


Figura 2.11 – Relación entre la velocidad de crecimiento de las fisuras (da/dN) y la variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK) en la fase de propagación [13].

Analizando la Figura 1.11 se observan tres regiones de comportamiento:

- **Zona A:** Se trata de la región próxima al valor del denominado como Umbral de Propagación en Fatiga, ΔK_{th} . Si la variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK) es inferior a dicho umbral, no se observa una propagación de la fisura. La normativa ASTM E647 considera que el crecimiento de la fisura se ha detenido cuando la velocidad de propagación se sitúa en el orden de 10^{-10} m/ciclo. En esta región, la influencia de la microestructura, el ambiente y la tensión media es elevada.
- **Zona B:** La relación entre el $\log(da/dN)$ y $\log(\Delta K)$ es lineal. La expresión que relaciona ambos parámetros fue propuesta en primer lugar por Paris [14] (ecuación (2.3)), de ahí que reciba el nombre de *Ley de Paris*.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.3)$$

Donde C y m son constantes del material.

- **Zona C:** La velocidad de crecimiento de la fisura es muy elevada en tanto que se aproxima a la propagación inestable de la misma. Una vez que la fisura entra en esta zona de propagación, la velocidad se incrementa progresivamente hasta alcanzar un tamaño crítico y se produce el fallo final.

En este último instante, el análisis se convierte en un problema de Mecánica de Fractura, cumpliéndose (siempre que el mecanismo de rotura sea frágil) la condición recogida en la ecuación (2.4). De la misma manera que se había observado en la Zona A, tanto la microestructura como el ambiente y la tensión media tienen un importante efecto en el proceso de fatiga.

$$K_{max} = Y\sigma_{max}\sqrt{\pi a} = K_c \quad (2.4)$$

Donde K_c es la resistencia a fractura del material.

Por último, cabe indicar que dado que la Ley de Paris utiliza un parámetro (K_I) elástico lineal, su validez queda limitada a situaciones en las cuales la plasticidad en el frente de fisura tenga un tamaño reducido en relación al resto de dimensiones del problema (longitud de fisura, tamaño de grano, dimensiones del componente...).

Existen situaciones en las cuales el tamaño de la zona plástica es del orden del resto de dimensiones del problema, como ocurre en la fatiga de las fisuras cortas en la cual la zona plástica tiene dimensiones similares a las de la microestructura del material y/o la longitud de fisura. En esos casos es necesario recurrir a leyes que consideren el efecto de la plasticidad en el frente de fisura.

2.2.4. Evaluación de la vida a fatiga en un componente

2.2.4.1. Introducción

A la hora de analizar un componente a fatiga, es necesario evaluar en primer lugar la preexistencia o no de fisuras, ya que en función de este criterio es preciso considerar enfoques totalmente distintos. Así, se debe distinguir entre fatiga de componentes no fisurados y fatiga de componentes fisurados.

La fatiga de componentes no fisurados se aplica a aquellos que no presentan una fisura inicial. La evaluación de estos elementos se lleva a cabo mediante curvas S-N (variación o amplitud tensional frente a número de ciclos a rotura).

Por otro lado, la fatiga de componentes fisurados es aquella que tiene lugar cuando el elemento contiene una fisura preexistente. En estos casos, el análisis a fatiga tiene por objeto predecir la evolución de la fisura con el tiempo, determinando el número de ciclos que puede resistir el componente hasta su fallo final. Se basa en la Mecánica de la Fractura, y tiene su aplicación principal en estructuras de gran tamaño, con el objeto de controlar la evolución de las fisuras con el tiempo, de tal manera que no comprometan la integridad estructural de las mismas y puedan seguir operando en perfectas condiciones de seguridad. Se analiza mediante las leyes de propagación propuestas por Paris.

En la Figura 2.12 se resumen las variantes más importantes consideradas por las aproximaciones local y global. Se muestra esquemáticamente la curva S-N expresada en función de la carga, la curva S-N en función de la tensión nominal (utilizada en detalles estructurales comunes y estandarizados), la curva S-N considerando la tensión estructural, el diagrama de Kitagawa (empleado en el rango de las fisuras cortas), y la velocidad de propagación expresada en términos de factor de intensidad de tensiones.

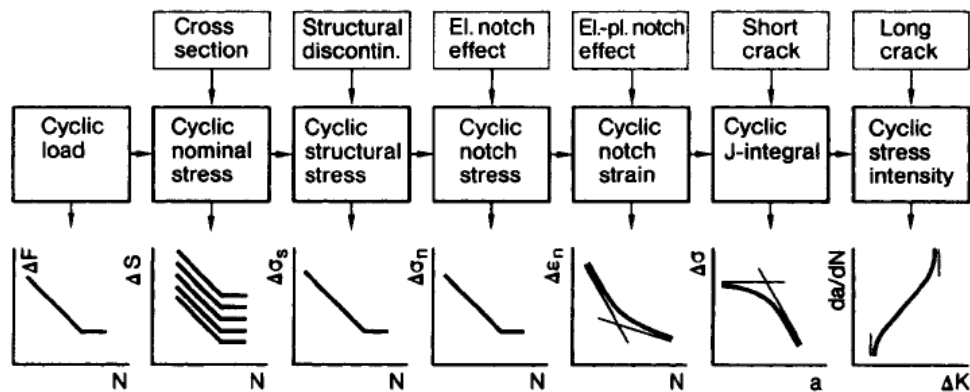


Figura 2.12 – Aproximaciones global y local para describir el comportamiento a fatiga [15].

2.2.4.2. Parámetros de análisis

A la hora de considerar la fatiga como parte del análisis experimental, es necesario definir los parámetros empleados a la hora de caracterizar los esfuerzos dinámicos a los que está sometida. Las tres combinaciones de parámetros más empleadas para definir el ciclo de carga son las siguientes:

- Amplitud tensional (S_a) y tensión media (σ_{med}).
- Tensión máxima (σ_{max}) y tensión mínima (σ_{min}).
- Rango de tensiones o variación tensional ($S=2S_a$) junto con la relación de tensiones (R), quedando esta última definida por la ecuación (2.5).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.5)$$

Las tres combinaciones de parámetros son totalmente equivalentes e indistintamente empleadas en la literatura. Sin embargo, a la hora de definir el ciclo de carga, la elección de una combinación u otra dependerá del análisis a fatiga que se pretenda realizar. Desde un punto de vista mecánico, la alternativa elegida considerará σ_{max} y σ_{min} , ya que estos valores de tensión coinciden con los puntos donde el sentido de aplicación de la carga se invierte, y por lo tanto donde el movimiento de las bandas de deslizamiento también cambia.

Sin embargo, en servicio, las estructuras suelen estar sometidas a unas cargas estacionarias sobre las que se superponen las cargas dinámicas. De esta manera, la carga estacionaria queda representada por σ_{med} , mientras que las sollicitaciones en servicio inducen ciclos de carga con un determinado valor de S_a .

Finalmente, la tercera de las combinaciones suele ser empleada en los análisis que tienen por objeto aumentar la vida a fatiga de un componente: por ejemplo, al incrementar la sección crítica del elemento sometido a cargas cíclicas, el valor de R permanecerá constante mientras que ΔS se verá reducido.

En la Figura 2.13 se muestra gráficamente el significado de los parámetros antes definidos.

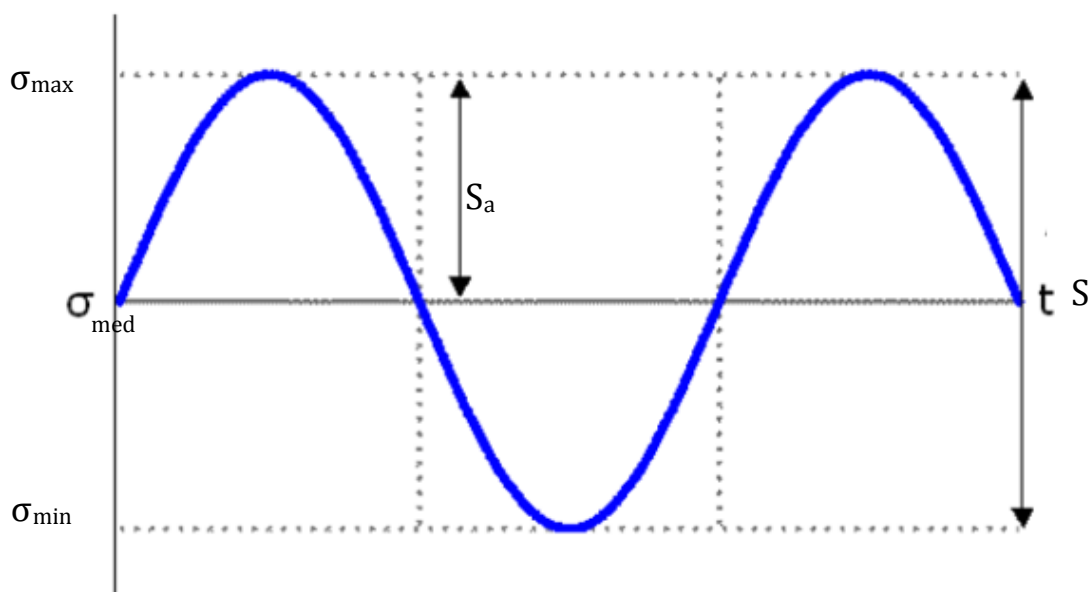


Figura 2.13 – Parámetros empleados para definir un ciclo de carga [16].

Otro aspecto que debe ser tenido en cuenta a la hora de definir el ciclo de carga es la forma de la onda. En los ensayos de laboratorio, la onda sinusoidal es por lo general el tipo de onda empleada. Sin embargo, en servicio la forma de la onda puede ser totalmente diferente. La elección del tipo de onda afecta al

comportamiento en fatiga principalmente cuando el componente se encuentra en un ambiente agresivo.

La frecuencia a la que se llevan a cabo los ensayos, definida como el número de ciclos de carga que se aplican en un segundo, es un factor que puede ser despreciado en la mayoría de los aceros estructurales siempre que el material no se encuentre en ambientes agresivos o altas temperaturas, o incluso en ambientes agresivos cuando la frecuencia es suficientemente alta.

2.2.4.3. Ley de Basquin y Ley de Coffin-Manson

Si se realizan ensayos de fatiga sobre probetas de un determinado material, sometiendo a cada una de ellas a una variación tensional distinta y llevándolas a rotura, los resultados obtenidos muestran una relación entre la amplitud tensional (S_a) y el número de ciclos hasta rotura. Este hecho fue observado por primera vez por Whöler en el año 1863.

En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo esquemático sobre la relación obtenida, la cual pasó a denominarse curva S-N o curva de Whöler.

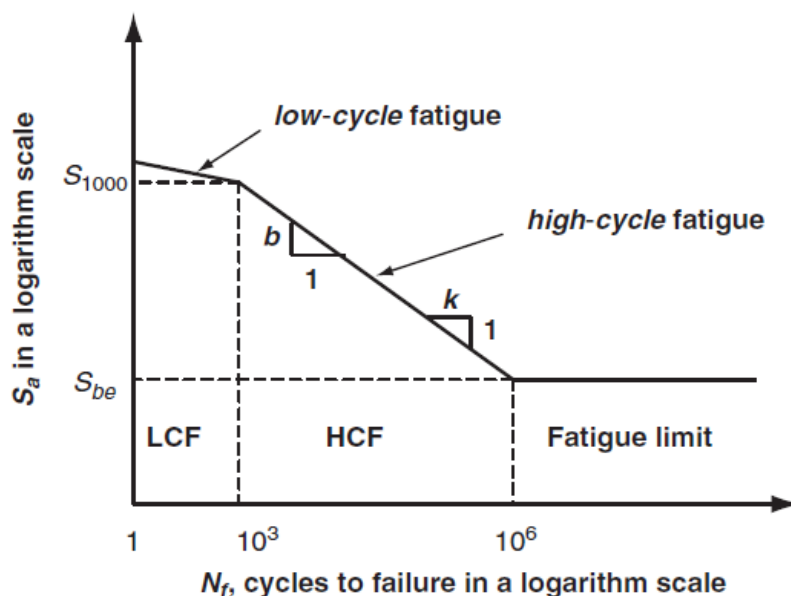


Figura 2.14 – Representación esquemática de la curva S-N o curva de Whöler. S_a : amplitud tensional [17].

El primer aspecto de la curva S-N que conviene mencionar es la existencia de diferentes regiones de comportamiento en función del número de ciclos. Según la clasificación propuesta por [18] se pueden distinguir tres regiones:

- Fatiga de alto número de ciclos (HCF): $10^3 - 10^5 < N \leq 2 \cdot 10^6$.
- Fatiga de bajo número de ciclos (LCF): $0.5 < N \leq 10^3 - 10^5$.
- Zona de límite de fatiga: $N \rightarrow \infty$

La fatiga de alto número de ciclos se corresponde con aquellas situaciones de carga en las cuales las tensiones aplicadas son inferiores al límite elástico. La amplitud de tensiones y el número de ciclos hasta rotura presentan una relación lineal (en escala doblemente logarítmica). Su expresión viene recogida en la ecuación (2.6), la cual recibe el nombre de Ley de Basquin [19]:

$$S = A \cdot N^B \quad (2.6)$$

Donde:

- N : número de ciclos hasta rotura
- S (MPa): rango de tensiones aplicado
- A : constante del material que representa el valor del rango de tensiones correspondiente a un ciclo en rotura
- B : exponente o pendiente de la curva S-N (en escala doblemente logarítmica). Es una constante del material

En el caso de la fatiga de bajo número de ciclos, las tensiones aplicadas llegan superar el límite elástico y se observa como la relación entre el rango de tensiones y el número de ciclos hasta rotura deja de responder a la ley de Basquin. Sin embargo, Coffin y Mason [20-22] definieron que una línea recta puede representar la variación de la deformación plástica ($\Delta \varepsilon_p$) cuando se evalúa frente al número de ciclos hasta rotura (N_f), ecuación (2.7).

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^b \quad (2.7)$$

La Figura 1.15 representa gráficamente la ecuación (2.6).

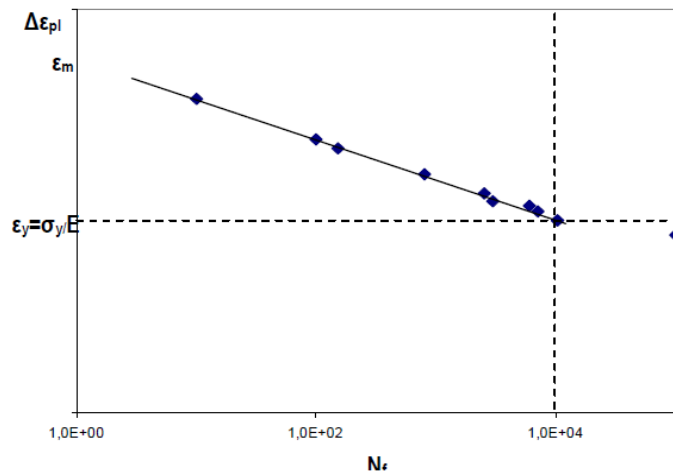


Figura 1.15 – Representación gráfica de la ecuación de Coffin – Mason [23].

Finalmente es posible obtener una expresión que permita considerar conjuntamente el efecto de la fatiga en cualquiera de las dos regiones antes mencionadas, Figura 2.14. Esta deberá expresarse en términos de deformación total, siendo igual a la suma de la componente elástica y la componente plástica, de ahí que reciba el nombre de curva ε -N. En la ecuación (2.8) se define la expresión matemática de dicha expresión:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^b \quad (2.8)$$

El punto de corte entre ambas rectas suele corresponder con un número próximo a 10^4 ciclos.

En la Figura 2.16 se muestra la relación entre la resistencia a fatiga y la deformación total, elástica y plástica.

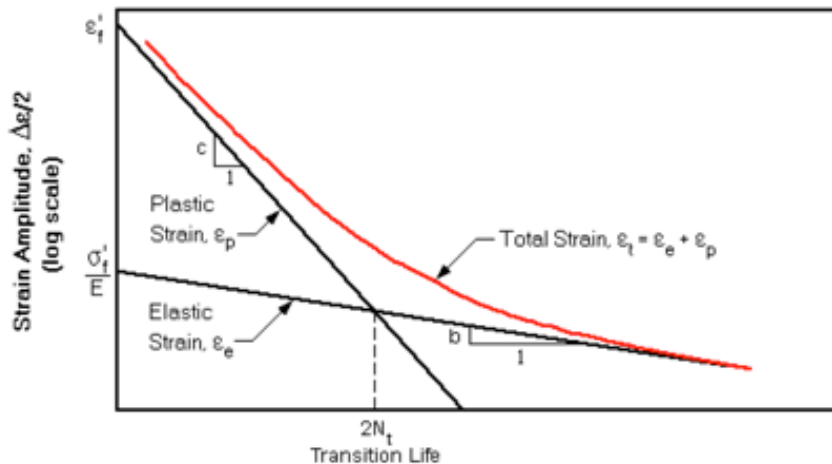


Figura 2.16 – Relación entre la resistencia a fatiga y la deformación total, elástica y plástica [24].

2.2.5. Curvas S-N

2.2.5.1. Introducción

La evaluación a fatiga de componentes en base a curvas S-N obtenidas en tensiones nominales es el procedimiento más empleado entre las normativas de diseño a fatiga de estructuras de acero y aluminio.

El uso extensivo de las tensiones nominales como soporte de los análisis a fatiga se fundamenta en las dos siguientes razones:

- Las tensiones nominales son obtenidas en base a las ecuaciones que tiene en cuenta la acción de cargas axiales y momentos, no incluyendo el efecto concentrador de tensiones provocado por las soldaduras u otros métodos de unión. De esta manera, los cálculos se simplifican enormemente, pudiendo determinar las tensiones con una elevada precisión .
- Permiten considerar en una misma curva S-N el efecto del material, la geometría (incluyendo los concentradores de tensiones), las condiciones superficiales e incluso las tensiones residuales.

Por ello, las normativas a fatiga proporcionan una curva S-N diferente para cada uno de los detalles que se presentan con mayor frecuencia en las estructuras reales. Cada una de estas curvas recibe el nombre de categoría o clase de diseño, y se basan en extensos programas experimentales llevados a cabo sobre probetas representativas del detalle a evaluar. Debido a que las condiciones de cada probeta son muy variables (tensiones residuales, defectos,...), los resultados obtenidos en base a las tensiones nominales presentan una elevada dispersión, de ahí que las

curvas S-N suministradas por las distintas normativas representen una banda inferior de confianza.

En la Figura 2.17 se muestran los ensayos correspondientes al *National Cooperative Highway Research Program* [25] para la determinación de la curva S-N correspondiente al detalle estructural formado por rigidizador soldado al alma de una viga.

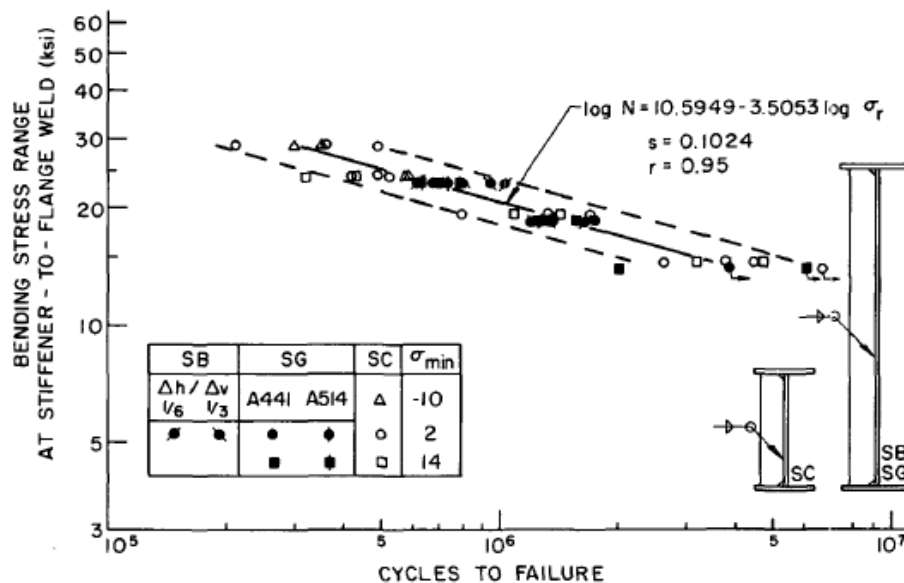


Figura 2.17 – Ensayos empleados para determinar la categoría de detalles estructural constituido por un rigidizador (Tipo 3) soldado a un alma [25].

Por lo general, las normas de diseño a fatiga de puentes, como la ASSHTO [27] o de estructuras metálicas en general, como el Eurocódigo 3 [26] o la BS7608 [28], solo consideran la evaluación en fatiga de alto número de ciclos. De hecho, la normativa BS7608 establece que la aplicación de las curvas S-N propuestas se limitará a aquellos casos en los que, en condiciones normales, las tensiones nominales no excedan el 60% del límite elástico, o el 80% en casos extremos.

Adicionalmente a la curva S-N, las normas proporcionan, para cada categoría de detalle, un valor del límite de fatiga, el cual representa el rango de tensiones por debajo del cual no tiene lugar la rotura por fatiga si las cargas cíclicas aplicadas presentan un rango de amplitud constante. Se emplea en diseños basados en la filosofía de vida infinita, en la cual se trata de garantizar que las tensiones nominales en cada detalle se sitúan por debajo del límite de fatiga. En el caso de que el espectro de cargas sea variable, deben utilizarse análisis más complicados basados en la ley de Miner con objeto de determinar la tensión nominal equivalente.

2.2.5.2. Relación entre el rango de tensiones y los ciclos hasta rotura

En primer lugar se considera que la relación entre el rango de tensiones (a partir de ahora S) y el número de ciclos hasta rotura es lineal cuando ambas variables se representan en una escala bilogarítmica. La expresión, que proviene de introducir logaritmos en la ley de Basquin, queda definida por la ecuación (2.9):

$$\log N = \log A - m \cdot \log S \quad (2.9)$$

Donde:

- m es la pendiente de la curva.
- $\log A$ recibe el nombre de intercepto.

El rango de validez de esta hipótesis de linealidad se considera que está limitado inferiormente por el rango de tensiones correspondiente al límite de fatiga (también llamado durabilidad). Así mismo, está estrictamente limitado superiormente por el límite elástico del material; sin embargo, dicho valor no es generalmente alcanzado en las estructuras reales correctamente diseñadas, por lo cual se suele considerar como límite superior al valor que se corresponde con la máxima tensión estática de diseño permitida. En la Figura 2.18, se muestra el intervalo donde la ecuación (2.9) es válida:

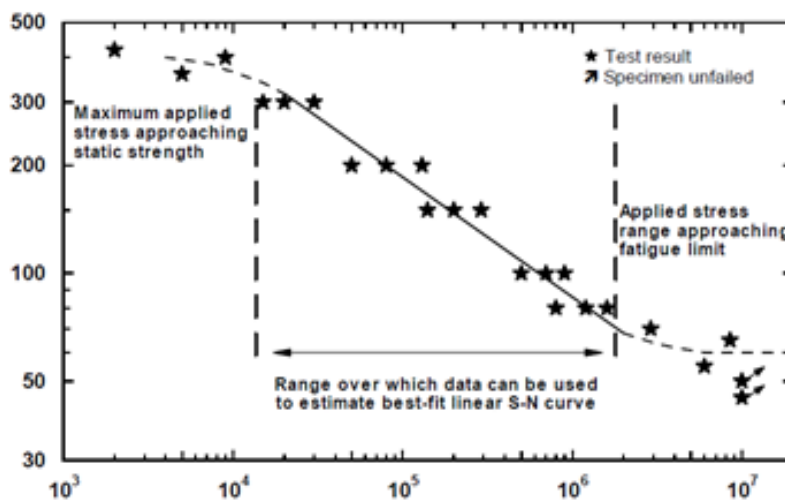


Figura 2.18 – Rango de validez de la hipótesis de linealidad [29].

Además de la linealidad en la relación entre el rango de tensiones y el número de ciclos hasta rotura, se consideran tres hipótesis adicionales:

- El número de ciclos hasta rotura obtenidos para un determinado nivel de tensiones se distribuye según una función log-normal.
- La desviación estándar que presenta el número de ciclos hasta rotura es independiente de la tensión a la que se haya llevado a cabo el ensayo.
- El resultado obtenido en cada ensayo es estadísticamente independiente del resto.

Si por cualquier motivo se pudiera dudar de la validez de las mismas, existen una serie de test estadísticos que permiten determinar si las asunciones realizadas son correctas en el caso particular analizado:

- Test para verificar la linealidad en la relación entre $\log S$ y $\log N$
- Test para verificar la distribución log-normal de los resultados
- Test de homogeneidad de la desviación estándar de $\log N$ con respecto a $\log S$
- Test de independencia estadística de los resultados

2.2.5.3. Ajuste de resultados

Las curvas S-N se obtienen a partir de un número n limitado de puntos $(\log S_i, \log N_i)$. El valor de N_i se puede corresponder bien con el número de ciclos hasta rotura (definiendo previamente el criterio de fallo) o bien el número de ciclos hasta el cual no se ha producido la rotura (run-outs).

Conviene prestar especial atención al hecho de que, tradicionalmente, la representación gráfica de los resultados asigna $\log N$ al eje de abscisas y $\log S$ al eje de ordenadas. Sin embargo, en los procedimientos de ajuste se suele considerar que la variable independiente se representa en el eje “x” y la variable dependiente en el eje “y”, lo cual es justamente opuesto al caso de la fatiga. Por ello, recomienda prestar especial atención al tratamiento estadístico de los datos, considerando $\log N$ como la variable dependiente.

A la hora de abordar la obtención experimental de la curva S-N es generalizada la consideración de dos regiones de comportamiento a fatiga:

- La región de vida a fatiga finita, en la cual, como se ha explicado anteriormente, $\log S$ y $\log N$ presentan una relación lineal.
- La región de vida a fatiga infinita, la cual es representada por una línea horizontal. Se considera límite de fatiga para cargas de amplitud constante

(CAFL: *Constant Amplitude Fatigue Limit*) a aquel rango de tensiones por debajo del cual no se produce la rotura del componente.

Lo más habitual es considerar de forma simplificada una transición brusca entre ambas regiones. Sin embargo, en la práctica, los resultados experimentales muestran un cambio gradual de la pendiente m a medida que se aproximan a la región de vida infinita. Por ello, dependiendo de las circunstancias, se puede emplear un modelo de curva S-N más preciso que tenga en cuenta la transición entre ambas regiones, como el definido por la ecuación (2.10) [32]:

$$N = \frac{B \cdot e^{-\left(\frac{S-E}{C}\right)^D}}{S-E} \quad (2.10)$$

Donde B , C , D y E son constantes.

Por lo general, los resultados experimentales de fatiga pueden ser clasificados en dos grandes categorías: completos y censurados. Se dice que un conjunto de resultados es completo si está constituido únicamente por ensayos que han finalizado con la rotura de la muestra. Sin embargo, en muchas ocasiones, es posible que no todas las probetas se hayan llevado hasta la rotura. Dicho conjunto de valores reciben el nombre de datos censurados, los cuales poseen información estadística. Principalmente, los datos censurados se pueden clasificar en tres grupos:

- a) **Censurados por la derecha:** Se trata de un caso muy común en los programas experimentales de fatiga: el ensayo se ha detenido en un determinado valor de N , por lo que la rotura tendría lugar a la derecha de dicho valor en la escala de tiempo, Figura 2.19.

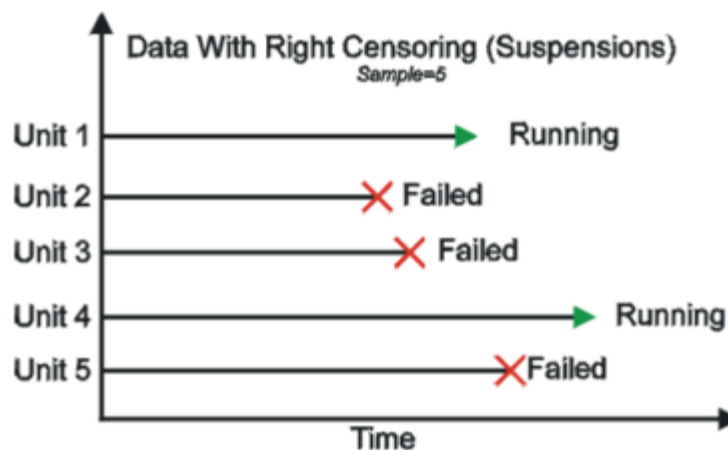


Figura 2.19 – Censurados por la derecha [30].

- b) **Censurados en un intervalo:** Se desconoce el instante exacto de rotura, pero esta se sitúa dentro de un intervalo de tiempo, Figura 2.20.

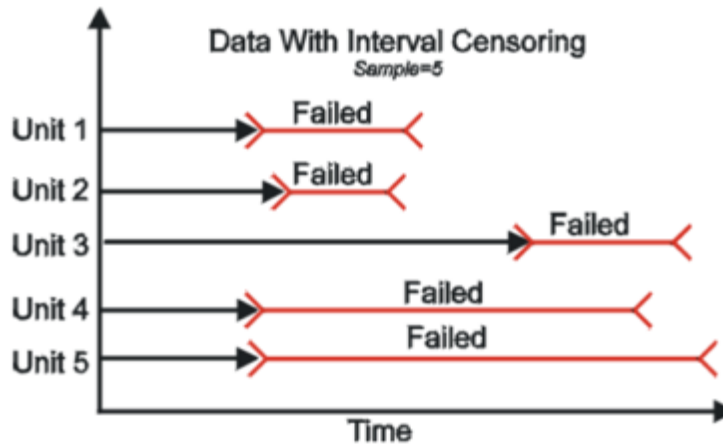


Figura 2.20 – Censurados en un intervalo [30].

- c) **Censurados por la izquierda:** Se desconoce el instante preciso del fallo, pero se confirma que se ha producido antes de un determinado intervalo de tiempo, Figura 2.21.

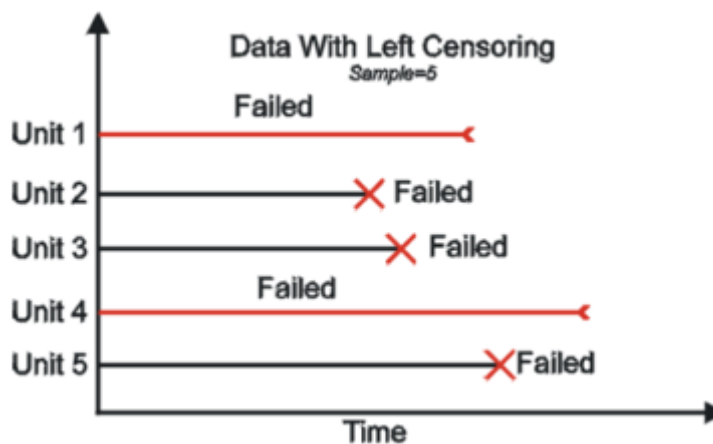


Figura 2.21 – Censurados por la izquierda [30].

Una vez que se dispone de los resultados experimentales se está en condición de llevar a cabo el ajuste de la curva. El objetivo principal del ajuste es obtener los parámetros que la definen, pudiendo así estimar el valor de una variable dependiente a partir de una variable independiente.

Existen una gran variedad de modelos y métodos estadísticos para determinar la curva de mejor ajuste. En la Tabla 2.3 se recogen las alternativas admitidas por la *International Organization for Standardization* (ISO) para la estimación de los parámetros de la curva S-N [31].

Tabla 2.3 – Alternativas de ajuste de la curva S-N admitidas por la ISO [31].

Método de Análisis	Ecuación de la Curva S-N	Método e Hipótesis	Parámetros
(A)	$\log N = \log C - m \log S$	Bisección de dos regresiones lineales	C, m
(B)	$\log N = \log C - m \log S$	Regresión lineal (ignorando run-out's)	C, m
(C)	$\log N = \log C - m \log S$	Máxima verosimilitud (incluyendo run-out's)	C, m
(D)	$\log N = \log C - m \log S$	Regresión lineal (incluyendo run-out's)	C, m
(E)	$N = \frac{B \cdot e^{-\left(\frac{S-E}{C}\right)^D}}{S - E}$	Regresión no lineal (incluyendo run-out's)	$B, C, D \text{ y } E$

Analizando la Tabla 2.3 se puede observar cómo los métodos (A) y (B) no tienen en cuenta las probetas que no han roto a la hora de realizar el ajuste, mientras los otros tres métodos sí consideran el resultado de las probetas que no han roto. La elección de uno u otro dependerá de las circunstancias de cada programa experimental. Sin embargo, es necesario mencionar que la incorporación de los resultados obtenidos con las probetas que no han roto dificulta el proceso de análisis.

El método (B) o de regresión por mínimos cuadrados permite un uso muy eficiente de los datos así como la posibilidad de obtener buenas estimaciones con un número limitado de datos. Estas dos características han hecho que sea el método a partir del cual se deriven la mayor parte de las normativas de diseño a fatiga empleadas en el mundo.

2.2.5.4. Método de regresión por mínimos cuadrados

Se trata del método de ajuste de la curva S-N que presenta un uso más extendido. Considerando únicamente los resultados procedentes de probetas que han roto, lleva a cabo la estimación de la pendiente (m) y el intercepto ($\log A$) mediante un ajuste por mínimos cuadrados, el cual proporciona el valor de los parámetros que minimizan la suma de los residuos al cuadrado. Los parámetros así estimados definen la curva S-N media. En las ecuaciones (2.11) a (2.17) se recoge la formulación necesaria para la estimación de ambos parámetros:

$$x = \widehat{\log A} - \hat{m} \cdot y \quad (2.11)$$

$$x = \log N \quad (2.12)$$

$$y = \log S \quad (2.13)$$

$$\hat{m} = - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.14)$$

$$\widehat{\log A} = \bar{x} + \hat{m} \cdot \bar{y} \quad (2.15)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.16)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.17)$$

n es el número de datos experimentales empleados

Este método asume una transición brusca entre el rango de vida finita, descrito por la ecuación (1.11), y el rango de vida infinita, delimitado por el límite de fatiga. Se considera que un componente presenta vida infinita (sometido a cargas con un rango de tensiones constante) si la rotura no se ha producido una vez transcurrido un número determinado de ciclos. Existen ciertas discrepancias, en función de la normativa consultada, sobre el número de ciclos sin rotura previa que se asume como vida infinita del componente. Por lo general, se suele adoptar un número de ciclos no inferior a $5 \cdot 10^6$, siendo lo más habitual 10^7 .

Conviene señalar que, a pesar de la existencia de una zona de transición entre el rango de vida finita e infinita, esta no es considerada por el método de regresión por mínimos cuadrados, ya que la solventa con una discontinuidad puntual en la pendiente de la recta (m en el rango de vida finita y 0, horizontal, en el rango de vida infinita). En esta región se puede dar el caso de encontrar probetas que han fallado y otras que no. No se recomienda la utilización de ningún dato procedente de esta región a la hora de realizar el ajuste lineal de la curva S-N.

2.2.5.5. Tamaño de la muestra

En la práctica, las investigaciones sobre poblaciones no se llevan a cabo sobre el total de individuos de las mismas, siendo esto prácticamente imposible en la mayor parte de los casos, sino que se selecciona un número representativo de elementos que permita obtener conclusiones válidas sobre el total de la población. Este conjunto de elementos seleccionados recibe el nombre de muestra.

En el caso de la fatiga, las investigaciones también se abordan considerando un número limitado de ensayos, los cuales constituyen la muestra. Por ello, la primera pregunta que debe plantearse es cuál es el número de ensayos que debe incluir la muestra. Obviamente, la precisión a la hora de estimar un parámetro es tanto mayor cuanto más grande es la muestra seleccionada. Sin embargo, otros factores como el coste de los ensayos, la variabilidad de la población o la precisión final requerida

también deben ser tenidos muy en cuenta a la hora de dimensionar la muestra. En los programas experimentales de fatiga, el incremento del número de probetas no solo supone aumentar los costes de fabricación de las mismas, sino que implica prolongar de manera considerable el tiempo empleado en ensayos.

A continuación, a modo de guía, se recogen algunas de las recomendaciones por distintas normativas y documentos encontrados:

a) E739-10: “Standard practice for statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue data” [33]

Esta normativa americana de ensayos a fatiga define el número mínimo de muestras en función del tipo de estudio que se desee realizar. En la Tabla 2.4 se recogen los valores propuestos. Así mismo define un parámetro denominado Porcentaje de Réplica, el cual hace referencia a la distribución de los ensayos en función de los niveles tensionales considerados. De esta manera, establece que:

$\% \text{ Replica} = 100 \cdot [1 - (\text{número total de niveles de tensión o deformación considerados} / \text{número total de probetas ensayadas})]$.

También en la Tabla 1.4 se define el porcentaje mínimo de réplicas dependiendo del tipo de estudio a realizar.

Tabla 2.4 – Número mínimo de ensayos a fatiga y porcentaje mínimo de réplicas en función del tipo de estudio [33].

Tipo de estudio	Nº mínimo de probetas	% mínimo de replicas
<i>Preliminary and exploratory (exploratory research and development tests)</i>	6 a 12	17 a 33
<i>Research and development testing of components and specimens</i>	6 a 12	33 a 50
<i>Design allowable data</i>	12 a 24	50 a 75
<i>Reliability data</i>	12 a 24	75 a 88

b) IIW-1823-07: “Recommendations for fatigue design of welded joints and components” [34]

Este documento, elaborado por el *International Institute of Welding* (IIW), y de referencia en el dimensionamiento de uniones soldadas a fatiga, define un mínimo de 10 probetas llevadas hasta rotura para obtener la curva S-N.

Así mismo, recomienda que, en caso de que el número de ensayos sea inferior a 10, se estimará únicamente el intercepto de la curva S-N ($\log A$), adoptando el valor de la pendiente (m) propuesto para esa categoría de detalle en alguna de las normativas de diseño a fatiga.

2.2.5.6. Definición de las curvas S-N de diseño

La aplicación del procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados al conjunto de ensayos permite obtener la curva S-N media, es decir, aquella cuyos valores representan una probabilidad de fallo por fatiga del 50%.

En la práctica, el diseño de las componentes no se lleva a cabo con valores medios, ni de la resistencia de los materiales ni de las cargas aplicadas: desde el punto de vista de las cargas, estas son corregidas por un factor mayorador, mientras que las propiedades de los materiales se ven afectadas por un coeficiente minorador.

En lo relativo a las propiedades a fatiga, una práctica muy común es desplazar la curva S-N verticalmente y hacia la abajo una magnitud equivalente a multiplicar la desviación típica por un determinado factor. La curva S-N resultante recibe el nombre de curva S-N de diseño. Principalmente existen tres procedimientos para la obtención de la curva S-N de diseño a partir de la curva S-N media:

a) Límite de confianza

Cuando se extrae una muestra arbitraria de una población con objeto de estimar la media de esta última, es importante saber cómo de bien, desde un punto de vista estadístico, la muestra es capaz de estimar dicho parámetro de la población.

Los límites de confianza definen el intervalo de confianza respecto de un parámetro, el cual representa el rango de valores que presentan una determinada probabilidad de contener el parámetro de la población. Así, un intervalo de confianza correspondiente a un nivel de confianza significa que, si de una misma población se extraen una serie de muestras y de cada una de ellas se obtiene el intervalo de confianza, la probabilidad de que el parámetro real de la población se sitúe dentro del intervalo de confianza de cada una de las muestras es igual al nivel de confianza. Un intervalo de confianza respecto de la media con un nivel de confianza del 95% supone que, para un conjunto

de muestras con sus respectivos intervalos de confianza, la media estará contenida por el 95% de dichos intervalos (Figura 2.22).

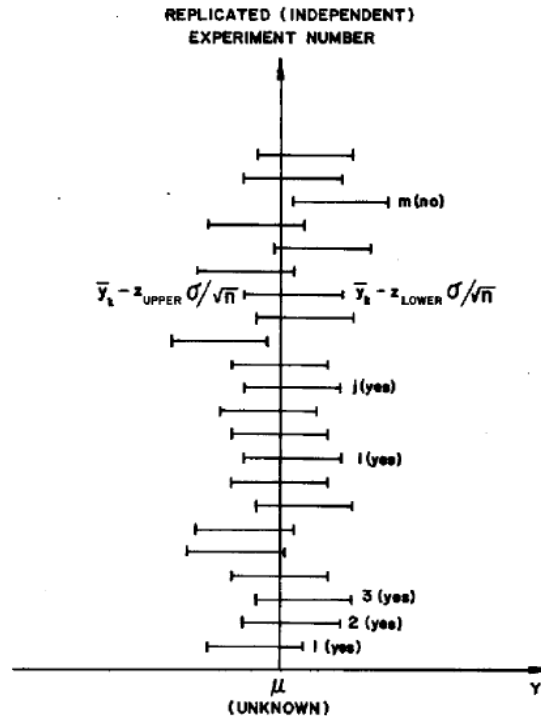


Figura 2.22 – Inclusión de la media real de la población en los intervalos de confianza sobre la media obtenidos con un número limitado de muestras [35].

La expresión genérica de la probabilidad de que la media de la población se sitúe dentro de un intervalo obtenido con un nivel de confianza p viene definida en la ecuación (2.18):

$$Prob \left[\bar{Z} - z_{upper} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{Z} + z_{lower} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = p \quad (2.18)$$

Donde μ es la media de la población, $\bar{Z}$ es la media de la muestra, σ es la desviación típica de la población, z_{upper} y z_{lower} son los coeficientes asociados a un nivel de confianza (p) y una determinada distribución de probabilidad, y n es el número de individuos de la muestra.

Generalmente, se considera que la media y la varianza de una muestra se pueden caracterizar mediante una distribución t de Student y una distribución Chi-Cuadrado, respectivamente, si la población de la que ha sido extraída se distribuye según una normal (como es el caso de $\log N$).

De esta manera, el número de ciclos de diseño correspondiente a cada nivel tensional se obtiene restando un cierto número de veces (k_c) la desviación típica al valor medio de la muestra, ecuación (2.19):

$$\log N_{\text{diseño}} = \overline{\log N} - k_c \cdot \bar{\sigma} \quad (2.19)$$

El valor k_c se corresponde con:

- El mínimo valor del intervalo de confianza de la media.
- El máximo valor del intervalo de confianza de la varianza.

El valor de diseño así calculado representa una determinada probabilidad de supervivencia calculada en base a un cierto intervalo de confianza respecto de la media.

La expresión de k_c viene definida en la ecuación (2.20):

$$k_c = \frac{t_{(p,n-1)}}{\sqrt{n}} + \varphi_{(\alpha)}^{-1} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{\left(\frac{1+\beta}{2}, n-1\right)}}} \quad (2.20)$$

Donde:

- n es el número de ensayos realizados.
- t es el valor de una distribución t de Student correspondiente a un nivel de confianza (p) y número de grados de libertad ($n-1$). Para una distribución de dos colas (two sided) $p=\beta$, mientras que para una distribución de una cola (one sided) $p=(1+\beta)/2$.
- $\varphi_{(\alpha)}^{-1}$ es el valor correspondiente a una probabilidad de excedencia (α) de una función de distribución normal. El superíndice -1 indica la inversa de la función.
- χ^2 es el valor de una distribución Chi-Cuadrado correspondiente a un nivel de confianza (β , ej., $(1+\beta)/2=0.875$ [46]) y número de grados de libertad ($n-1$).

b) Límite de predicción

Los límites de predicción describen la probabilidad de que una medida individual se encuentre por encima o por debajo de un determinado valor. De forma genérica, la ecuación (2.21) representa la expresión de la probabilidad asociada a que un intervalo obtenido con un nivel de confianza (p) contenga a una futura medida realizada sobre el total de la población (Y_{n+1}):

$$Prob [Z_{lower}^* < Y_{n+1} < Z_{upper}^*] = p \quad (2.21)$$

Donde Z_{lower}^* y Z_{upper}^* vienen definidos por las ecuaciones (2.22) y (2.23), respectivamente.

$$Z_{lower}^* = \bar{Z} - t_{(p,n-1)} \cdot \bar{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (2.22)$$

$$Z_{upper}^* = \bar{Z} + t_{(p,n-1)} \cdot \bar{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (2.23)$$

Donde $\bar{Z}$ es la media de la muestra, $\bar{\sigma}$ es la desviación típica de la muestra, $t_{(p,n-1)}$ es el valor de la t de Student para una determinada probabilidad (p) y número de grados de libertad ($n-1$), y n es el número de individuos de la muestra.

En el caso de la fatiga, particularizando la ecuaciones anteriores, la expresión de la curva S-N de diseño vendría definida por la ecuación (2.24).

$$\log N_p^{\pm} = (\log A + m \cdot \log S) \pm t_{(p,f)} \cdot \bar{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log S - \overline{\log S})^2}{\sum_{i=1}^n (\log S_i - \overline{\log S})^2}} \quad (2.24)$$

Donde:

- $\log A$ es el intercepto de la curva S-N.
- m es la pendiente de la curva S-N.
- n es el número de ensayos realizados.
- t es el valor de una distribución t de Student correspondiente a un nivel de confianza (p) y número de grados de libertad (f).

- $\bar{\sigma}^2$ es el mejor estimador de la varianza de los datos respecto de recta S-N de regresión, el cual es igual a la suma de los cuadrados de los residuos dividida entre el número de grados de libertad (f).
- f es el número de grados de libertad e igual a $n - 2$ cuando los dos parámetros de la curva S-N ($\log A$ y m) han sido estimados a partir de los datos experimentales.
- $\overline{\log S}$ es la media de los n valores de $\log S_i$ ensayados.

El tercer término de la raíz tiene en cuenta la distribución de los ensayos entre los distintos niveles de $\log S$. La inclusión de este valor hace que la curva S-N representada en escala bilogarítmica presente una forma hiperbólica, en vez de recta, cuyo valor más próximo a la línea de regresión se sitúa en $\overline{\log S}$. Sin embargo, por lo general, se asume que la aplicación de la curva S-N de diseño se limita a valores de $\log S$ no muy alejados del valor medio $\overline{\log S}$ de los ensayos realizados. Por ello, dicho término suele ignorarse, de tal manera que la curva de diseño resultante es una recta.

En la Figura 2.23 se comparan las curvas de diseño obtenidas, para unos mismos resultados experimentales, empleando la metodología de los límites de confianza (CI) a y los límites de predicción (PI). Se puede observar como los límites de predicción son más conservadores.

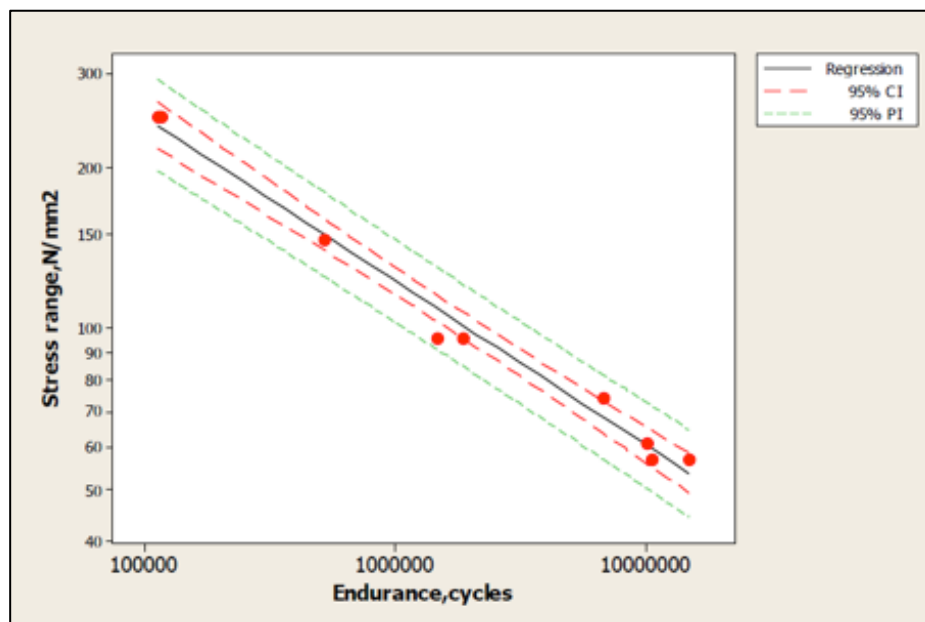


Figura 2.23 – Comparativa entre los límites de confianza y los límites de predicción [36].

c) Límite de tolerancia

El límite de tolerancia constituye la última metodología analizada para obtener las curvas S-N de diseño. Se obtienen de tal manera que con un nivel de confianza (p) se pueda afirmar que al menos un porcentaje (P') de la población se encuentre por encima de un determinado valor.

Se trata de la alternativa más conservadora. Se recomienda su empleo en componentes o aplicaciones críticas. Así mismo, puede adoptarse en aquellos casos en los que sea necesario obtener curvas de diseño a partir de un número muy limitado de ensayos. Sin embargo, fuera de estas situaciones, su uso está muy limitado. A continuación se recogen sus principales inconvenientes:

- Se trata de una metodología inherentemente más complicada, lo cual incrementa el riesgo de cometer errores en su utilización.
- El mayor conservadurismo no está justificado en todos los casos.
- La validez de la aproximación depende de la hipótesis de normalidad.

Su uso representa un cambio muy significativo respecto a las metodologías anteriores, por lo que se corre el riesgo de incompatibilidad con las normativas actuales.

La expresión del límite de inferior de tolerancia aplicado al caso de la fatiga se define en la ecuación (2.25):

$$\log N_{\text{diseño}} = \overline{\log N} - k \cdot \bar{\sigma} \quad (2.25)$$

La dificultad en la obtención del coeficiente k difiere mucho en función de si la pendiente de la curva S-N se estima a partir de los resultados experimentales o se fija de antemano.

En el caso que considerar un valor predefinido de la pendiente, el valor de k está tabulado para una gran variedad de tamaños de muestra, para unos niveles de confianza (p) del 90% y 95%, y para unos porcentajes de la población (P') del 90%, 95%, 97.5%, 99% y 99.9%.

Por otro lado, si la pendiente de la curva S-N se obtiene a partir de los resultados experimentales, el parámetro k no está disponible en tablas o software estadístico. Para su cálculo, es necesario emplear la formulación que evalúa el porcentaje P' de una distribución normal y el nivel de confianza p de una distribución t de Student no centrada, ecuación (2.26).

$$\text{Prob}\{(noncentral\ t\ con\ \delta = K_p\sqrt{n}) \leq k\sqrt{n}\} = p \quad (2.26)$$

Donde K_p se obtiene de la ecuación (1.27):

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{K_p} \exp(-x^2/2) dx = P' \quad (2.27)$$

El valor del parámetro k se calcula aplicando la ecuación (2.28):

$$k = \frac{t_0}{\sqrt{n}} \quad (2.28)$$

Donde:

- n es el número de ensayos.
- t_0 es un parámetro que se obtiene a partir de una distribución t de Student no centrada. La dificultad del cálculo de k reside en la obtención del valor de dicho parámetro. t_0 se determina aplicando la ecuación (2.29):

$$t_0 = \frac{\delta + \lambda \cdot \left(1 + \frac{\delta^2}{2f} - \frac{\lambda^2}{2f}\right)}{1 - (\lambda^2/2f)} \quad (2.29)$$

- f es el número de grados de libertad ($f=n-2$) y δ y λ son parámetros de la distribución t de Student no centrada.

2.2.6. Normativa de diseño a fatiga

2.2.6.1. Introducción

A lo largo del mundo existen una gran variedad de normativas de diseño de componentes a fatiga. Muchas de ellas tienen en común el empleo de curvas S-N en tensiones nominales, de tal manera que proporcionan una curva S-N diferente para cualquier geometría o detalle que pueda presentarse en una estructura. Por ello, cada detalle estructural lleva asociado una categoría con una curva S-N de diseño fundamentada en extensos programas experimentales llevados a cabo en laboratorio, tanto sobre muestras a tamaño real como sobre probetas a escala. En este trabajo el análisis se limita al Eurocódigo 3.

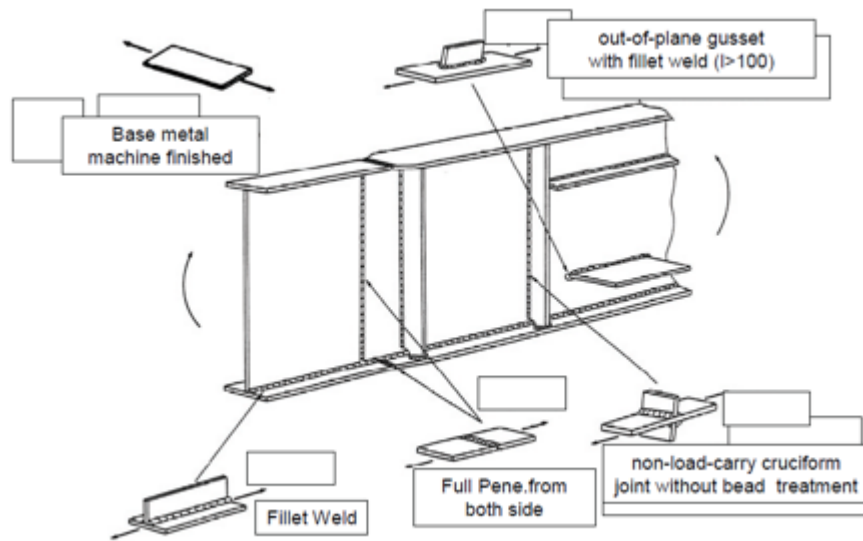


Figura 1.24 – Categorías correspondientes a distintos detalles estructurales [37].

2.2.6.2. Eurocódigo 3

El Eurocódigo 3 constituye una normativa de gran aplicación en Europa para el análisis de resistencia a fatiga en elementos estructurales, conexiones y uniones. De hecho, algunos códigos nacionales, como la Instrucción de Acero Estructural Española, transcriben directamente los criterios de diseño a fatiga recogidos en el Eurocódigo 3.

La expresión de la curva S-N viene definida por las ecuaciones (2.30) a (2.32):

$$\Delta S^m \cdot N = \Delta S_{FAT}^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad m = 3 \quad N \leq 5 \cdot 10^6 \quad (2.30)$$

$$\Delta S^m \cdot N = \Delta S_D^m \cdot 5 \cdot 10^6 \quad m = 5 \quad 5 \cdot 10^6 < N \leq 10^8 \quad (2.31)$$

$$\Delta S = \Delta S_L \quad N > 10^8 \quad (2.32)$$

Donde:

- ΔS_D representa el límite de fatiga (bajo cargas cíclicas de amplitud constante), definido según la ecuación (2.33):

$$\Delta S = \left[\frac{2}{5} \right]^{1/3} \cdot \Delta S_{FAT} = 0.737 \cdot \Delta S_{FAT} \quad (2.33)$$

- ΔS_L representa el umbral de daño, definido según la ecuación (2.34):

$$\Delta S_L = \left[\frac{5}{100} \right]^{1/5} \cdot \Delta S_{FAT} = 0.549 \cdot \Delta S_{FAT} \quad (2.34)$$

- ΔS_{FAT} representa el rango de tensiones normales (en MPa) que agotan la resistencia a fatiga del detalle cuando el número de ciclos aplicado es igual a 2 millones.

En la Figura 1.25, se recogen las curvas S-N de diseño propuestas por el Eurocódigo 3. Se consideran 14 categorías de detalle, que van desde la clase FAT160 hasta la clase FAT36 (de más a menos resistente).

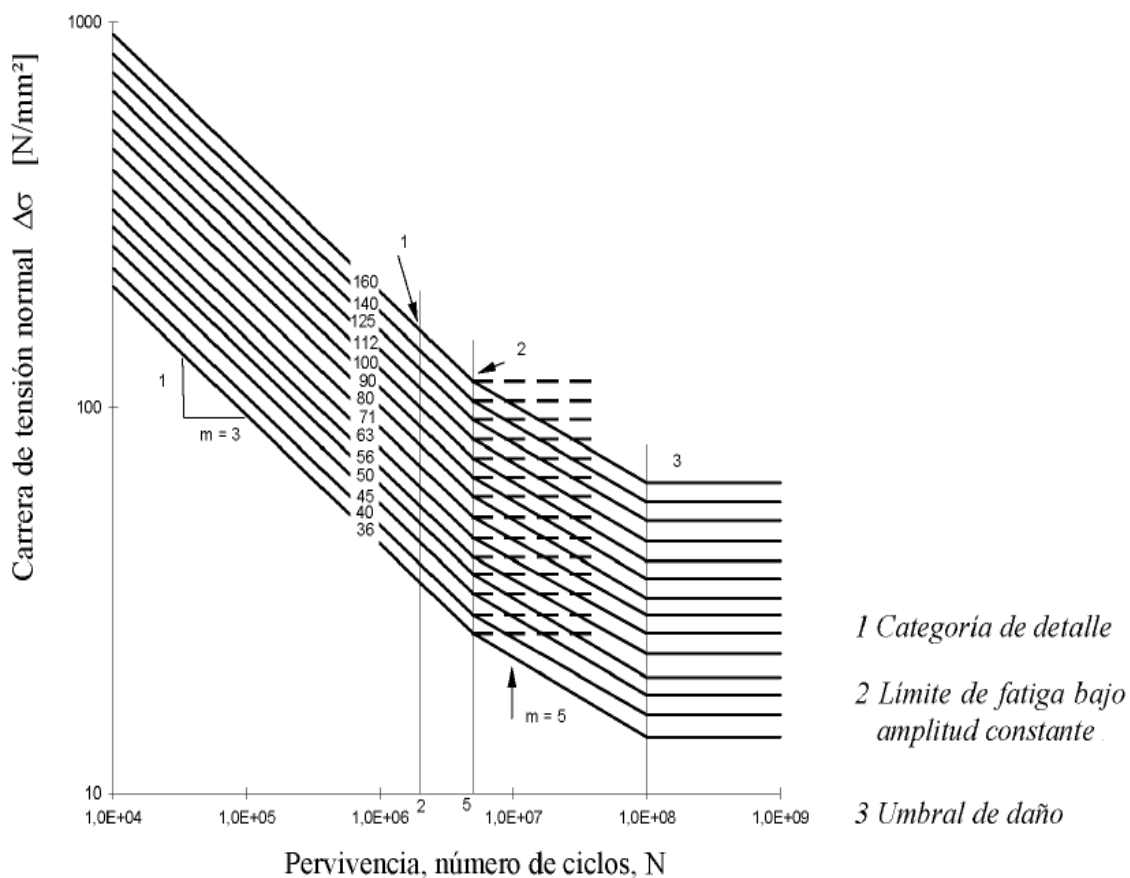


Figura 1.25 – Curvas S-N correspondientes a las distintas categorías [26].

Las curvas S-N de diseño propuestas por el Eurocódigo 3 representan un 95% de probabilidad de supervivencia y un nivel de confianza del 75% (límite de confianza). Así mismo, las clases FAT definidas por la norma son de aplicación a espesores iguales o inferiores a 25 mm. En caso de espesores mayores que 25 mm se aplica un factor corrector que tiene en cuenta el espesor y minora la clase FAT correspondiente a la categoría de detalle en cuestión. En lo que respecta a la tipología de aceros, las clases FAT son de aplicación a los aceros de construcción

de todos los grados, a los aceros inoxidables y a los aceros sin protección expuestos a la intemperie.

2.3. Métodos de corte

2.3.1. Introducción

En este apartado se presenta una descripción detallada de los tres sistemas de corte térmico analizados: oxicorte, corte por plasma y corte por láser. De cada uno de ellos se exponen los fundamentos físicos y químicos en los que se basan para llevar a cabo el corte del material, las distintas tipologías existentes, los equipos requeridos y los parámetros de corte.

2.3.2. Oxicorte o corte por llama

2.3.2.1. Concepto

El oxicorte o corte por llama es una metodología de corte térmico basada en la capacidad del oxígeno para reaccionar con el hierro cuando este alcanza su temperatura de ignición, en torno a los 870°C , el cual se oxida liberando una gran cantidad de energía. La energía liberada provoca un aumento de la temperatura en la región anexa a la reacción, de tal manera que el material oxidado, que presenta una temperatura de fusión inferior a la del material base, pasa a estado líquido, pudiendo así ser expulsado de la zona de corte.

El proceso de corte por llama se compone de dos operaciones principales: precalentamiento y arrastre de material (Figura 2.29).

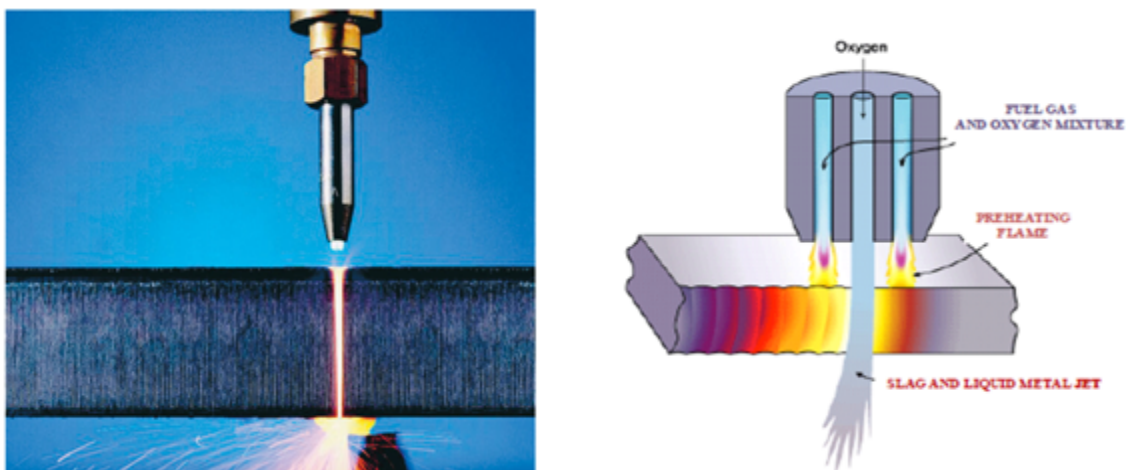


Figura 2.29 – Esquema del proceso de corte por llama [38].

- 1) **Precalentamiento:** Constituye la primera etapa del proceso de corte. En ella, la llama suministrada por la antorcha entra en contacto con la superficie del material, posibilitando que el acero alcance y mantenga la temperatura de ignición. Este paso es condición imprescindible para que se inicie la reacción química exotérmica que desemboca en el corte del material. La llama es el resultado de la combustión de una mezcla de gas inflamable y oxígeno.
- 2) **Arrastre de material:** Una vez que el material ha alcanzado su temperatura de ignición, un flujo de oxígeno a alta presión es proyectado sobre la superficie del componente precalentado, dando lugar a tres reacciones químicas fruto de las cuales el hierro se oxida liberando una gran cantidad de energía:
 - Primera reacción: $\text{Fe} + \text{O} \rightarrow \text{FeO} + \text{calor (267 kJ)}$
 - Segunda reacción: $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{calor (1120 kJ)}$
 - Tercera reacción: $2\text{Fe} + 1.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{calor (825 kJ)}$

Debido a la importante liberación de calor, especialmente en la segunda reacción, tanto el material oxidado como el material base próximo a la zona de corte experimentan un incremento de temperatura tal que genera la fusión del primero, siendo arrastrado hacia la parte inferior por el chorro de oxígeno que había provocado previamente su oxidación.

Anteriormente al proceso de corte es necesario generar la llama de precalentamiento. La manera más habitual de proceder es abrir ligeramente la válvula del gas combustible y aproximar un elemento capaz de generar una chispa que provoque el inicio de la combustión. Una vez que la llama se ha estabilizado, se regula el flujo del oxígeno de precalentamiento. Sin embargo, antes de que la máquina pueda cortar a velocidad constante, es necesario que el flujo de oxígeno principal atraviese todo el espesor de la pieza, de tal manera que la fusión y posterior arrastre del material se produzca en todo él. Para ello, la antorcha, con la llama de precalentamiento ya estabilizada, se traslada hasta el punto de inicio del corte. A continuación, se aumenta el aporte calorífico de la llama de precalentamiento hasta que el acero alcanza la temperatura de ignición, momento en el cual se proyecta el oxígeno de corte hasta que consigue atravesar todo el espesor (Figura 2.30). Esta fase inicial puede dañar en mayor o menor medida el material, por lo que se recomienda que la ubicación de dicho punto se sitúe a 2 o 3 mm del comienzo real del corte [1].

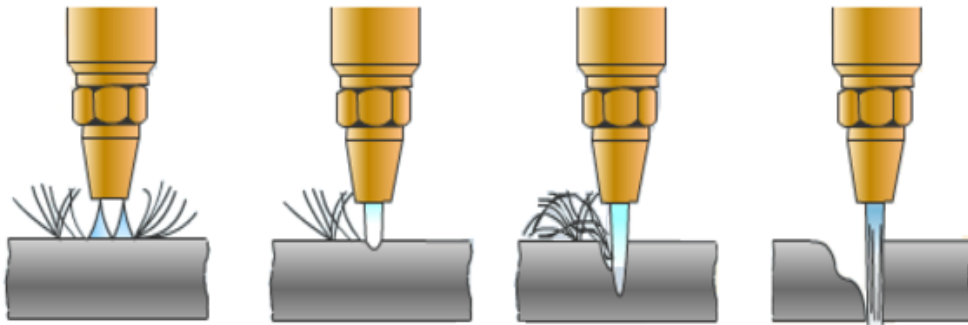


Figura 1.30 – Fases comprendidas entre el precalentamiento del acero y la penetración completa del espesor por parte del chorro de oxígeno [1].

2.3.2.2. Equipo

Los equipos de oxicorte pueden clasificarse en dos tipos (Figura 2.31): equipos de corte manual y dispositivos de corte asistido por ordenador. El corte manual se emplea en labores de mantenimiento y corte de piezas pequeñas, así como en otras labores en las que no se demanda una elevada calidad de la superficie de corte. Por el contrario, el corte asistido por ordenador es utilizado en aquellos trabajos en los que se exige una alta precisión y cuando los volúmenes de material son muy importantes.

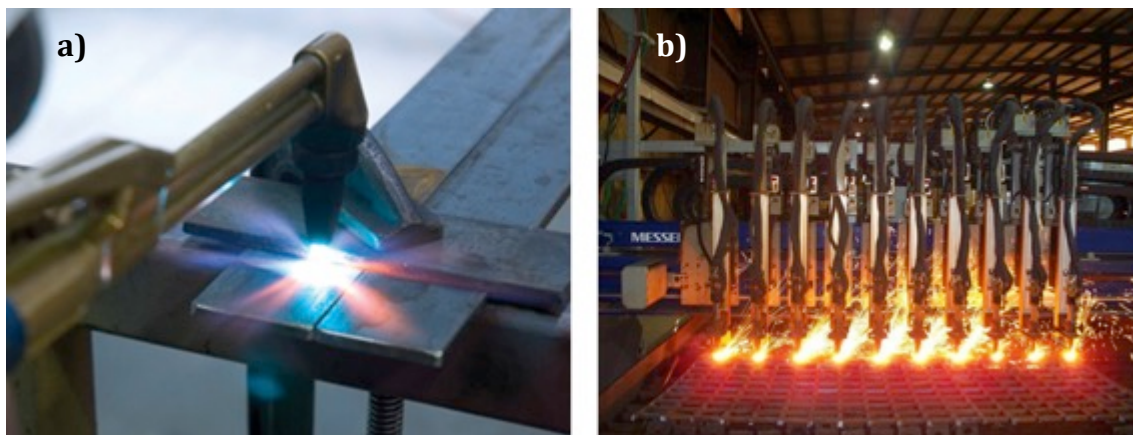


Figura 2.31 – a) Equipo de oxicorte manual [39]; b) Dispositivo de oxicorte asistido por ordenador [40].

El esquema general de un dispositivo de oxicorte asistido por ordenador se basa en una o varias antorchas de corte manual dirigidas mediante un sistema de control numérico, por lo que la descripción de los componentes que forman un equipo de corte automático lleva implícita la descripción de los de un equipo de corte manual. El equipo oxicorte automático se compone de los siguientes elementos:

- Una o varias antorchas de corte.
- Puente que soporta y mueve las antorchas de corte.
- Mesa de corte.
- Sistema de guiado por ordenador.

a) Antorcha de corte

La antorcha de corte de una máquina automática presenta el mismo esquema que el de una máquina manual pero con una mayor robustez. Se compone principalmente de dos elementos: el cuerpo central de la antorcha y la cabeza de corte.

El cuerpo central consiste en un conducto vertical cuya misión es transportar de forma segura los gases de corte desde la parte superior, donde llegan procedentes de los depósitos de almacenaje, hasta la cabeza de corte, situada en la parte inferior de la antorcha.

La cabeza de corte es el componente de la antorcha más próximo a la superficie del material y a través del cual salen los gases antes de iniciar el proceso de corte. Se compone de varias piezas fabricadas en una aleación de cobre. A pesar que de existen diferentes diseños y tamaños, el esquema general es el mostrado en la Figura 2.32. A través de los orificios situados en la periferia se suministra la mezcla de gas combustible y oxígeno necesaria para llevar a cabo la fase de precalentamiento, mientras que a través del orificio central se proyecta el oxígeno a alta presión necesario para la oxidación y arrastre del material fundido. Por lo general, el orificio central no varía su tamaño ni su diseño en función del gas combustible adoptado; sin embargo, los orificios de la periferia deben ser modificados en función del gas elegido, ya que cada uno presenta velocidades de combustión distintas, y requiere volúmenes de combustible y oxígeno diferentes.



Figura 2.32 – Antorcha de una máquina de oxicorte [41].

b) Puente y mesa de corte

El puente es el componente del equipo sobre el que van instaladas las antorchas de corte. Se compone de un pórtico dispuesto sobre dos carriles y equipado con un sistema de rodadura motorizado, de tal manera que puede desplazarse a lo largo de toda la longitud de la mesa de corte. Así mismo, las antorchas pueden moverse sobre el pórtico. Gracias a estos dos grados de libertad se consigue que la pieza permanezca fija en su posición y sea el equipo el que se desplace hasta obtener la geometría del componente deseada.

La mesa de corte es el dispositivo encargado de soportar las piezas que van a ser cortadas. Está constituida por láminas de acero verticales separadas entre sí unos 20 centímetros, de tal manera que impide la caída de las piezas una vez cortadas pero permite el paso de la escoria generada hacia los depósitos situados en la parte inferior.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.33 se muestra una máquina de oxicorte automática con tres antorchas de corte instaladas, dos de las cuales están realizando el corte.

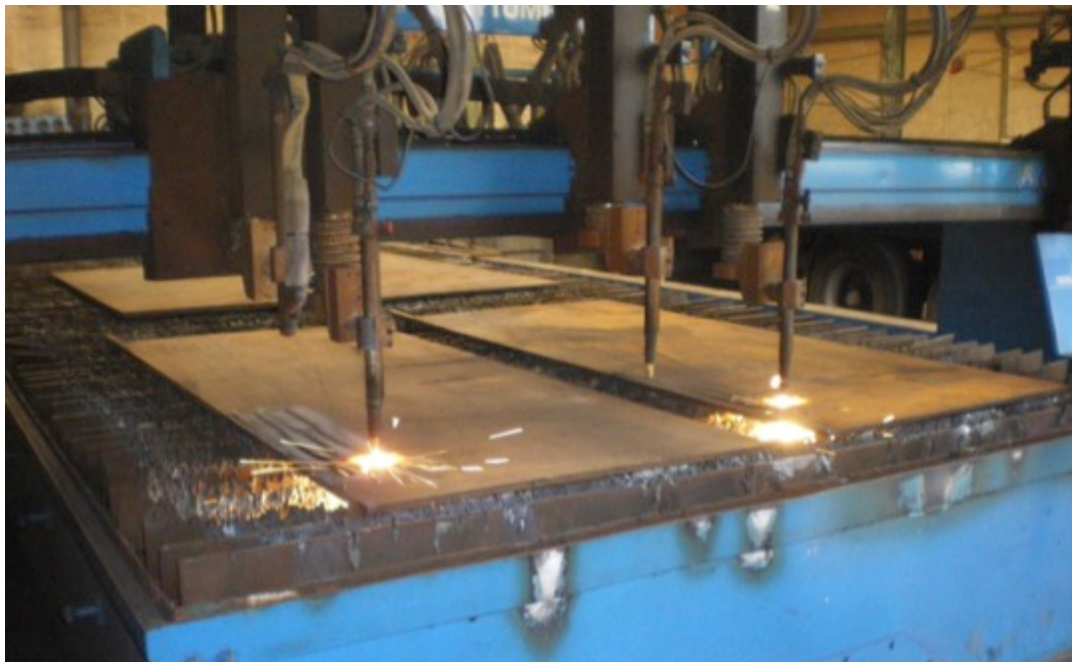


Figura 2.33 – Ejemplo de un equipo de oxicorte automático.

2.3.2.3. Parámetros de corte

Por lo general, los fabricantes de equipos de corte recomiendan unos parámetros generales de uso para cada material y espesor de componente. Sin embargo, una

calibración correcta por parte del operador es fundamental a la hora de obtener elevadas calidades y velocidades de corte.

La elección de los parámetros de corte condiciona de manera muy importante la calidad de la superficie de corte. En la Tabla 2.5 se muestra el aspecto de la superficie de corte en función de algunos de los parámetros adoptados (velocidad de corte, distancia de la boquilla). Puede observarse como, por ejemplo, una velocidad de corte demasiado baja da lugar a un exceso de fusión junto al borde inferior, provocando la formación de estrías muy profundas. De la misma manera, una boquilla muy próxima al borde superior de corte da lugar a la aparición de defectos aislados a lo largo de la superficie de corte.

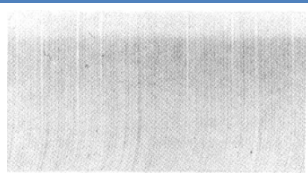
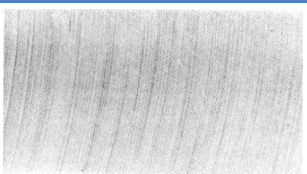
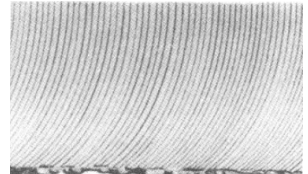
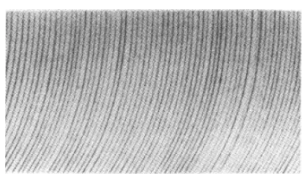
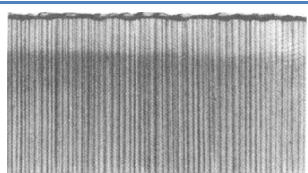
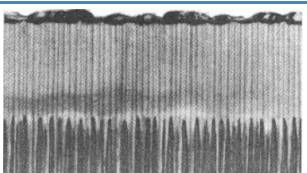
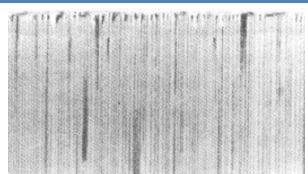
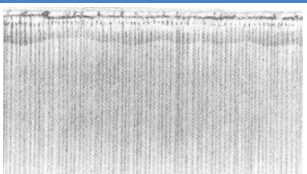
Superficie	Motivo	Superficie	Motivo
	Corte Perfecto		Corte de Producción
	Velocidad Excesiva		Velocidad Alta
	Velocidad Baja		Velocidad Insuficiente
	Boquilla Muy Próxima		Boquilla Muy Alejada

Tabla 2.5 – Influencia de los parámetros en la calidad de la superficie de corte [1].

2.3.3. Corte por plasma

2.3.3.1. Concepto

El corte por plasma se basa en la propiedad del plasma, cuarto y más energético estado de agregación de la materia y más energético, para alcanzar temperaturas de hasta 30.000°C y así poder fundir los materiales. Para ello, se emplea un arco eléctrico que ioniza el gas, el cual es proyectado a velocidad supersónica y con un alto grado de constricción contra la superficie del material a cortar, provocando en un

área muy restringida la fusión del mismo y su expulsión por la parte inferior. En la Figura 2.34 se muestra un esquema del proceso.

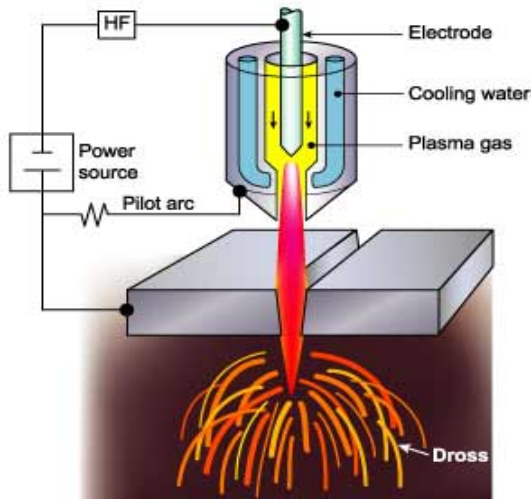


Figura 1.34 – Esquema del proceso de corte por plasma [42].

Fue desarrollado en la década de los cincuenta por Union Carbide (USA) a partir del proceso de soldeo por arco transferido de plasma (*Plasma Transferred Arc Welding, PTAW*), el cual implica alimentar un gas inerte a través de un arco eléctrico. Aumentando el flujo de gas y reduciendo la apertura de la boquilla empleada en el soldeo se observó que el flujo de plasma obtenido era capaz de cortar el metal.

En un principio su empleo se restringía al corte de aluminio y aceros austeníticos. Sin embargo, el desarrollo tecnológico que ha experimentado desde su aparición le ha permitido ser utilizado para el corte de casi cualquier material, incluso de los no conductores de la electricidad. Dado que no se basa en la oxidación del hierro para conseguir la fusión del material, puede cortar aquellos materiales metálicos que no cumplen con los requisitos para ser oxicortados.

El proceso de generación del plasma se basa en la ionización de los átomos o moléculas de un gas de tal manera que este es capaz de pasar a otro estado de agregación de la materia mucho más energético. Por lo tanto es imprescindible la presencia de dos componentes: un gas susceptible de ser ionizado y un elemento capaz de desencadenar dicho proceso.

En el caso del corte por plasma, el primero es desempeñado por el denominado “gas plasma”, mientras que el elemento detonante de la transformación es un arco eléctrico a través del cual se hace pasar dicho gas. Para la generación de un arco eléctrico es necesaria una diferencia de potencial entre un ánodo y un cátodo. La función del cátodo siempre es desempeñada por un electrodo situado en la máquina de corte. Sin embargo, a modo de ánodo puede actuar tanto la pieza que va a ser cortada, en caso de que esta sea conductora de la electricidad, u otro componente

de la cabeza de corte cuando la pieza no sea conductora. En función de cual sea el caso, se distingue entre plasma de arco transferido y plasma de arco no transferido:

- **Plasma de arco transferido:** Es el más común en el corte de materiales metálicos ya que requiere de la conductividad eléctrica de la pieza a cortar. Gracias a la diferencia de potencial entre la pieza y el electrodo situado en la máquina de corte, se genera una corriente eléctrica, la cual es constreñida al pasar por una boquilla. A continuación, el gas es obligado a pasar a través de dicho arco, aumentando rápidamente su temperatura y expandiéndose. A partir de los 5500°C, los gases se ionizan y se transforman en plasma. Llegados a este punto, el plasma es acelerado a velocidades supersónicas al pasar a través del orificio de salida. Cuando el plasma impacta contra la superficie del material tiene tanta energía y fuerza que no solo provoca la fusión del material, sino que además lo expulsa por la parte inferior. Por lo tanto, el corte por plasma no depende de ninguna reacción química con el material a cortar, sino del calor que sea capaz de transferir el gas plasma a la pieza.
- **Plasma de arco no transferido:** Es la solución a la que se recurre cuando el material a cortar no es conductor, es decir, cuando no es posible generar el arco eléctrico con la pieza como ánodo. Para ello, las funciones del cátodo y ánodo son desempeñadas por sendas piezas de la cabeza de corte. Una vez que el gas atraviesa el arco eléctrico y se ioniza, el resto de operaciones que componen el corte son similares a las del arco transferido.

2.3.3.2. Equipo

Al igual que en el oxicorte, existen equipos de corte por plasma manuales y automáticos, como se muestra en la Figura 1.35. La diferencia principal entre ambos reside en que el automático incluye un sistema de guiado por ordenador.



Figura 1.35 – a) Sistema de corte automático
b) Sistema de corte manual [43].

Los principales componentes de un equipo automático de corte por plasma son los siguientes:

- Antorcha de corte.
- Puente que soporta y mueve las antorchas de corte.
- Mesa de corte.
- Sistema de guiado por ordenador.

2.3.3.3. Parámetros de corte

Los parámetros del corte por plasma que pueden ser modificados son:

- Corriente del arco (A).
- Voltaje del arco (V).
- Velocidad de corte (m/min).
- Tipo de gas plasma, presión (kPa) y flujo (l/min).
- Tipo de gas auxiliar, presión (kPa) y flujo (l/min).
- Material y forma del electrodo.
- Diámetro de la boquilla (mm)
- Separación entre el material y la antorcha (mm).

Una elección adecuada de los parámetros es fundamental para la obtención de la calidad de corte deseada. Por el contrario, como se observa en la Figura 1.36, los posteriores procesos de rectificado podrían ser imprescindibles, con el consiguiente coste añadido que ello supone.



Figura 1.36 – Elevada cantidad de escoria adherida en la parte inferior de una acero austenítico debido a una excesiva velocidad de corte o escasa corriente [44,45].

2.3.3.4. Materiales y espesores de corte

Una de las mayores ventajas del corte por plasma es su capacidad para cortar la mayoría de los metales y aleaciones existentes en el mercado, como aceros de baja y alta aleación, aluminio, cobre,... A diferencia del oxicorte, que requiere del cumplimiento, por parte del material, de una serie de condiciones para poder ser utilizado (lo cual limita su empleo a aceros al carbono o débilmente aleados), el plasma únicamente exige que el material sea conductor de la electricidad. Además, incluso esta última condición podría ser obviada si se utiliza el corte por plasma en modo no transferido. Un ejemplo muy recurrente es el aluminio, el cual no puede ser oxicortado debido a la formación de un óxido refractario (óxido de aluminio o alúmina) cuyo punto de fusión es 1000°C superior al del aluminio puro, y que sin embargo no presenta ningún impedimento a ser cortado por plasma dado que es conductor.

Respecto a los espesores de corte, no es capaz de cortar piezas tan gruesas como el oxicorte. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 2.6, los rangos del corte por plasma incluyen la mayoría de los espesores de chapa empleados habitualmente en componentes normales.

Tabla 2.6 – Rango de espesores cortados por plasma [1].

Espesor de chapa (mm)	Material
2 – 150	Aceros al carbono y aleados
0.8 - 200	Aluminio
0.8 – 50	Cobre

Así mismo, frente al oxicorte, el corte por plasma presenta la ventaja adicional de conseguir unas velocidades significativamente mayores (dentro de los rangos de espesor comunes), y por lo tanto una mayor productividad. En la Figura 2.37 se recoge una comparativa de la velocidad de corte en función del espesor.

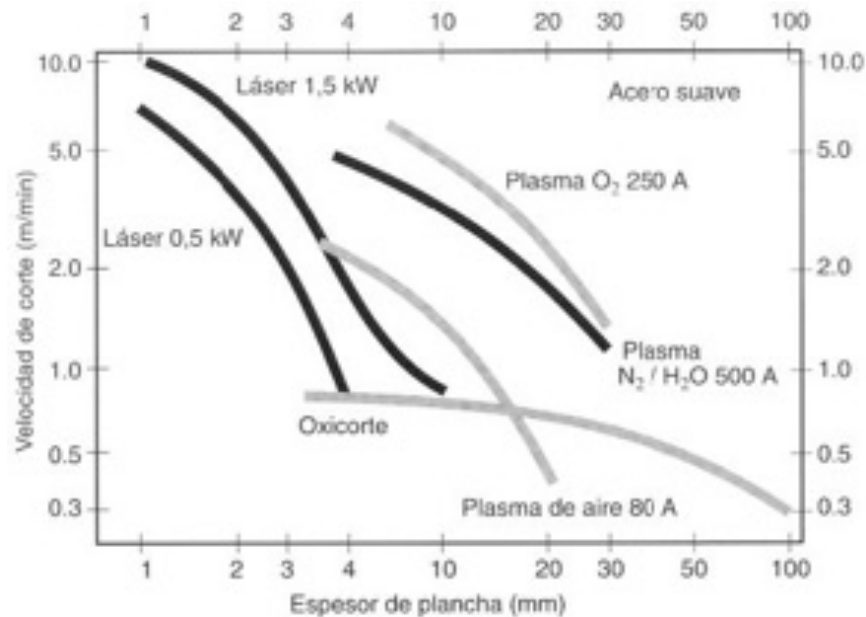


Figura 2.37 – Comparativa en un acero suave de las velocidades alcanzadas en el oxicorte, corte por plasma y corte por láser en función del espesor [1].

2.3.4. Corte por láser

2.3.4.1. Concepto

El corte por láser es un sistema de corte térmico que se basa en la capacidad de un haz láser para concentrar una elevada cantidad de energía sobre una región muy pequeña de material, provocando así un aumento muy significativo de su temperatura. Como consecuencia del calentamiento del material, el corte del mismo puede ser debido a alguno de los siguientes tres procesos:

- Fusión del material y posterior expulsión por la parte inferior del corte.
- Fusión y vaporización del material. La retirada del mismo se lleva a cabo mediante su expulsión por la parte inferior y su evaporación.
- Fusión y oxidación del material causada por el gas auxiliar. A continuación se expulsa tanto el material fundido como el oxidado. Se trata de la variante más empleada en lo que respecta al corte de aceros.

Previamente al corte es necesario generar el haz láser, para lo cual los sistemas de corte por láser disponen de un dispositivo denominado resonador. A continuación, el haz es conducido mediante un sistema de espejos hasta la cabeza de corte, donde unas lentes lo focalizan en el punto de corte deseado. Llegados a este punto, el corte por láser presenta los siguientes pasos hasta completar el proceso:

- 1) El haz láser se proyecta en la superficie, ligeramente por debajo o por encima de la pieza de trabajo.
- 2) Se incrementa la intensidad del haz hasta que la fusión del material alcanza todo el espesor de la pieza, generando así un pequeño orificio.
- 3) La expulsión del material fundido por la parte inferior de la pieza de corte se realiza mediante un gas auxiliar que fluye axialmente con el haz láser y a una presión elevada, tal y como muestra la Figura 2.46. En algunos casos se elige un gas capaz de reaccionar con el material de la pieza, de tal manera que el calor generado en la reacción exotérmica permita aumentar la velocidad de corte.
- 4) Finalmente, el haz láser se mueve sobre la pieza hasta obtener el perfil deseado.

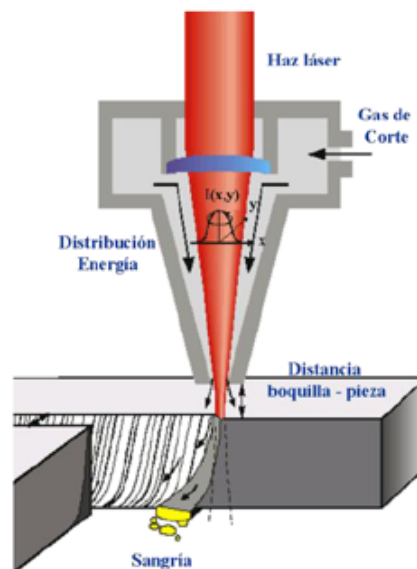


Figura 1.38 – Proceso de corte por láser y expulsión del material fundido [1].

El tamaño de las máquinas de corte por láser, en cuanto a su capacidad de procesamiento y velocidades esperadas, se define en términos de potencia. La potencia del láser es la energía emitida en forma de luz por unidad de tiempo, y se mide en vatios (W).

2.3.4.2. Tipologías de corte por láser

En la actualidad, las dos principales tipologías de corte por láser empleadas en la industria son el láser CO₂ y el láser Nd: YAG. La principal diferencia entre ambos, y de la cual se derivan el resto de propiedades, es el medio activo que utilizan para generar el haz láser en el resonador.

a) Láser CO₂

Recibe el nombre de láser CO₂ por el medio activo que emplea, el cual está compuesto por una mezcla de CO₂, Nitrógeno y Helio. Las moléculas de CO₂ son excitadas mediante una descarga eléctrica, provocando que abandonen su nivel energético cuántico inferior (000) y se posicionen en un nivel cuántico superior (001), en el cual transmiten parte de su energía por emisión espontánea en forma de fotón. La excitación del gas se consigue mediante una descarga eléctrica. El resonador presenta una cavidad cilíndrica, donde se aloja el medio activo, limitada en un extremo por un espejo totalmente reflectante, y en el otro por un espejo parcialmente reflectante que permite la salida de la radiación láser al exterior. El haz láser emitido presenta una longitud de onda igual a 10.6 μm .

Dentro del láser CO₂ existen diferentes variantes en función del flujo del gas activo:

- **Láser CO₂ de flujo axial lento:** El gas activo fluye lentamente a lo largo del eje del resonador con un caudal suficiente para retirar el CO₂ asociado a las descargas y añadiendo gas nuevo en igual medida. La potencia de este láser es baja, del orden de 1 kW.
- **Láser CO₂ de flujo axial rápido:** El funcionamiento es similar al anterior, pero el gas fluye rápidamente, por lo que el resonador se calienta menos que los de flujo lento. La potencia se sitúa en un rango comprendido entre 0.5 kW y 10 kW.
- **Láser CO₂ de flujo transversal rápido:** En este caso, el gas circula perpendicularmente al eje del resonador. La potencia alcanza valores de hasta 20 kW.

En la Figura 2.39 se muestra el esquema de generación del haz en un láser CO₂ de flujo axial.

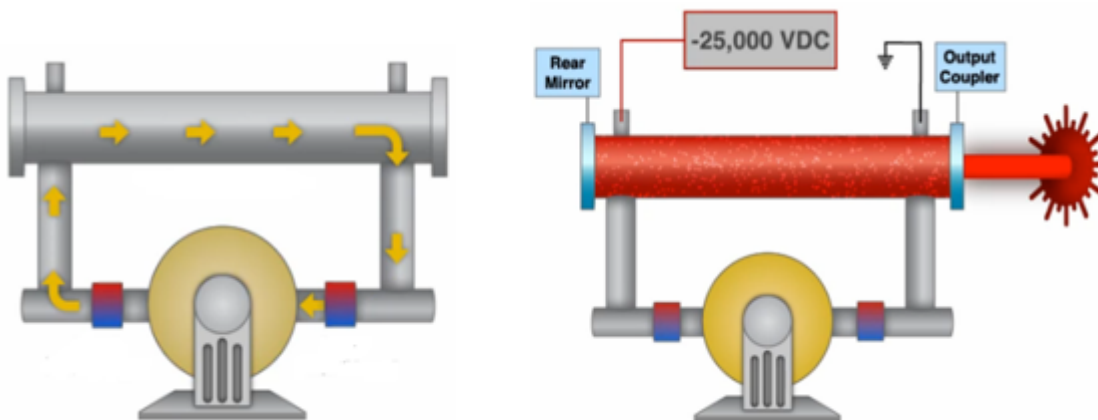


Figura 2.39 – Resonador de una máquina de corte por láser: a) Circulación del gas activo a elevada velocidad; b) Descarga eléctrica que excita el gas y provoca la emisión del haz láser [2].

b) Láser Nd: YAG

El láser Nd: YAG o láser sólido, se diferencia del láser CO₂ en que la cámara que contiene al gas se sustituye por una barra sólida de Ytrio – Aluminio – Granate dopada al 1% de Neodimio Nd³⁺. En este caso, la excitación se consigue mediante unas lámparas de Kriptón o Xenón situadas en paralelo con la barra.

La longitud de onda del haz láser emitido es igual a 1.06 μm , que, casualmente, es la décima parte de la correspondiente a los láseres CO₂. La menor longitud de onda permite una menor reflectividad en los metales, por lo que se pueden cortar materiales de igual espesor con una potencia menor que en los láseres CO₂, y presenta una gran utilidad para su aplicación en materiales de alta reflectividad, como es el caso del aluminio, el cobre o el latón. Así mismo, al tener una menor longitud de onda, el punto focal generado es de menor diámetro, por lo que aumenta la precisión y disminuye el ancho de la sangría de corte.

2.3.4.3. Equipo

A diferencia del oxicorte y corte por plasma, el corte por láser no puede ser empleado de forma manual, permitiendo únicamente una aplicación automática del mismo.

Los principales componentes de un sistema automático de corte por láser son:
Resonador.

- Transmisor.
- Cabeza de corte.
- Puente y mesa de corte.
- Sistema de guiado por ordenador.

a) Resonador: es el componente en el cual se genera el haz láser.

b) Transmisor: es la parte del equipo encargado de transmitir el haz láser generado en el resonador hasta la cabeza de corte. En el caso del láser CO₂, el transmisor está compuesto por un conjunto de espejos (cóncavos, convexos, 100% reflectivos) que desvían el haz dirigiéndolo hasta la zona de trabajo. En la Figura 2.40 se muestra un ejemplo de su funcionamiento y los espejos empleados.

Por otro lado, en los láseres Nd: YAG, la transmisión del haz láser desde el resonador hasta la cabeza de corte se lleva a cabo mediante fibra óptica,

prescindiendo de los espejos, lo cual facilita mucho su aplicación en sistemas robotizados.

La calidad del haz depende principalmente de las interferencias y divergencias en los elementos ópticos y de los campos electromagnéticos que se generan en el interior de la fuente. La calidad viene definida por el parámetro TEM_{mn}, donde m y n especifican el número de valles energéticos que se produce en los ejes perpendiculares a la propagación de la luz. TEM₀₀ representa un haz perfecto con una distribución de energía Gaussiana.

- c) **Cabezal de corte:** su misión es, una vez generado y transportado el haz láser mediante los espejos mostrados en la Figura 2.40, focalizarlo para que pueda generar una alta densidad de energía en un área relativamente pequeña. La focalización más simple se realiza mediante una única lente pero lo más habitual es emplear otras más complejas que combinan la acción de varias lentes. Así mismo, el cabezal de corte suministra los gases necesarios para arrastrar el material fundido.

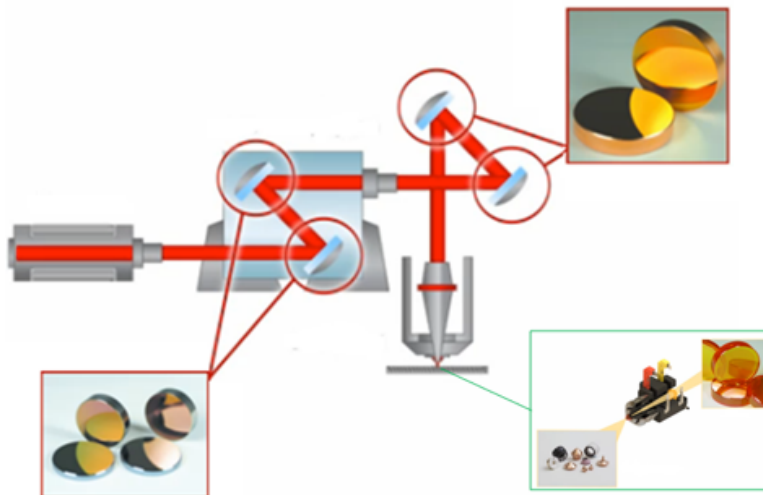


Figura 2.40 – Transmisor de un láser CO₂ y cabezal de corte [2].

- d) **Puente y mesa de corte**

El esquema del conjunto formado por el puente y la mesa de corte es similar al de los otros procesos de corte. Sin embargo, dada la mayor precisión y complejidad de los componentes que conforman el equipo, el puente de corte suele disponer de unos sistemas de movimiento y traslación más complejos.

2.3.4.4. Parámetros de corte

Los principales parámetros del corte por láser se describen a continuación:

a) Potencia e intensidad del láser

La intensidad determina la velocidad y espesor que se puede cortar. Cuanto mayor sea el espesor, mayor será la intensidad de láser necesaria. La intensidad se puede elevar utilizando un láser de mayor potencia o concentrando más el haz mediante lentes con una distancia focal menor.

b) Distancia y profundidad focal de las lentes

La profundidad focal define la tolerancia a la variación de la posición relativa de la lente a la pieza. La distancia y profundidad focal están relacionadas. Como se puede observar en la Figura 2.41, distancias focales cortas producen puntos focales pequeños y profundidades de foco reducidas, lo cual se traduce en alta velocidad de corte y alta calidad en espesores pequeños. Cuando se van a cortar espesores grandes, la profundidad del foco se aumenta, lo cual provoca mayores tamaños de foco.

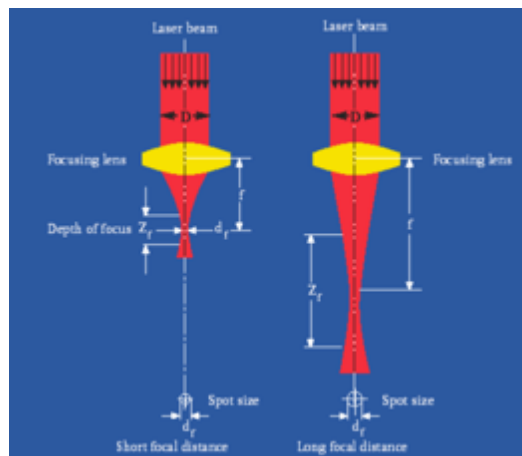


Figura 2.41 – Relación entre la distancia focal, la profundidad y el tamaño del foco.

c) Modo del Haz

El modo del haz define la distribución de la energía en el foco.

d) Longitud de onda

La longitud de onda determina en qué porcentaje la radiación láser es absorbida por el material a cortar. Debido a la menor longitud de onda obtenida con el láser Nd: YAG, el porcentaje de radiación absorbida es del 25%, mientras el porcentaje es del 15% con el láser CO₂.

e) Posición del foco respecto de la pieza

Lo más habitual es situar el foco en la superficie de la pieza o justo por encima de ella. En los aceros inoxidables se localiza en la superficie inferior.

f) Gas de corte

En relación a los gases de corte, se pueden distinguir dos grupos fundamentales:

- *Oxígeno*: Empleando oxígeno como gas auxiliar, el material es quemado y vaporizado, después de que haya sido calentado por el haz láser hasta su temperatura de ignición. La reacción química entre el oxígeno y el metal, a dicha temperatura, aporta energía en forma de calor, gracias al cual se sustenta el proceso de corte. Sin embargo, la superficie de corte queda cubierta con una película de óxido, un impedimento cuando las piezas van a ser metalizadas ya que dificulta una unión efectiva entre el acero y el material del recubrimiento.
- *Gas no activo*: En el corte con gases no activos, como por ejemplo el nitrógeno o el argón, el metal es calentado hasta su punto de fusión mediante el haz láser y desalojado de la ranura de corte por la energía cinética del chorro de gas de corte (a elevada presión). Dado que los gases no son activos, no hay un aporte extra de calor por combustión, por lo que la potencia del láser deberá ser mayor que la utilizada en el corte con oxígeno para un espesor similar. El corte con gases no activos se conoce también como corte limpio o de alta presión.

2.3.4.5. Materiales de corte

El corte por láser puede ser utilizado con la práctica totalidad de los materiales comerciales. De hecho, a diferencia del corte por plasma, no requiere ni que el material sea conductor. Únicamente, acabados superficiales brillantes en aluminio, cobre o acero inoxidable aumentan la reflectividad del material y pueden dificultar el corte, especialmente en el inicio. Puede utilizarse para cortar titanio, aleaciones base níquel, aleaciones base cobre e incluso materiales no metálicos, como cerámicos, plásticos o maderas.

La principal diferencia con el oxicorte y el corte por plasma reside en los espesores que es capaz de cortar. El límite superior en aceros al carbono se sitúa en torno a 20 – 25 mm. Su principal campo de aplicación abarca la fabricación de componentes de pequeño espesor, hasta 12–15 mm, debido a su precisión, a las pequeñas distorsiones que introduce en el material y a las elevadas velocidades de procesamiento que alcanza. Sin embargo, la velocidad de corte es inversamente proporcional al espesor, lo cual provoca una disminución muy significativa de la velocidad para pequeños incrementos del espesor.



3. Programa Experimental

3.1. Introducción

En este capítulo se procede a la descripción de los materiales escogidos en la presente investigación, justificando su elección y recogiendo sus principales características químicas, microestructurales y mecánicas. También se describe el programa experimental de fatiga seguido en este trabajo.

3.2. Selección de materiales

Se han seleccionado aquellos aceros estructurales que, por sus características mecánicas, cubren las necesidades demandadas por los sectores de la ingeniería civil y la industria. En la Tabla 3.1, se expone una guía elaborada por el TGS8 (*Technical Group Steel: Steel products and applications for building, construction and industry. Research Fund for Coal & Steel. European Union*), en la cual se muestra la adecuación a cada sector de los distintos aceros estructurales en función de su límite elástico.

Tomando como referencia la Tabla 3.1, se han considerado cuatro aceros estructurales diferentes. Por un lado, los aceros S355M y S460M (denominación correspondiente a la normativa europea EN 10025-4) [2]; y por otro lado, los aceros S690Q y S890Q (según la normativa europea EN 10025-6) [3].

Tabla 3.1 – Aplicación de los aceros estructurales en función de su límite elástico.

Sector	Límite elástico mínimo (MPa)											
	235	275	300	355	400	420	460	500	550	690	890	1000
Edificación	Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al					
Puentes de carretera (pequeños y medianos)	Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al					
Puentes de carretera (grandes)				Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al		
Puentes de ferrocarril	Ba	Me	Me	Al								
Tuberías: onshore				Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al		
Tuberías: offshore				Ba	Ba	Me	Me	Al	Al			
Recipientes a presión		Ba	Ba	Me	Me	Me	Al	Al	Al	Al		
Tanques de almacenamiento	Ba	Me	Me	Al	Al	Al	Al					
Plataformas petrolíferas				Me	Me	Me	Me	Al	Al			
Buques de carga	Ba	Me	Me	Me	Al	Al						
Buques militares			Ba	Me	Me	Al	Al					
Aerogeneradores		Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al	Al			
Grúas móviles						Ba	Ba	Me	Me	Al	Al	Al
Equipos de minería					Ba	Ba	Me	Al	Al	Al		
Maquinaria de construcción		Ba	Ba	Me	Me	Me	Al	Al	Al	Al		
Ba Considerado de bajo límite elástico para dicho sector Me Considerado de límite elástico medio para dicho sector Al Considerado de alto límite elástico para dicho sector												

Considerando el valor del límite elástico, los cuatro aceros seleccionados abarcan la práctica totalidad de los aceros estructurales, únicamente dejando fuera aquellos con un límite elástico mínimo de 235 o 275 MPa.

Desde el punto de vista microestructural, los aceros adoptados son representativos de dos tipologías de acero totalmente diferentes, cuya respuesta frente a un tratamiento térmico, como es el provocado por un proceso de corte térmico, varía de forma significativa. De esta manera, los aceros S355M y S460M presentan la microestructura típica correspondiente a un proceso de laminado en caliente, mientras que el S690Q y S890Q son representativos de una microestructura obtenida a partir de temple y revenido.

A continuación se realiza una breve descripción de los mismos, haciendo especial referencia a las características técnicas que les definen.



3.2.1. Aceros S355M y S460M

El S355M y el S460M pertenecen al grupo de los aceros de grano fino y tratados termomecánicamente. Durante su proceso de fabricación son laminados en caliente, sometiéndolos a una deformación plástica antes o durante la transformación alotrópica.

El símbolo S empleado en la definición de ambos aceros hace referencia a que se trata de un acero estructural (*S*, *structural steel*). La letra M define la energía Charpy mínima a -20°C , la cual debe ser igual a 40 J en probetas paralelas a la dirección de laminación y 20 J en probetas transversales para ambos aceros.

La principal diferencia entre ambos es el valor del límite elástico mínimo garantizado. En el caso del acero S355M, el límite elástico mínimo es 355 MPa, mientras para el acero S460M es 460 MPa.

3.2.2. Aceros S690Q y S890Q

El S690Q y el S890Q son aceros de alta resistencia. Constituyen una variante del grupo de los aceros microaleados de alta resistencia (HSLA, High Strength Low Alloy), cuyo estado de suministro es de temple y revenido. Durante su fabricación, las chapas de acero microaleado son calentadas hasta una temperatura donde se consigue una estructura austenítica y enfriadas rápidamente (temple), produciéndose así la transformación de la austenita en una estructura mixta de martensita y bainita inferior. A continuación son sometidas a un revenido con objeto de mejorar las propiedades de ductilidad y choque.

Respecto a la nomenclatura empleada para su definición, el símbolo S, como se explicó anteriormente, hace referencia a su empleo como acero estructural. En este caso, el término Q no define el valor de la energía Charpy mínima, sino el estado de suministro de temple y revenido. Dado que la denominación no incluye, a parte de la letra Q, ningún símbolo adicional, la energía Charpy mínima a -20°C debe ser igual a 30 J en probetas paralelas a la dirección de laminación y 27 J en probetas transversales.

La principal diferencia entre ambos es el valor del límite elástico mínimo. En el caso del acero S690Q es 690 MPa, y en el acero S890Q es 890 MPa.

3.2.3. Espesores de chapa

Otra característica importante en el estudio es el espesor de las chapas en que los aceros han sido suministrados. De esta forma, se ha seleccionado un espesor de 15 mm para todos los aceros. Adicionalmente, para el S460M se ha considerado un espesor adicional de 25 mm.

Los principales criterios tenidos en cuenta a la hora de elegir estos espesores son:



- Se trata de espesores comúnmente empleados en la fabricación de vigas para puentes, estructuras metálicas y componentes para maquinaria de construcción.
- Las principales normativas de diseño de componentes en fatiga, como el Eurocódigo 3 define la aplicación de sus curvas S-N a espesores iguales o inferiores a 25 mm, exigiendo una corrección para espesores mayores.
- Las principales investigaciones encontradas en la bibliografía sobre la influencia de los sistemas de corte térmico en la vida a fatiga han sido realizadas sobre componentes de menor espesor (inferior a 10 mm en la mayoría de los casos), especialmente cuando el proceso de térmico evaluado es el corte por láser.
- El espesor adicional de 25 mm en uno de los aceros permite analizar la influencia de este parámetro en la vida a fatiga de bordes obtenidos mediante sistemas de corte térmico.

3.3. Caracterización del acero

3.3.1. Composición química

La composición química de los cuatro aceros estudiados se recoge en la Tabla 3.2, donde se puede observar las proporciones de cada elemento en % en peso.

Tabla 3.2 – Composición química de los materiales empleados. Resultados expresados en % en peso.

Elemento	S355M	S460M		S690Q	S890Q
	15 mm	15 mm	25 mm	15 mm	15 mm
C	0.14	0.12	0.12	0.15	0.16
Si	0.35	0.45	0.45	0.40	0.34
Mn	1.35	1.49	1.49	1.42	1.26
P	0.015	0.012	0.012	0.005	0.012
S	0.008	0.001	0.001	0.001	0.002
Cr	0.021	0.062	0.062	0.02	0.26
Mo	0.002	0.001	0.001	0.002	0.470
Ni	0.021	0.016	0.016	0.16	0.03
Al	0.03	0.048	0.048	0.056	0.081
Cu	0.015	0.011	0.011	0.01	0.02
Nb	0.025	0.036	0.036	0.029	0.025
N	0.004	0.005	0.005	0.006	0.002
Sn	0.002	0.002	0.002	0.002	0.006
Ti	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
V	0.004	0.066	0.066	0.058	0.29
CEV	0.37	0.39	0.39	0.43	0.52

3.3.2. Microestructura

En las Figuras 3.1 a 3.5 se muestran las microestructuras de los cuatro aceros considerados. Concretamente, para a cada uno de ellos, se ha obtenido la microestructura según tres planos coordinados, definidos por las orientaciones L (dirección de laminación), T (dirección transversal a la de laminación) y S (dirección según el espesor de la chapa).

Los aceros S355M y S460M muestran una estructura típica hipoeutectoide, mientras que los aceros S690Q y S890Q muestran una estructura bainítica/martensítica revenida.

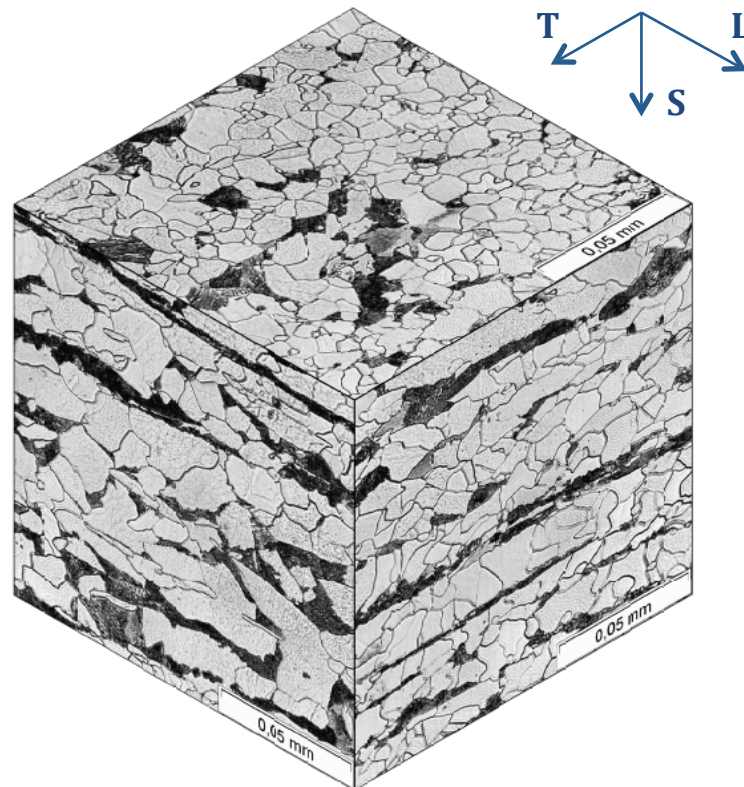


Figura 3.1 – Microestructura correspondientes al acero S355M.

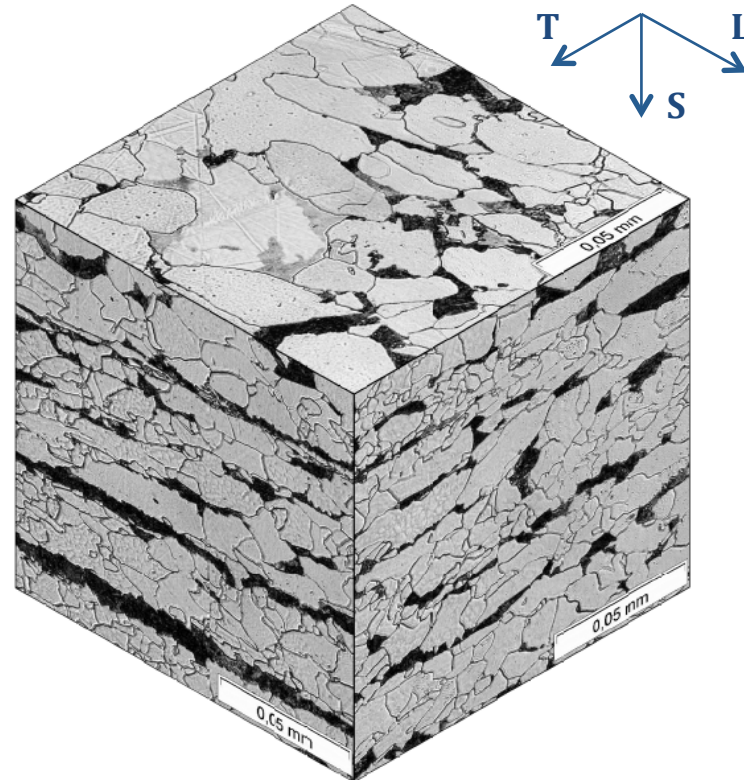


Figura 3.2 – Microestructuras correspondientes al acero S460M (15 mm).

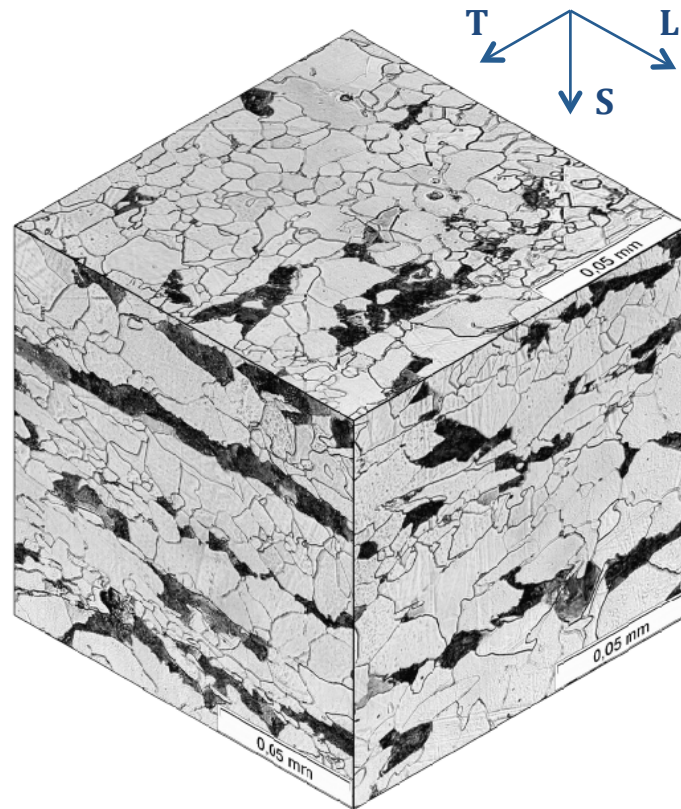


Figura 3.3 – Microestructuras correspondientes al acero S460M (25 mm).

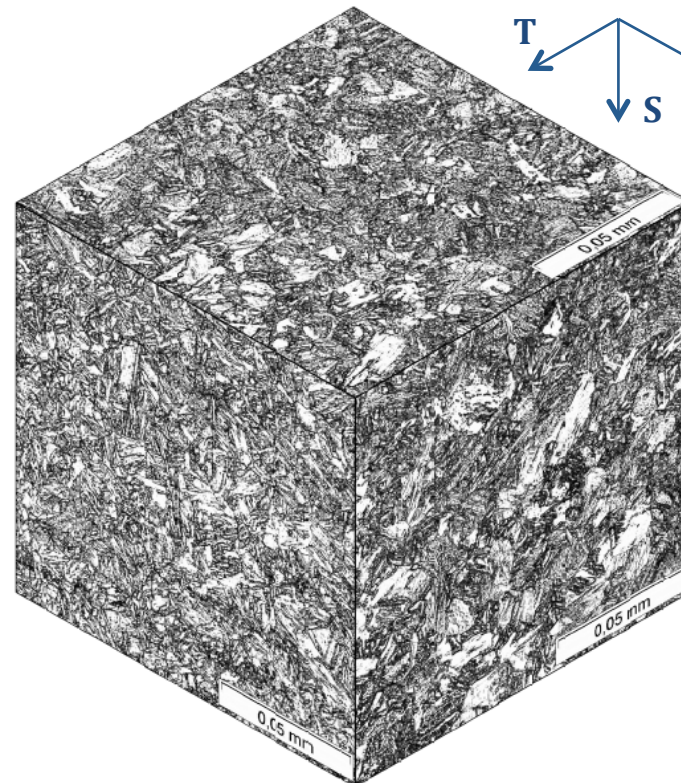


Figura 3.4 – Microestructuras correspondientes al acero S690Q.

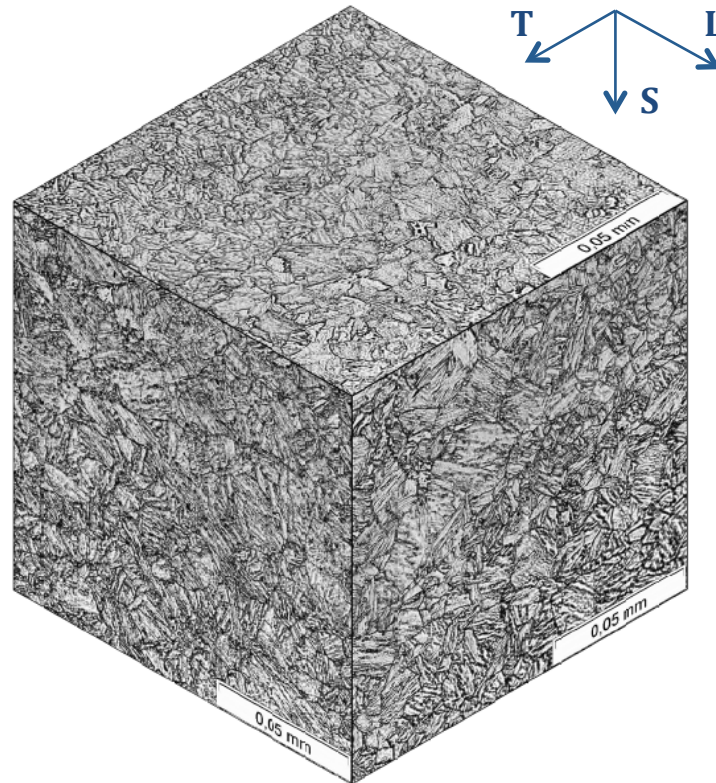


Figura 3.5 – Microestructuras correspondientes al acero S890Q.

3.3.3. Propiedades a tracción

El conocimiento previo de las propiedades a tracción de un material es fundamental a la hora realizar una investigación sobre el comportamiento a fatiga, ya que la magnitud de las cargas cíclicas a las que se somete durante dicho programa experimental se definen en función de los parámetros a tracción del material.

Las probetas empleadas para realizar los ensayos a tracción se han diseñado siguiendo las indicaciones de la normativa EN ISO 6892-1 [46]. Las principales características de las mismas son una sección circular con 10 mm de diámetro y 68 mm de longitud de la parte calibrada (Figura 3.6).

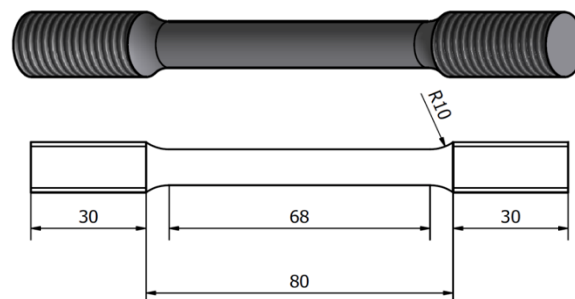


Figura 3.6 – Esquema de la probeta empleada en los ensayos a tracción y diseñada según la normativa EN ISO 6892-1 [46].

Las probetas han sido mecanizadas en la dirección paralela a la de laminación, condición impuesta por el hecho de que las probetas de fatiga también han sido extraídas según esa dirección. Así mismo, la sección de la probeta se ha situado centrada en el espesor de la chapa. Finalmente todos los ensayos se han realizado a temperatura ambiente, habiéndose llevado a cabo dos por cada tipo de acero.

La Figura 3.7 muestra las curvas tensión-deformación en variables ingenieriles correspondientes a uno de los dos ensayos realizados sobre cada acero. Con objeto de comparar las curvas entre sí, estas se han representado conjuntamente.

En la Tabla 3.3 aparecen resumidos los valores del límite elástico convencional (R_e), resistencia a tracción (R_m), parámetro Y/T (cociente entre R_e y R_m), deformación total bajo carga máxima (ϵ_{max}) y deformación total en rotura (ϵ)

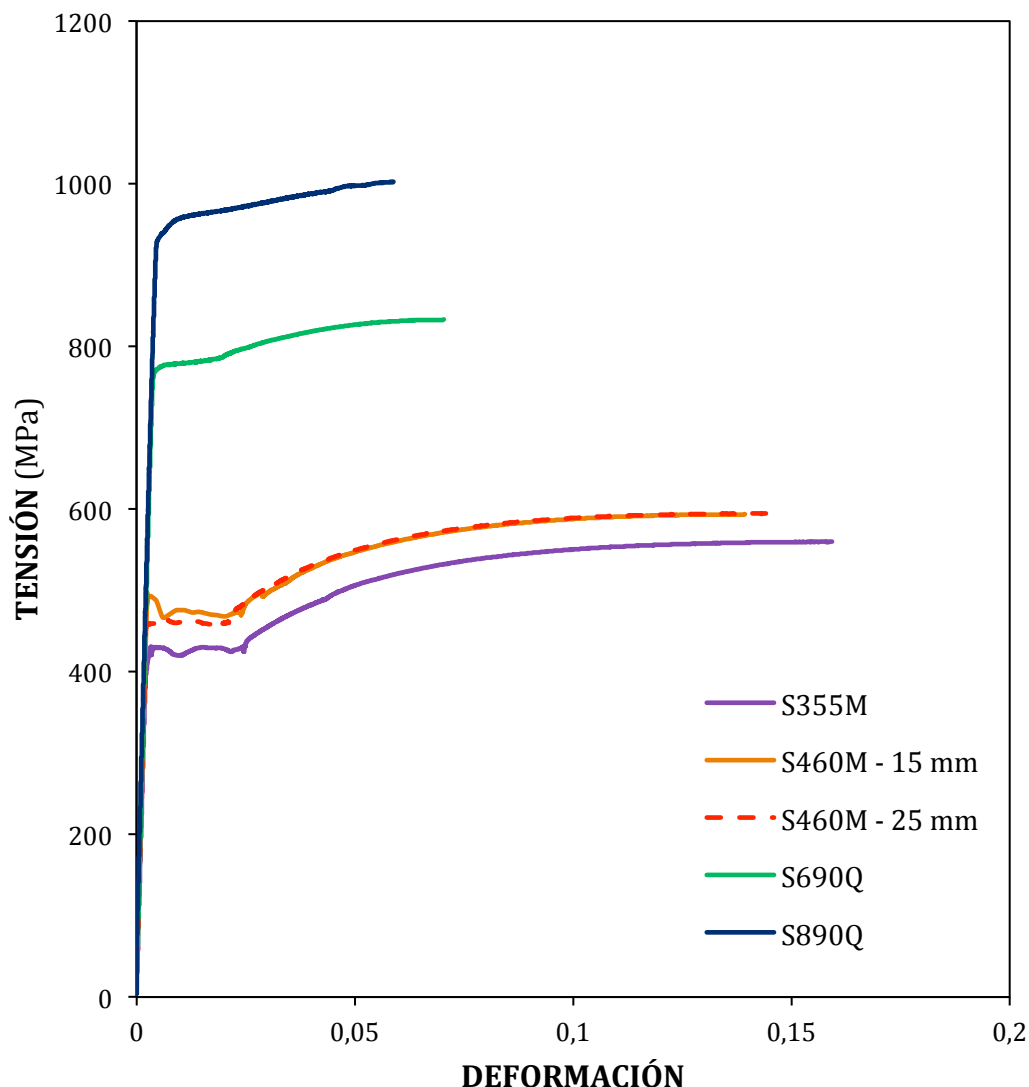


Figura 3.7 – Comparación de las curvas Tensión – Deformación de todos los aceros considerados.

Tabla 3.3 – Parámetros característicos del comportamiento en tracción de los cuatro seleccionados.

ACERO	R_e (MPa)	R_m (MPa)	Y / T	ϵ_{max} (%)	ϵ_u (%)
S355M	426.6	559.2	0.76	15.8	32.7
S460M – 15mm	484.1	594.4	0.81	14.4	30.6
S460M – 25mm	465.5	596.3	0.78	14.5	29.3
S690Q	776.2	833.7	0.93	7.0	20.2
S890Q	940.2	999.0	0.94	6.0	17.7

Dado que la limitada capacidad de recorrido del extensómetro impide registrar la deformación en rotura, dicho parámetro se ha determinado midiendo la separación final de dos marcas pintadas sobre la longitud calibrada y separadas inicialmente 50 mm. En la Figura 3.8 se muestra la disposición empleada para la determinación de la deformación en rotura para el acero S690Q.



Figura 3.8 – Probeta del acero S690Q tras el ensayo de tracción.

Analizando las curvas de tensión – deformación, se pueden destacar los siguientes aspectos sobre las propiedades a tracción de los distintos aceros:

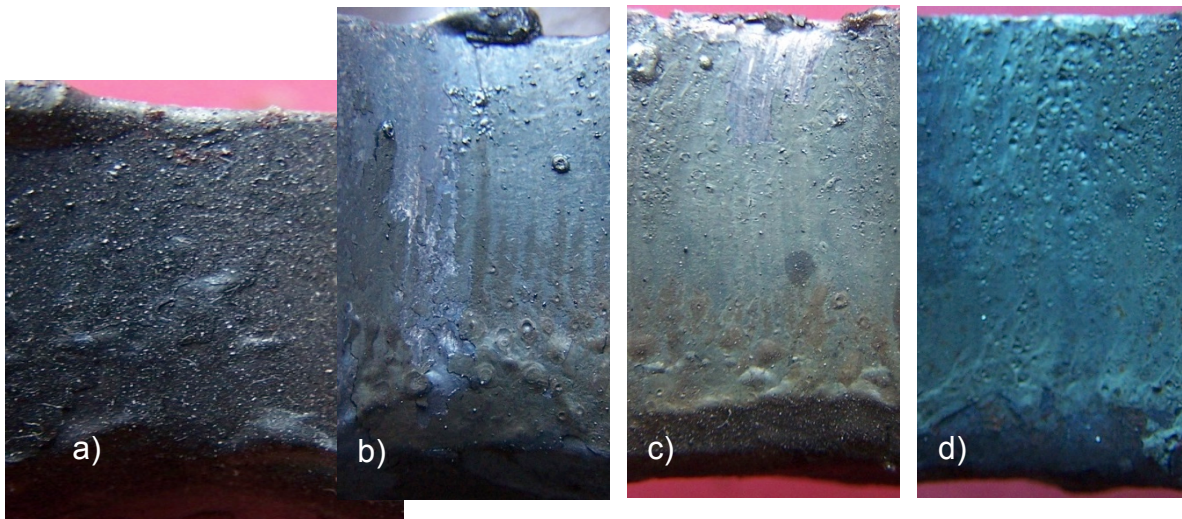
- Todos ellos cumplen con el valor del límite elástico mínimo especificado.
- Los valores del límite elástico, resistencia y deformación en rotura obtenidos en los dos espesores del acero S460M son muy similares, siendo el límite elástico obtenido en el espesor de 25 mm ligeramente inferior al de 15 mm.
- Los aceros S690Q y S890Q, templados y revenidos, muestran valores más altos del parámetro Y/T (luego la diferencia entre la tensión del límite elástico y la tensión de rotura es menor) y las deformaciones bajo carga máxima y en rotura son significativamente inferiores a las obtenidas en los aceros S355M y S460M.

3.4. Análisis de los agujeros y las superficies de corte

3.4.1. Rugosidad

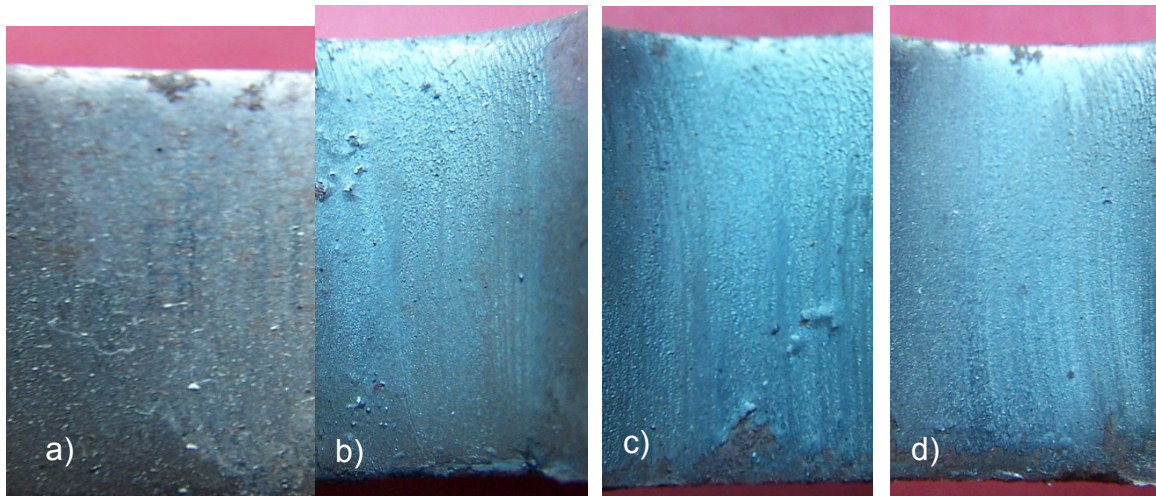
El procedimiento de medida de este parámetro mediante un rugosímetro solo es aplicable a agujeros taladrados y punzonados. Dada la imposibilidad de medida de la rugosidad en los agujeros cortados térmicamente según lo exigido en la normativa, se han tomado imágenes de la superficie obtenida en el contorno del orificio para poder evaluar y comparar cualitativamente los tres procedimientos de corte térmico seleccionados.

En la Figura 3.9 se muestran las superficies de los agujeros oxicortados obtenidos en los cuatro aceros considerados. En todos ellos se observa una superficie lisa con la presencia de pequeños defectos en forma de material adherido. En las proximidades del borde inferior se produce una fusión excesiva y con ello un redondeo del borde.



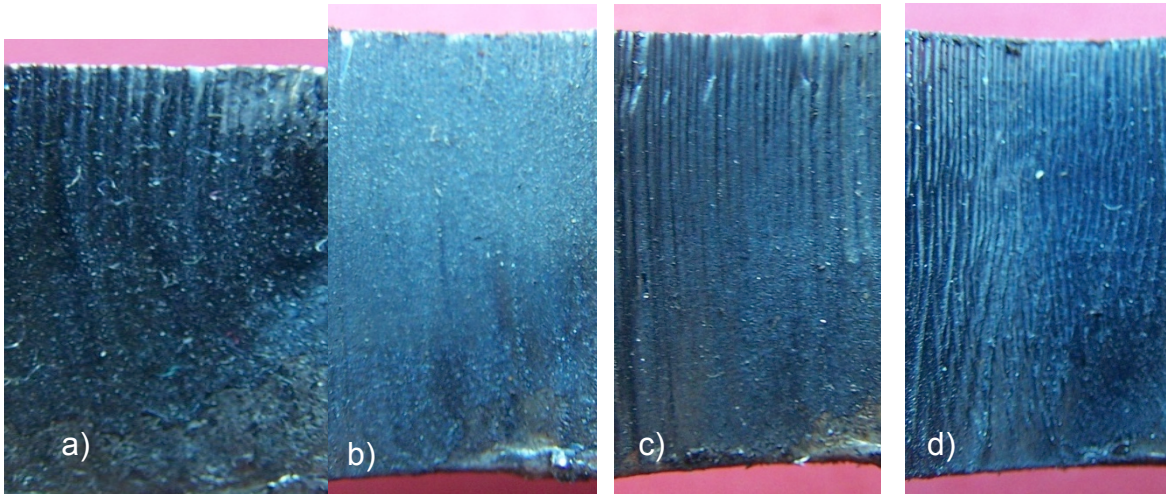
*Figura 3.9 – Superficie de los agujeros oxicortados.
a) S355M; b) S460M; c) S69Q; d) S890Q.*

En la Figura 3.10 se muestran las superficies de los orificios obtenidos mediante corte por plasma en los cuatro aceros utilizados. La calidad superficial de todos ellos es muy elevada, no habiendo apenas diferencias en función del acero.



*Figura 3.10 – Superficie de los agujeros cortados por plasma.
a) S355M; b) S460M; c) S690Q; d) S890Q.*

En la Figura 3.11 se observan las superficies correspondientes a los orificios obtenidos mediante corte por láser en los cuatro aceros elegidos. En primer lugar, todos ellos presentan estrías verticales, siendo claramente visibles en las proximidades del borde superior. A diferencia de lo observado en los otros dos procedimientos de corte, existen diferencias entre las superficies correspondientes a los cuatro aceros. Tanto en el S355M (Figura 4.43a) como en el S690Q (Figura 4.43c) se distingue perfectamente la zona de flujo laminar, donde las estrías son más profundas, y la zona de flujo turbulento, donde apenas son visibles. Por el contrario, en el acero S890Q (Figura 4.43d), las estrías presentan un aspecto muy similar en todo el espesor de la chapa. Finalmente, el acero S460M es el que presenta una mayor calidad superficial, siendo las estrías ligeramente visibles junto al borde superior. Conviene mencionar que, a diferencia de las superficies de corte rectas obtenidas mediante láser, la superficie de los orificios no presenta defectos lenticulares.



*Figura 3.11 – Superficie de los agujeros cortados por láser.
a) S355M; b) S460M; c) S69Q; d) S890Q.*

Una vez analizadas las superficies de los orificios realizados en los cuatro aceros y 15 mm de espesor, se estudian las obtenidas en el acero S460M y 25 mm de espesor. En la Figura 3.12 se muestra un ejemplo de la superficie obtenida por cada uno de los tres procedimientos de corte térmico utilizados.

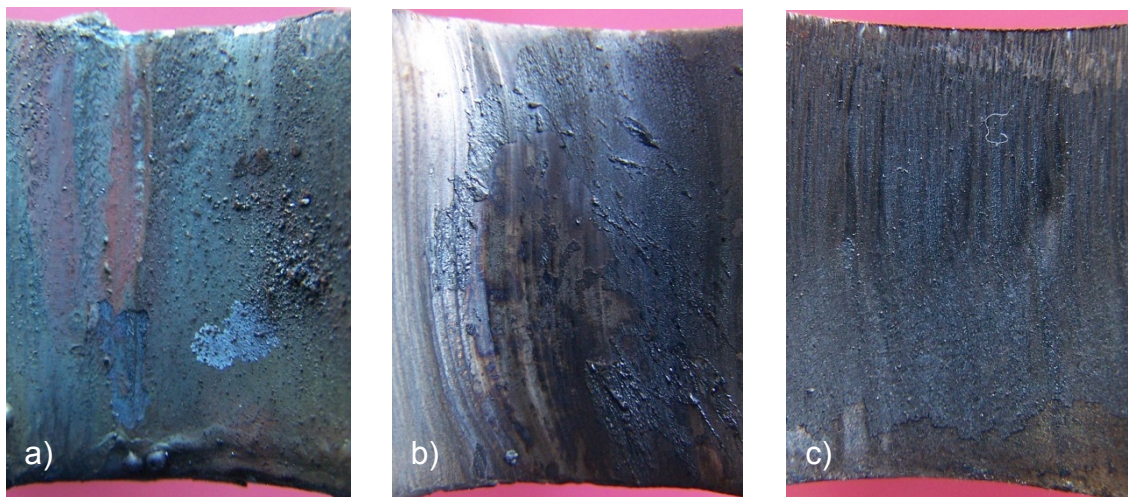


Figura 3.12 – Superficie de los agujeros cortados térmicamente en el acero S460M y 25 mm de espesor. a) Oxicorte; b) Corte por plasma; c) Corte por láser.

3.4.2. Tolerancia geométrica

Se ha comprobado que todos los procedimientos de corte presentan, por un lado, una variación del diámetro del orificio en el espesor de la chapa, y por otro lado, una reducción del mismo respecto al considerado en su diseño (15.00 mm).

La normativa EN 1090 [47] establece una serie de requisitos respecto al diámetro del agujero obtenido tras el proceso de fabricación. Dicho código hace referencia a agujeros taladrados, punzonados, cortados por plasma, láser u otro corte térmico. En lo que respecta a su geometría, se deben cumplir tres criterios:

- El diámetro medio entre el medido en el borde superior y en el borde inferior debe estar comprendido entre el diámetro de diseño ± 0.50 mm.
- La diferencia entre el diámetro medido en el borde superior y el medido en el borde inferior debe ser inferior al 7 % del espesor.
- Debe comprobarse el diámetro mediante calibres pasa/no pasa.

Para los cuatro aceros seleccionados y los agujeros oxicortados, la Tabla 3.4 recoge los valores del diámetro medido en los bordes superior e inferior, la diferencia entre los dos diámetros expresada en porcentaje del espesor, y el diámetro medio. En todos los aceros se observa que el diámetro en el borde inferior es mayor que en el superior, y por lo tanto este último será el que delimite el diámetro máximo de tornillo que puede pasar a través de él. Solo el orificio correspondiente al acero S890Q cumple con los requisitos exigidos por la normativa EN 1090.

Tabla 3.4 – Diámetro de los orificios obtenidos mediante oxicorte en los cuatro aceros considerados.

ACERO	BORDE SUPERIOR	BORDE INFERIOR	DIFERENCIA	DIÁMETRO MEDIO
S355M	12.71 mm	13.52 mm	5.4%	13.11 mm
S460M	13.78 mm	15.22 mm	9.6%	14.50 mm
S690Q	13.11 mm	13.85 mm	4.9%	13.48 mm
S890Q	14.26 mm	15.00 mm	4.9%	14.63 mm

En la Tabla 3.5 se recogen los valores correspondientes a los agujeros cortados por plasma. Se comprueba que el diámetro del orificio en el borde superior se sitúa en todos los casos muy próximo al valor teóricamente diseñado, de hecho la mayor diferencia es de 0.17 mm (correspondiente al acero S690Q). Sin embargo, el diámetro en el borde inferior se ha reducido de forma significativa, lo cual provoca que en ninguno de los casos se cumplan los requisitos de la normativa EN 1090

Tabla 3.5 – Diámetro de los orificios obtenidos mediante corte por plasma en los cuatro aceros considerados.

ACERO	BORDE SUPERIOR	BORDE INFERIOR	DIFERENCIA	DIÁMETRO MEDIO
S355M	14.98 mm	13.47 mm	10.1%	14.23 mm
S460M	15.16 mm	13.33 mm	12.2%	14.25 mm
S690Q	14.83 mm	13.10 mm	11.5%	13.97 mm
S890Q	15.15 mm	13.38 mm	11.8%	14.27 mm

En la Tabla 3.6 se muestran los valores medidos en los orificios cortados por láser. En todos los aceros se cumplen los requisitos referentes al diámetro medio y el porcentaje de variación establecidos en la normativa EN 1090.

Tabla 3.6 – Diámetro de los orificios obtenidos mediante corte por láser en los cuatro aceros considerados.

ACERO	BORDE SUPERIOR	BORDE INFERIOR	DIFERENCIA	DIÁMETRO MEDIO
S355M	15.02 mm	14.95 mm	0.5%	14.99 mm
S460M	15.06 mm	14.97 mm	0.6%	15.02 mm
S690Q	15.10 mm	15.03 mm	0.5%	15.06 mm
S890Q	15.06 mm	15.05 mm	0.5%	15.06 mm

En la Tabla 3.7 se recoge el valor del diámetro de los orificios obtenidos en el acero S460M y 25 mm de espesor mediante los tres procedimientos de corte. Tanto en el oxicorte como en el corte por láser, la diferencia entre el diámetro superior e inferior es menor de 0.35 mm. En el corte por plasma la diferencia entre ambos diámetros es considerablemente mayor (1.58 mm), pero sin embargo cumple con la limitación del 7% exigida por la normativa EN 1090. En lo que respecta al diámetro medio, se observa que en el corte por plasma y láser dicho valor se encuentra comprendido en el intervalo de ± 0.50 mm respecto al diseñado inicialmente (25.00 mm). En el caso del oxicorte, el diámetro medio se sitúa fuera de dicho intervalo únicamente por 0.18 mm.

Tabla 3.7 – Diámetro de los orificios obtenidos en el acero S460M de 25 mm de espesor mediante los tres procedimientos de corte.

ACERO	BORDE SUPERIOR	BORDE INFERIOR	DIFERENCIA	DIÁMETRO MEDIO
OXICORTE	24.14 mm	24.49 mm	1.4%	24.32 mm
CORTE POR PLASMA	25.29 mm	23.71 mm	6.3%	24.50 mm
CORTE POR LÁSER	25.36 mm	25.11 mm	1.0%	25.23 mm

3.5. Definición del programa experimental

3.5.1. Introducción

En este apartado se describe el programa experimental de fatiga realizado. El proceso tiene por objeto dos objetivos diferenciados:

1. Evaluar la influencia del método de corte térmico (oxicorte, corte por plasma y corte por láser) en la vida a fatiga de aceros estructurales en presencia de agujeros.
2. Definir las curvas S-N a fatiga para agujeros cortados térmicamente.

A continuación se detalla el diseño de las probetas, los parámetros experimentales seleccionados y la realización de los ensayos.

3.5.2. Diseño de las probetas

Debido a que el objetivo de este estudio es el desarrollo de curvas S-N en aceros con agujeros circulares, se han utilizado probetas con agujero. Estas probetas son las utilizadas para simular los cortes circulares que se realizan previamente a la unión atornillada entre distintos componentes de una estructura.

Las probetas diseñadas se basan en las del proyecto europeo COLDFOS [48]. Se caracterizan por:

- Sección rectangular y constante en toda su longitud.
- La presencia de un agujero centrado en la sección de la misma.
- El diámetro del orificio es igual al espesor de la chapa.
- El ancho de la sección es tres veces el diámetro del orificio.

Considerando estas relaciones geométricas y teniendo en cuenta que se dispone de dos espesores de chapa diferentes, 15 mm y 25 mm, las dimensiones de las probetas empleadas para cada uno de ellos son diferentes. En las figuras 3.13 y 3.14 se representan los esquemas de las probetas extraídas de las chapas de 15 mm y 25 mm, respectivamente.

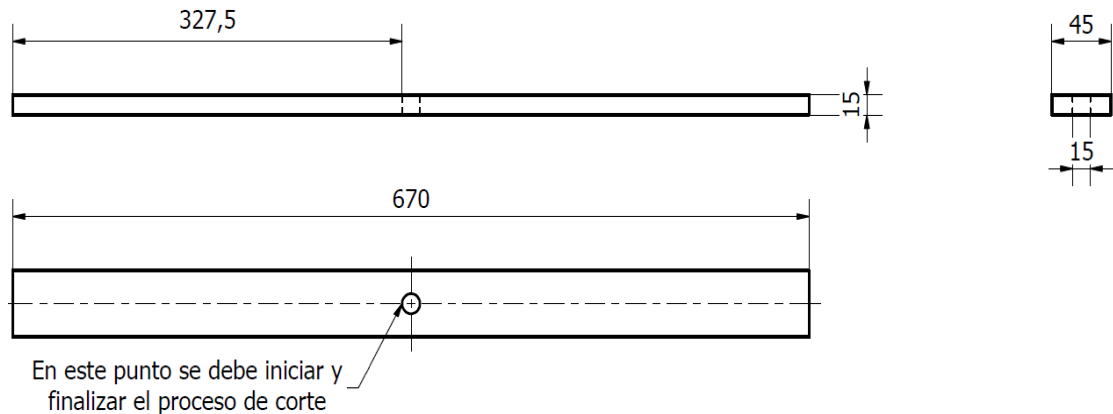


Figura 3.13 – Geometría de la probeta con agujero y espesor 15 mm. Dimensiones en mm.

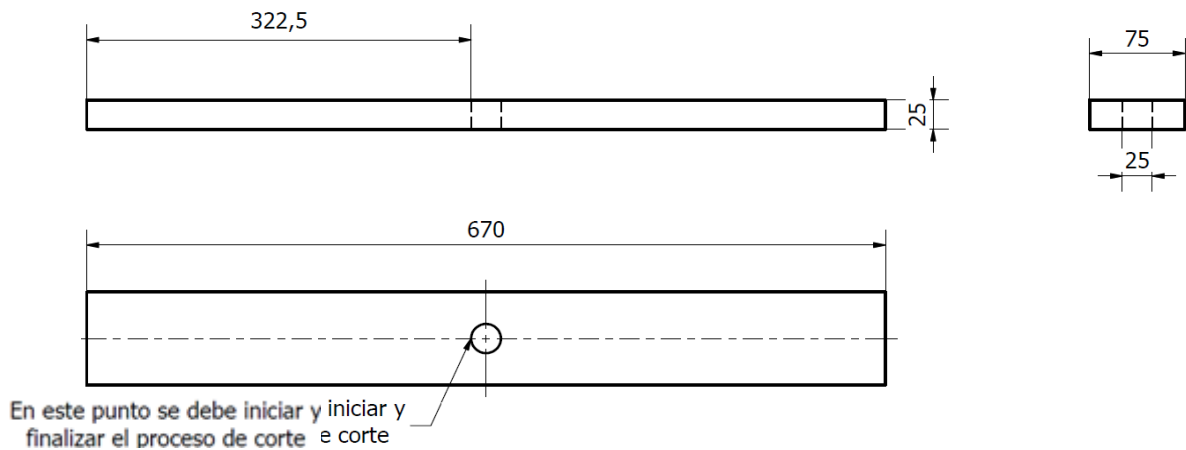


Figura 3.14 – Geometría de la probeta con agujero y espesor 25 mm. Dimensiones en mm.

3.5.3. Parámetros de corte

A continuación se describen las máquinas empleadas y los parámetros escogidos.

3.5.3.1. Oxicorte o corte por llama

Las probetas obtenidas mediante oxicorte se han fabricado en la empresa TIRSO CSA (Santander, España). En la Figura 3.15 se muestra el proceso de fabricación por oxicorte de las probetas de fatiga empleadas, mientras que en la Tabla 3.8 se muestran los parámetros de corte empleados.



Figura 3.15– Proceso de fabricación de las probetas de fatiga por oxicorte.

Tabla 3.8 – Parámetros de corte empleados.

PARÁMETRO		ESPESOR DE LA CHAPA	
		15 mm	25 mm
Velocidad de corte (mm/min)		400 - 450	350 - 400
Diámetro de la antorcha (mm)		1	1.5
Flujo de propano (l/min)		6	8
Flujo de oxígeno (l/min)	Precalentamiento	20	25
	Corte	35 - 40	65 - 70

3.5.3.2. Corte por plasma

Las probetas cortadas por plasma han sido fabricadas por la empresa ZKS ŁABĘDY (Gliwice, Polonia). En la Figura 3.16 se observa la máquina de corte por plasma empleada. Los parámetros de corte se recogen en la Tabla 3.9.



Figura 3.16 – Vista de la mesa de corte por plasma utilizada.

Tabla 3.9 – Parámetros de corte por plasma empleados.

PARÁMETRO		ESPESOR DE LA CHAPA	
		15 mm	25 mm
Corriente de arco (A)		200	200
Voltaje del arco (V)		131	143
Velocidad de corte (mm/min)		2200	1100
Separación entre pieza y antorcha (mm)		4.1	5.1
Flujo de gas plasma Oxígeno (l/min)	Inicio del arco	24	24
	Corte	69	69
Flujo de gas auxiliar Aire (l/min)	Inicio del arco	65	65
	Corte	28	28
Tiempo inicial de perforación (s)		0.6	1
Separación entre pieza y antorcha durante la perforación inicial (mm)		8.2	10.2

3.5.3.3. Corte por láser

En la Figura 3.17 se muestra un ejemplo del esquema de ambas máquinas. Como se puede comprobar, todas las operaciones de corte por láser tienen lugar en el interior de un recinto de seguridad.

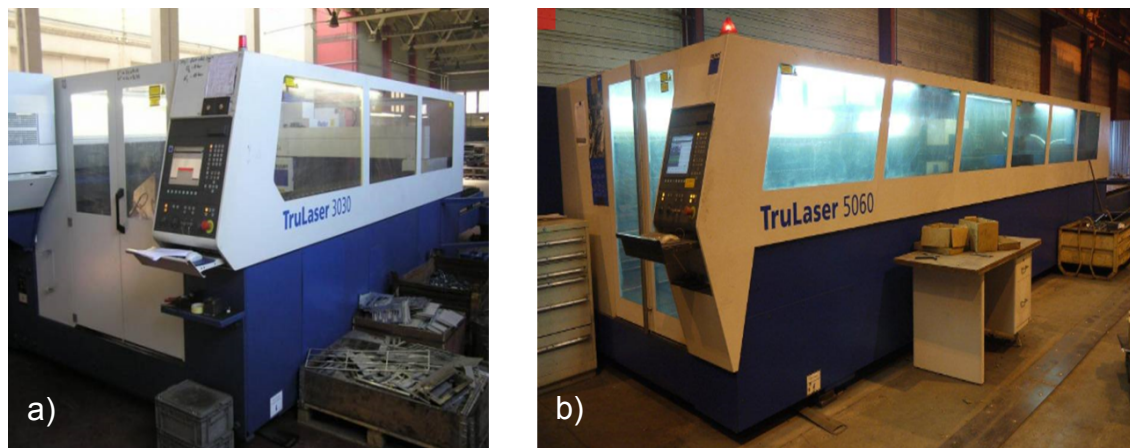


Figura 3.17 – a) Máquina de corte por láser TRUMPF TruLaser 3030 (L20).
b) Máquina de corte por láser TRUMPF TruLaser 5060 (L19) CoolLine.

Tabla 3.10 – Parámetros de corte por láser empleados.

PARÁMETRO	ESPESOR DE LA CHAPA	
	15 mm ⁽¹⁾	25 mm ⁽²⁾
Potencia del haz láser (W)	3600	5600
Velocidad de corte (mm/min)	1000	900
Diámetro del foco (mm)	0.2	0.63
Posición del foco	En la superficie de la chapa	
Presión del gas auxiliar Oxígeno (bar)	0.6	0.6

⁽¹⁾ Parámetros de corte correspondientes a la máquina TRUMPF TruLaser 3030 (L20).

⁽²⁾ Parámetros de corte correspondientes a la máquina TRUMPF TruLaser 5060 (L19) CoolLine.

Siendo la velocidad de corte uno de los parámetros que suponen una ventaja a la hora de emplear el corte por plasma y láser frente al oxicorte, en la Figura 3.18 se comparan las velocidades obtenidas en función del método de corte y espesor de la chapa de acero al carbono.

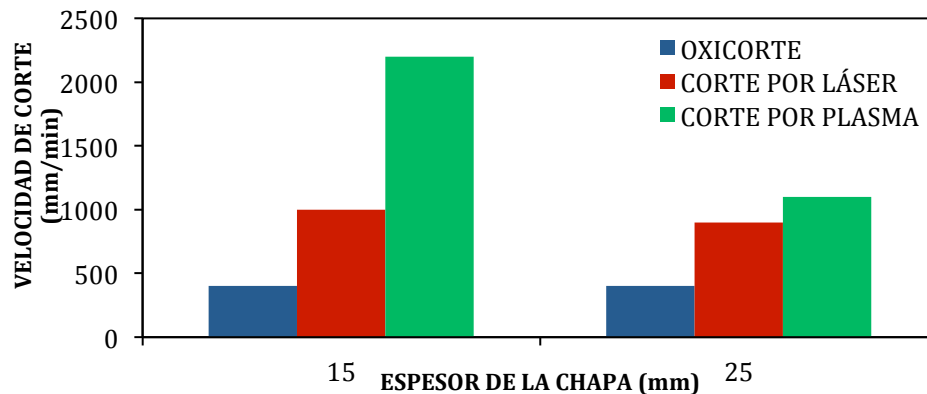


Figura 3.18 – Comparativa entre las velocidades de corte obtenidas con los tres métodos de corte térmico y en los dos espesores considerados.

3.5.4. Definición de los parámetros en los ensayos de fatiga

Para poder evaluar la influencia de bordes rectos y agujeros cortados térmicamente en la vida a fatiga de aceros estructurales, y para poder comparar los resultados experimentales con los valores de diseño a fatiga propuestos por los códigos, se ha considerado la obtención de la curva S-N correspondiente a cada combinación de:

- Tipología de acero (355M, S460M, S690Q y S890Q).
- Espesor (15 mm y 25 mm).
- Método de corte térmico (oxicorte, corte por plasma y corte por láser).

La Tabla 3.11 representa la matriz de ensayos a fatiga considerados.

Tabla 3.11 – Matriz de ensayos a fatiga.

ACERO	ESPESOR			
	15 mm		25 mm	
S355M	Agujero	Oxicorte		
		Corte por Plasma		
		Corte por Laser		
S460M	Agujero	Oxicorte	Agujero	Oxicorte
		Corte por Plasma		Corte por Plasma
		Corte por Laser		Corte por Laser
S690Q	Agujero	Oxicorte		
		Corte por Plasma		
		Corte por Laser		
S890Q	Agujero	Oxicorte		
		Corte por Plasma		
		Corte por Laser		

Para la obtención de cada una de las curvas S-N se han definido previamente los siguientes parámetros:

- Número de probetas.
- Relación de tensiones (R).
- Límite de fatiga.
- Rangos de tensiones.

3.5.4.1. Número de probetas.

Considerando n como el número de ensayos necesarios para obtener cada curva S-N y teniendo en cuenta el número las mismas que se ha contemplado (15), el conjunto total de ensayos que componen el programa experimental es de $15n$. A la hora de determinar el número de ensayos necesarios para definir cada curva S-N se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Las recomendaciones establecidas por las distintas normativas sobre el número mínimo de ensayos a fatiga necesarios para obtener una curva S-N, detalladas más adelante.
- El hecho de que aumentar en una unidad el número de ensayos utilizados para cada curva S-N supone incrementar en 15 el número total de ensayos que componen el conjunto del programa experimental.

Como primer orden de magnitud sobre el número de probetas a adoptar para cada curva S-N se ha considerado el rango propuesto por la normativa ASTM E739 [33], en la cual se recomienda un mínimo de 6 a 12 probetas en la investigación y desarrollo de nuevos componentes. Así mismo, la citada normativa establece un porcentaje de réplica mínimo del 33% o 50%, definiéndose el porcentaje de réplica como uno menos el cociente entre el número de niveles de carga y el número de ensayos (en tanto por cien).

En concordancia con lo definido por la ASTM E739 [33], la normativa de ensayos de fatiga BS ISO 12107 [34] propone la obtención de la curva S-N con un mínimo de 8 probetas en investigaciones preliminares, las cuales se distribuirán en 4 niveles de tensión igualmente espaciados, realizando, por tanto, 2 ensayos en cada uno de los niveles. De la misma manera, la normativa británica de diseño de componentes a fatiga BS7608 [28] recomienda ensayar no menos de 8 probetas representativas del detalle estructural considerado.

Tomando como referencia estas tres normativas de fatiga, se han considerado 8 ensayos para la determinación del tramo inclinado de cada curva S-N, estando distribuidos en 4 niveles de carga y obteniendo así un porcentaje de réplica del 50%.

En lo referente a la obtención del límite de fatiga o endurancia, que define la ordenada del tramo horizontal recto de la curva S-N, la normativa BS ISO 12107 [34] es la única que recomienda un número mínimo de ensayos (n_2), el cual, como se recoge en la ecuación 3.1, está relacionado a su vez con el número de ensayos (n_1) y los niveles de carga (l) empleados en el tramo inclinado de la curva S-N.

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{l + 1}{2l - 1} \quad (3.1)$$

Habiendo seleccionado previamente valores de n_1 y l igual a 8 probetas y 4 niveles de carga, respectivamente, el número de probetas (n_2) que resultaría de aplicar la ecuación 3.1 sería 6. Ello supondría 14 ensayos por curva S-N y un total de 210. Evaluando el número de horas de ensayo y la disponibilidad de la máquina que ello supondría, se ha optado por bajar a 2 el número de probetas destinadas a determinar el límite de fatiga, consiguiendo así reducir en 60 el número de probetas del programa experimental.

Por lo tanto, cada una de las 15 curvas S-N ha sido estimada en base a 10 probetas, 8 destinadas a definir el tramo inclinado de la curva y 2 empleadas para determinar el límite de fatiga. De esta manera, el programa experimental está constituido por un total de 150 ensayos de fatiga.

3.5.4.2. Relación de tensiones

La relación de tensiones (R) se define como el cociente entre las tensiones mínima (σ_{min}) y máxima (σ_{max}) de un ciclo de carga. La elección del valor de R condiciona los resultados de fatiga obtenidos, ya que provoca una variación de la curva S-N resultante. Teniendo en cuenta que, cuanto mayor es la tensión media (σ_{med}), menor es la vida a fatiga, la modificación de la curva S-N en función de R es debida a la relación existente entre σ_{med} y dicho parámetro. Considerando un valor del rango de tensiones (S) constante, la obtención de la expresión que relaciona σ_{med} y R se desarrolla en las ecuaciones 3.2 a 3.5.

$$S = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max} - R \cdot \sigma_{max} = (1 - R) \cdot \sigma_{max} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1}{(1 - R)} \cdot S \quad (3.3)$$

$$\sigma_{min} = \frac{R}{(1 - R)} \cdot S \quad (3.4)$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{(1 + R)}{2 \cdot (1 - R)} \cdot S \quad (3.5)$$

Variando el valor de R en el intervalo definido por $-1 \leq R < 1$, se observa que, cuanto mayor es el R adoptado, más alta es la tensión media. En consecuencia, mayores son las tensiones disponibles para la apertura de las micro y macro fisuras, y por lo tanto la vida a fatiga es inferior.

Un valor de $R=0.1$ supone una solución de compromiso que incluye los estados de carga a los que están sometidos tanto los puentes como los componentes de la maquinaria de construcción, siendo $R=0.5$ una consideración excesivamente conservadora para estos casos. De esta forma, los ensayos aquí utilizados para la definición de las curvas S-N se han obtenido todos con un valor de $R=0.1$.

3.5.4.3. Límite de fatiga

En la práctica, se considera que un componente sometido a cargas cíclicas con un rango de tensiones constante presenta una vida infinita si la rotura no ha tenido lugar una vez transcurrido un número determinado de ciclos. El valor del número de ciclos adoptado varía en función de la referencia bibliográfica consultada. Gurney y Maddox afirman que para probetas con superficies lisas, sin evidentes concentradores de tensiones, el número de ciclos se sitúa en torno a $2 \cdot 10^6$ ciclos, mientras que para componentes entallados, un valor de 10^7 ciclos es el comúnmente elegido. Las normativas de diseño de componentes a fatiga consideran un número de ciclos no inferior a $5 \cdot 10^6$ ciclos, siendo lo más habitual 10^7 ciclos.

Teniendo en cuenta estos valores de referencia, el número de ciclos escogido depende generalmente de aspectos económicos, ya que los ensayos empleados para definir el límite de fatiga llevan asociados un gran consumo de tiempo.

En este trabajo, el límite de fatiga elegido se corresponde con 10^7 ciclos, ya que de esta manera se asegura el cumplimiento de todas las normativas de diseño de componentes a fatiga.

Finalmente, se ha considerado como criterio para definir un rango de tensiones como límite de fatiga cuando al menos dos probetas sometidas a dicho rango no han roto por fatiga tras la aplicación de 10^7 ciclos., sin rotura de una tercera probeta.

3.5.4.4. Rangos de tensiones

Dado que se está evaluando el comportamiento en la región denominada como fatiga de alto número de ciclos (HCF, *high cycle fatigue*), se ha definido que la tensión neta máxima de los rangos de tensiones aplicados no supere el valor del límite elástico del material. Más estrictas son incluso las restricciones definidas por la normativa BS7608 a este respecto, que limita la aplicación de las curvas S-N a aquellos casos en los que la tensión neta máxima no supere el 60% del límite elástico en condiciones normales y el 80% en condiciones extremas.

3.5.5. Realización de los ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga han sido realizados en una máquina de ensayos de alta frecuencia Zwick Roell Amsler 400 HFP 5100. Su principal característica es la frecuencia a la que se aplican las cargas, la cual se corresponde con la frecuencia de resonancia de la probeta. Por lo general, esta frecuencia es muy superior a la que se podría alcanzar en una máquina de ensayos servohidráulica convencional, permitiendo así una reducción muy importante de la duración de los ensayos. El valor de dicha frecuencia depende principalmente de la geometría de la probeta y del material en el que está fabricada, y ligeramente de las cargas seleccionadas. En

las probetas con agujero, la frecuencia oscila alrededor de los 79 Hz y 101 Hz para los espesores de 15 mm y 25 mm, respectivamente.

En la Figura 3.19 se muestra un esquema del montaje experimental de una probeta.

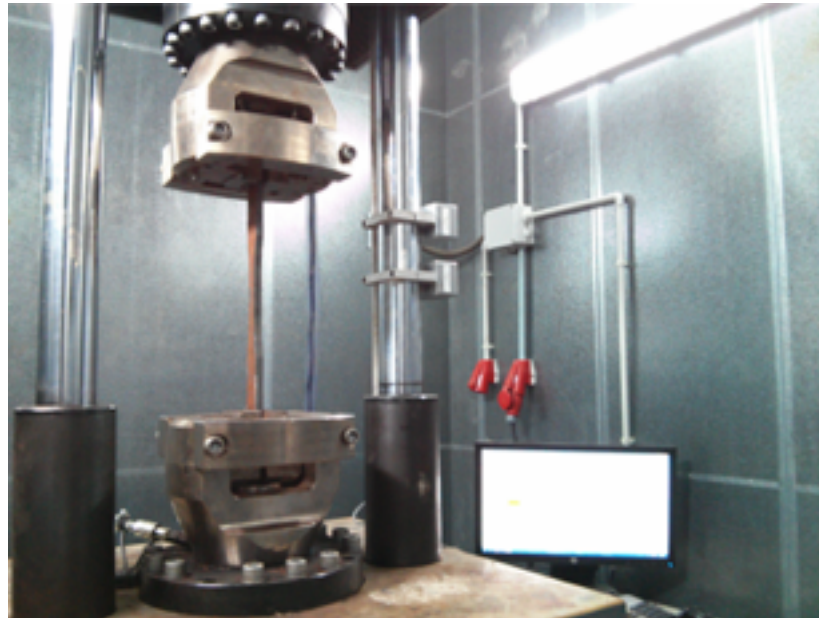


Figura 3.19 – Montaje experimental de los ensayos de fatiga.

En primer lugar, los extremos de la probeta se introducen en ambas mordazas de tal manera que el orificio central se sitúe equidistante de ambos elementos de sujeción.

Como se puede observar en la Figura 3.20, la configuración de las mordazas no garantiza que, en el plano de la probeta, el eje de la misma este alineado con la dirección de aplicación de las cargas. Sin embargo, una desviación en la aplicación de la carga podría provocar una distribución no uniforme de las tensiones en la sección de la probeta, alterando así las condiciones de ensayo inicialmente definidas. Por esta razón, antes de fijar la probeta en su posición definitiva, se ha comprobado la verticalidad de la misma mediante un nivel digital Mitutoyo Pro 3600, habiéndose admitido una desviación máxima de un grado.

Una vez colocada la probeta se procede a la fijación de las mordazas. Conviene señalar que durante esta operación se introduce un esfuerzo de compresión en la probeta. Por ello, se ha tomado la precaución de aplicar una ligera precarga que compense los esfuerzos de compresión generados hasta la fijación completa de la probeta. Gracias a la longitud de amarre con la que se ha dotado a las probetas y la aplicación de una presión de 250-300 bar en las mordazas se ha garantizado la ausencia de deslizamiento de ninguna probeta durante la ejecución de los ensayos.

Finalmente, una vez fijada la probeta, la máquina aplica la carga mediante la acción de un husillo, accionado por corriente eléctrica, provocando el ascenso de los bastidores laterales, y con ellos la mordaza superior. Tras alcanzar la carga media, el sistema de resonancia de la máquina inicia el ciclo carga con el rango previamente definido y a la frecuencia de resonancia de la probeta.

4. Resultados y experimentales

4.1. Introducción

En este capítulo se recogen los resultados del programa experimental. Se incluyen los valores obtenidos en los ensayos de fatiga (variación tensional vs ciclos hasta rotura), explicando el proceso de ajuste realizado y la distribución de los ensayos realizados para cada combinación de acero y técnica de corte.

4.2. Resultados de las probetas ensayadas

Por cada procedimiento de corte se han realizado 10 ensayos, siendo todos ellos válidos. La distribución de los mismos en el oxicorte y corte por láser cumple con el criterio inicialmente considerado, 8 ensayos para la estimación de los parámetros de la curva S-N y 2 para la determinación del límite de fatiga. En el caso del corte por plasma se disponen 6 ensayos en el tramo inclinado de la curva S-N. Esto es debido a que, además de los 2 ensayos utilizados para obtener el límite de fatiga, 2 probetas no rompieron con un rango de tensiones (210 MPa) para el cual también se ha producido la rotura de una probeta (3-15-A-P-6).

Los ensayos realizados se distribuyen en todo el rango de ciclos en el que domina la fatiga de alto número de ciclos. De hecho, en el ensayo 3-15-A-L-1 se ha obtenido un número de ciclos hasta rotura ligeramente inferior a 10^4 . Así mismo, los tres procesos de corte presentan un porcentaje de réplica superior al demandado por [49] (33%), siendo del 50%, 33% y 38% para el oxicorte, corte por plasma y corte por láser, respectivamente.

4.2.1. Acero S355M y 15 mm de espesor

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se adjuntan los resultados obtenidos en las probetas del acero S355M con agujero, con espesor de 15 mm y obtenido por oxicorte, corte por plasma y corte por láser.

Tabla 4.1 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S355M, espesor 15 mm y oxicorte. Variación tensional (S) vs N° ciclos hasta rotura.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	N° Ciclos
3-15-A-O-1	419.37	75.00	98.31	109.23	48787
3-15-A-O-2	419.37	75.00	98.31	109.23	75703
3-15-A-O-3	335.50	60.00	78.65	87.38	130708
3-15-A-O-4	335.50	60.00	78.65	87.38	110825
3-15-A-O-5	251.62	45.00	58.98	65.54	330115
3-15-A-O-6	251.62	45.00	58.98	65.54	421615
3-15-A-O-7	209.68	37.50	49.15	54.61	624102
3-15-A-O-8	209.68	37.50	49.15	54.61	901885
3-15-A-O-9	167.75	30.00	39.32	43.69	10000000
3-15-A-O-10	167.75	30.00	39.32	43.69	10000000

Tabla 4.2 – Resultados experimentales de las probetas con agujero (plasma), acero S355M, espesor 15 mm. Variación tensional (S) vs N° ciclos hasta rotura.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	N° Ciclos
3-15-A-P-1	335.50	60.00	78.65	87.38	31418
3-15-A-P-2	335.50	60.00	78.65	87.38	33647
3-15-A-P-3	293.56	52.50	68.81	76.46	50753
3-15-A-P-4	251.62	45.00	58.98	65.54	156542
3-15-A-P-5	251.62	45.00	58.98	65.54	104027
3-15-A-P-6	209.68	37.50	49.15	54.61	271549
3-15-A-P-7	209.68	37.50	49.15	54.61	10000000
3-15-A-P-8	209.68	37.50	49.15	54.61	10000000
3-15-A-P-9	167.75	30.00	39.32	43.69	10000000
3-15-A-P-10	167.75	30.00	39.32	43.69	10000000

Tabla 4.3 – Resultados experimentales de las probetas con agujero (láser), acero S355M, espesor 15 mm. Variación tensional (S) vs N° ciclos hasta rotura.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	N° Ciclos
3-15-A-L-1	419.38	75.00	98.31	109.23	8653
3-15-A-L-2	335.50	60.00	78.65	87.38	26690
3-15-A-L-3	335.50	60.00	78.65	87.38	27515
3-15-A-L-4	251.63	45.00	58.98	65.54	102678
3-15-A-L-5	251.63	45.00	58.98	65.54	79720
3-15-A-L-6	167.75	30.00	39.32	43.69	328408
3-15-A-L-7	167.75	30.00	39.32	43.69	403191
3-15-A-L-8	125.81	22.50	29.49	32.77	2265650
3-15-A-L-9	83.87	15.00	19.66	21.85	10000000
3-15-A-L-10	83.87	15.00	19.66	21.85	10000000

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran los resultados gráficamente junto con los correspondientes ajustes estadísticos (ver Tabla 4.4).

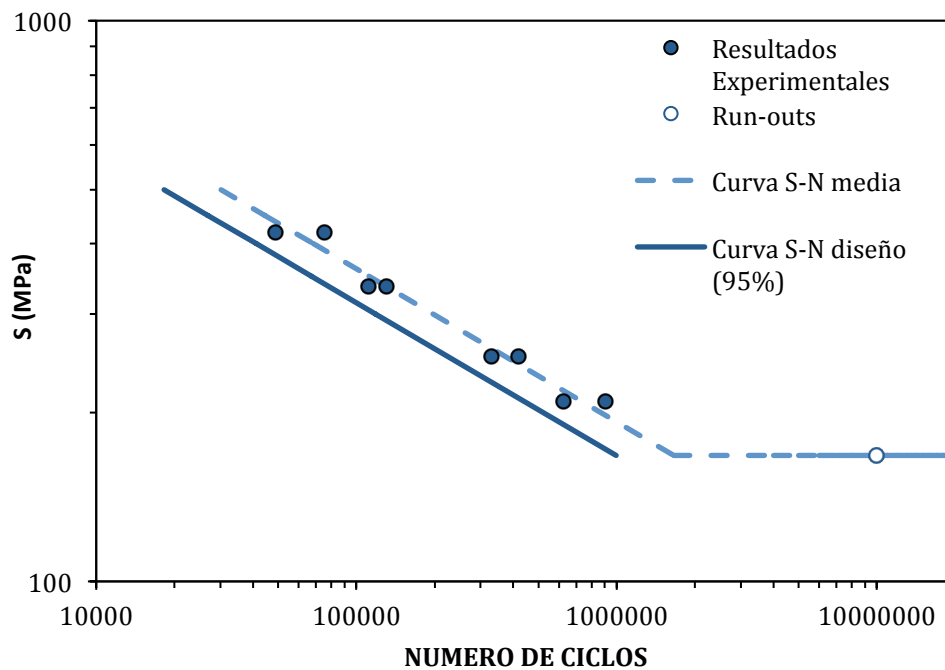


Figura 4.1 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S355M, oxicorte y espesor 15 mm.

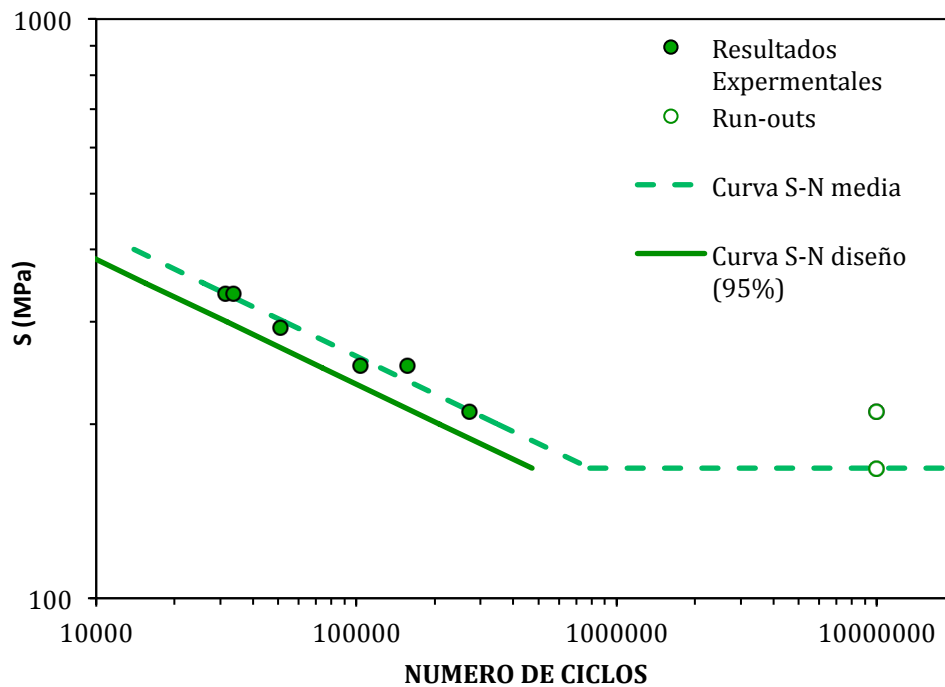


Figura 4.2 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S355M, corte por plasma y espesor 15 mm.

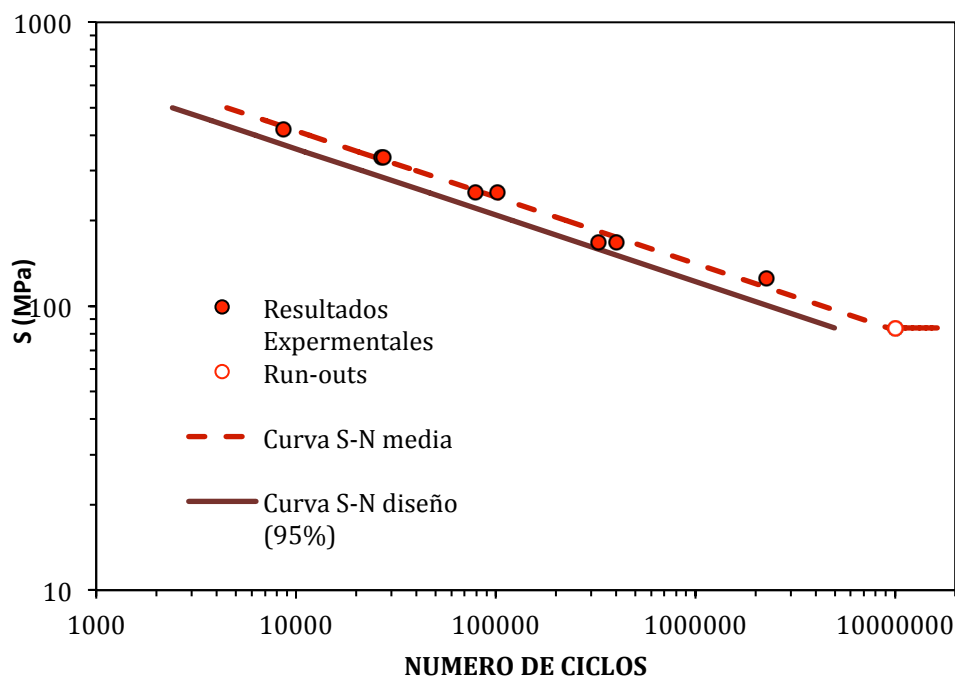


Figura 4.3 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S355M, corte por láser y espesor 15 mm.

Tabla 4.4 – Parámetros estimados a partir de los resultados experimentales para la combinación agujero, acero S355M, espesor 15 mm y los tres métodos de corte.

PARÁMETRO	OXICORTE	CORTE POR PLASMA	CORTE POR LÁSER
m	3.665	4.645	4.274
logA	14.371	16.232	15.189
logA'	14.151	16.009	14.919
R	0.99	0.99	0.99
CAFL	167.75 MPa	167.75 MPa	83.88 MPa
S _{umbral}	41.93 MPa	41.93 MPa	41.93 MPa

La dispersión de los resultados experimentales es muy reducida. De hecho, el valor del parámetro R' utilizado para medir la calidad del ajuste es prácticamente igual a la unidad.

Finalmente, el límite de fatiga ha quedado definido en los tres procesos de corte mediante dos probetas que no han fallado por fatiga una vez transcurridos 10 millones (*run-outs*). En el caso del corte por plasma, esta situación se ha producido para dos rangos de tensiones diferentes (167.75 MPa y 209.68 MPa), sin embargo en la mayor de ellas también ha tenido lugar la rotura de una probeta, por lo que se ha adoptado 167.75 MPa como límite de fatiga del corte por plasma. Conviene añadir que el S_{umbral} es idéntico para los tres métodos de corte.

4.2.2. Acero S460M y 15 mm de espesor

Por cada procedimiento de corte se han completado un total de 10 ensayos. Se ha procurado seguir la distribución inicialmente considerada respecto al reparto de los mismos entre la parte inclinada de la curva S-N y el límite de fatiga. Sin embargo, el cumplimiento estricto de dicho reparto solo ha sido posible en el oxicorte. En el corte por plasma 2 probetas no han roto para un nivel tensional superior al límite de fatiga (4-15-A-P-7 y 4-15-A-P-8), y una en el caso del corte por láser (4-15-A-L-8).

Los ensayos realizados abarcan un amplio rango de ciclos incluidos en la fatiga de alto número de ciclos. Así mismo, la tensión neta máxima aplicada durante los ensayos está por debajo del límite elástico del material. Como se había observado en el acero S355M, la dispersión de los resultados es muy reducida, permitiendo llevar a cabo un ajuste de la curva S-N con elevada precisión.

En las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se adjuntan los resultados obtenidos en las probetas con agujero de acero S460M, con espesor de 15 mm y obtenidas por oxicorte, corte por plasma y corte por láser. Las gráficas correspondientes se muestran en las Figuras 4.4 a 4.7, con los parámetros de ajuste recogidos en la Tabla 4.8

Tabla 4.5 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 15 mm y oxicorte.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-15-A-O-1	401.24	67.50	82.88	92.09	118349
4-15-A-O-2	356.65	60.00	73.67	81.86	181501
4-15-A-O-3	356.65	60.00	73.67	81.86	168034
4-15-A-O-4	312.07	52.50	64.46	71.63	387287
4-15-A-O-5	267.49	45.00	55.26	61.39	401096
4-15-A-O-6	267.49	45.00	55.26	61.39	521593
4-15-A-O-7	222.91	37.50	46.05	51.16	1467700
4-15-A-O-8	178.32	30.00	36.84	40.93	1966448
4-15-A-O-9	133.74	22.50	27.63	30.70	10000000
4-15-A-O-10	133.74	22.50	27.63	30.70	10000000

Tabla 4.6 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 15 mm y corte por plasma.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-15-A-P-1	445.82	75.00	92.09	102.33	29201
4-15-A-P-2	356.65	60.00	73.67	81.86	75665
4-15-A-P-3	356.65	60.00	73.67	81.86	71750
4-15-A-P-4	267.49	45.00	55.26	61.40	268946
4-15-A-P-5	267.49	45.00	55.26	61.40	216352
4-15-A-P-6	178.32	30.00	36.84	40.93	648790
4-15-A-P-7	178.32	30.00	36.84	40.93	10000000
4-15-A-P-8	178.32	30.00	36.84	40.93	10000000
4-15-A-P-9	133.74	22.50	27.63	30.70	10000000
4-15-A-P-10	133.74	22.50	27.63	30.70	10000000

Tabla 4.7 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 15 mm y corte por láser.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-15-A-L-1	356.65	60.00	73.67	81.86	69685
4-15-A-L-2	356.65	60.00	73.67	81.86	100744
4-15-A-L-3	267.49	45.00	55.26	61.40	222912
4-15-A-L-4	267.49	45.00	55.26	61.40	313119
4-15-A-L-5	178.32	30.00	36.84	40.93	731494
4-15-A-L-6	178.32	30.00	36.84	40.93	1342637
4-15-A-L-7	133.74	22.50	27.63	30.70	4035376
4-15-A-L-8	133.74	22.50	27.63	30.70	10000000
4-15-A-L-9	89.16	15.00	18.42	20.47	10000000
4-15-A-L-10	89.16	15.00	18.42	20.47	10000000

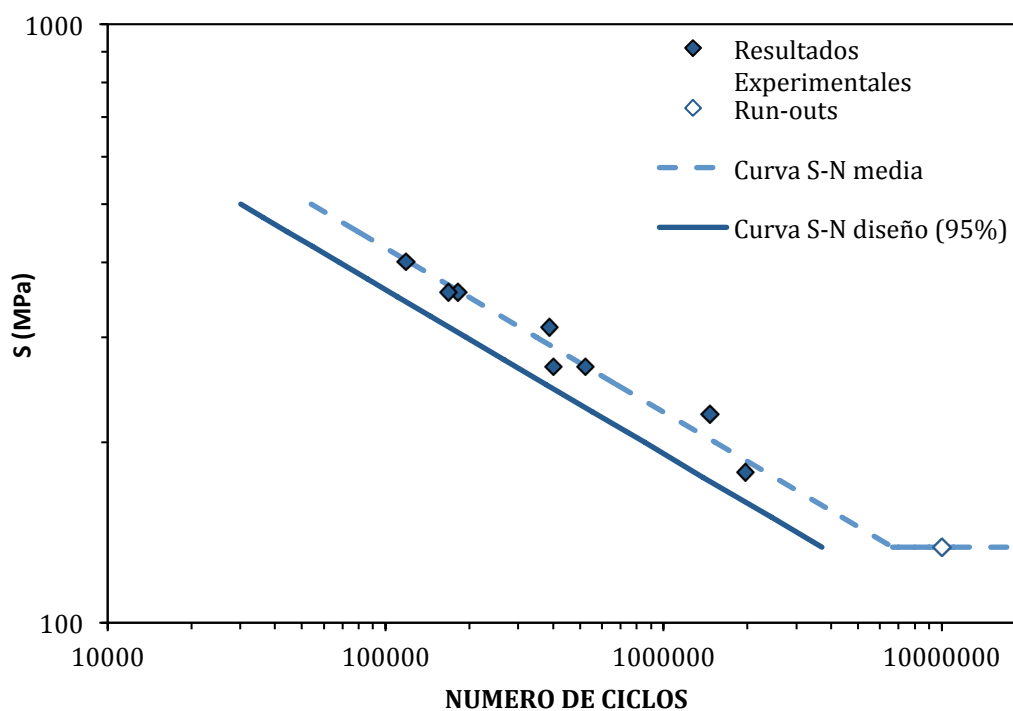


Figura 4.4 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, oxicorte y espesor 15 mm.

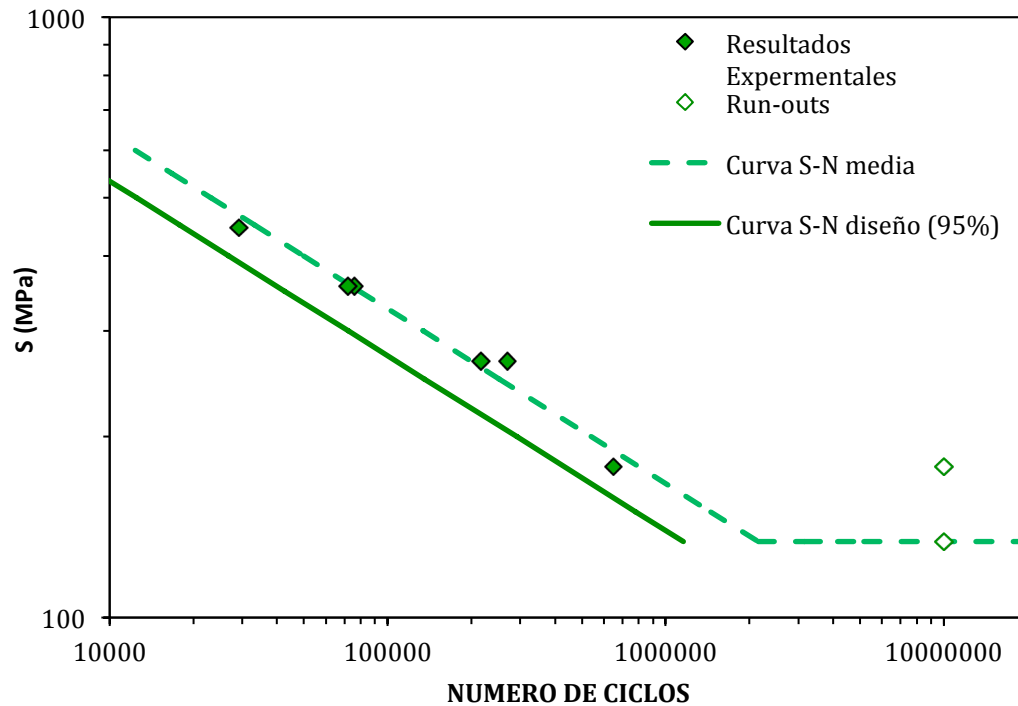


Figura 4.5 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, corte por plasma y espesor 15 mm.

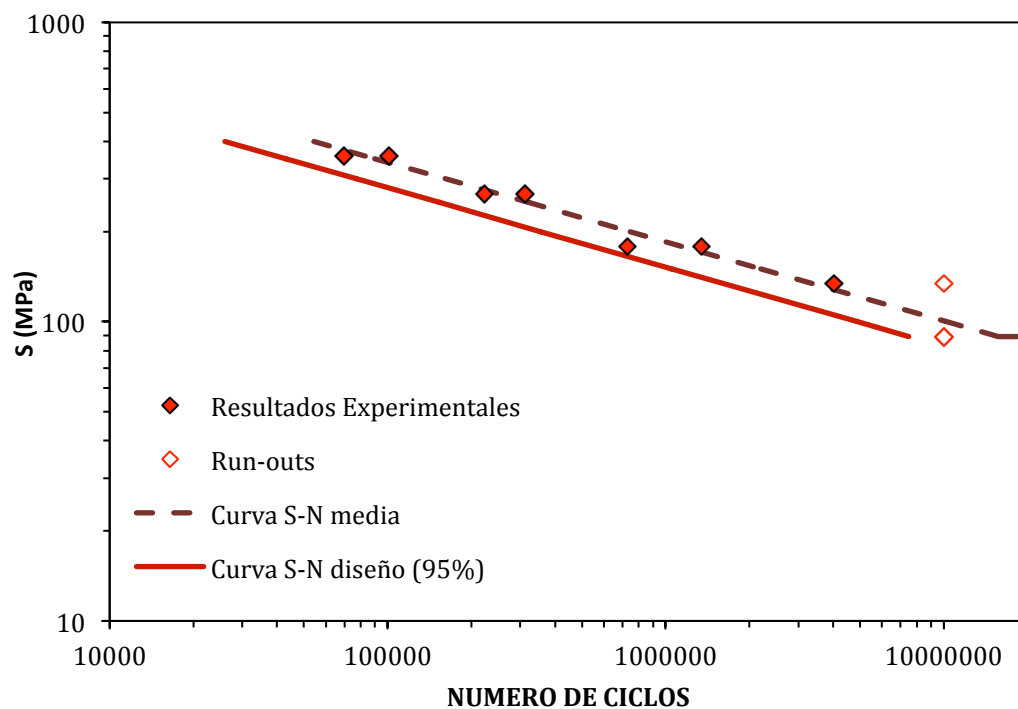


Figura 4.6 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, corte por láser y espesor 15 mm.

Tabla 4.8 – Parámetros estimados a partir de los resultados experimentales para la combinación agujero, acero S460M, espesor 15 mm y los tres métodos de corte.

PARÁMETRO	OXICORTE	CORTE POR PLASMA	CORTE POR LÁSER
m	3.649	3.775	3.544
logA	14.583	14.558	13.989
logA'	14.329	14.238	13.615
R	0.98	0.98	0.97
CAFL	133.74 MPa	133.74 MPa	89.16
S_{umbral}	44.58 MPa	44.58 MPa	44.58 MPa

4.2.3. Acero S460M y 25 mm de espesor

En este caso, el proceso de obtención de los parámetros que definen la curva S-N y el límite de fatiga para cada proceso de corte presenta la particularidad de haberse realizado con 9 probetas. La décima probeta se ha ensayado con un valor de la relación de tensiones ($R=0.5$) diferente al del resto de ensayos ($R=0.1$), para poder evaluar así la posible influencia de este parámetro en la vida a fatiga.

Por ello, dado que las condiciones de ensayo de esta probeta son diferentes, es necesario aclarar que el resultado obtenido con ella no se ha utilizado en el ajuste de la curva S-N.

Los ensayos de fatiga llevados a cabo para los tres procedimientos de corte cubren prácticamente todo el rango de dominio de la fatiga de alto número de ciclos. Así mismo, el porcentaje de réplica es superior al 33% exigido por la normativa [49], siendo del 43% en el oxicorte y en el corte por láser, y del 33% en el corte por plasma.

La dispersión de los resultados experimentales continúa siendo muy reducida, aunque es ligeramente superior a la observada en el resto de ensayos sobre probetas con agujero analizadas hasta el momento. A pesar de ello, la calidad de los ajustes obtenidos es muy elevada, siendo el valor del parámetro R' más bajo el correspondiente al corte por plasma (0.84).

En los tres procedimientos de corte se han utilizado dos probetas para la definición del límite de fatiga (*run-outs*). Finalmente, los valores de S_{umbral} son iguales en los tres casos y muy similares a los obtenidos en el acero S355M y S460M de 15 mm de espesor.

En las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 se adjuntan los resultados obtenidos en las probetas con agujero de acero S460M, con espesor de 25 mm y obtenidas por oxicorte, corte

por plasma y corte por láser. Por su parte, las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 recogen los resultados gráficamente, mientras que en la Tabla 4.12 se recogen los pará

Tabla 4.9 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 25 mm y oxicorte.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-25-A-O-1	268.35	45.00	57.65	64.05	102385
4-25-A-O-2	268.35	45.00	57.65	64.05	126528
4-25-A-O-3	223.63	37.50	48.04	53.38	412201
4-25-A-O-4	223.63	37.50	48.04	53.38	332578
4-25-A-O-5	178.90	30.00	38.43	42.70	1074674
4-25-A-O-6	178.90	30.00	38.43	42.70	1017840
4-25-A-O-7	134.17	22.50	28.82	32.03	1997480
4-25-A-O-8	89.45	15.00	19.22	21.35	10000000
4-25-A-O-9	89.45	15.00	19.22	21.35	10000000
4-25-A-O-10 (R=0.5)	134.17	22.50	28.82	57.65	10000000

Tabla 4.10 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 25 mm y corte por plasma.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-25-A-P-1	223.63	37.50	48.04	53.38	93576
4-25-A-P-2	223.63	37.50	48.04	53.38	187951
4-25-A-P-3	201.25	33.75	43.23	48.04	293322
4-25-A-P-4	178.90	30.00	38.43	42.70	381681
4-25-A-P-5	178.90	30.00	38.43	42.70	318178
4-25-A-P-6	134.17	22.50	28.82	32.03	521823
4-25-A-P-7	134.17	22.50	28.82	32.03	10000000
4-25-A-P-8	89.44	15.00	19.21	21.35	10000000
4-25-A-P-9	89.44	15.00	19.21	21.35	10000000
4-25-A-P-10 (R=0.5)	134.17	22.50	28.82	57.65	1166470

Tabla 4.11 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S460M, espesor 25 mm y corte por láser.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
4-25-A-L-1	223.63	37.50	48.04	53.38	67766
4-25-A-L-2	223.63	37.50	48.04	53.38	91392
4-25-A-L-3	178.90	30.00	38.43	42.70	291899
4-25-A-L-4	178.90	30.00	38.43	42.70	185101
4-25-A-L-5	156.54	26.25	33.63	37.37	205179
4-25-A-L-6	134.17	22.50	28.82	32.03	556238
4-25-A-L-7	134.17	22.50	28.82	32.03	435686
4-25-A-L-8	89.44	15.00	19.21	21.35	1000000
4-25-A-L-9	89.44	15.00	19.21	21.35	1000000
4-25-A-L-10 (R=0.5)	156.54	26.25	33.63	67.26	475259

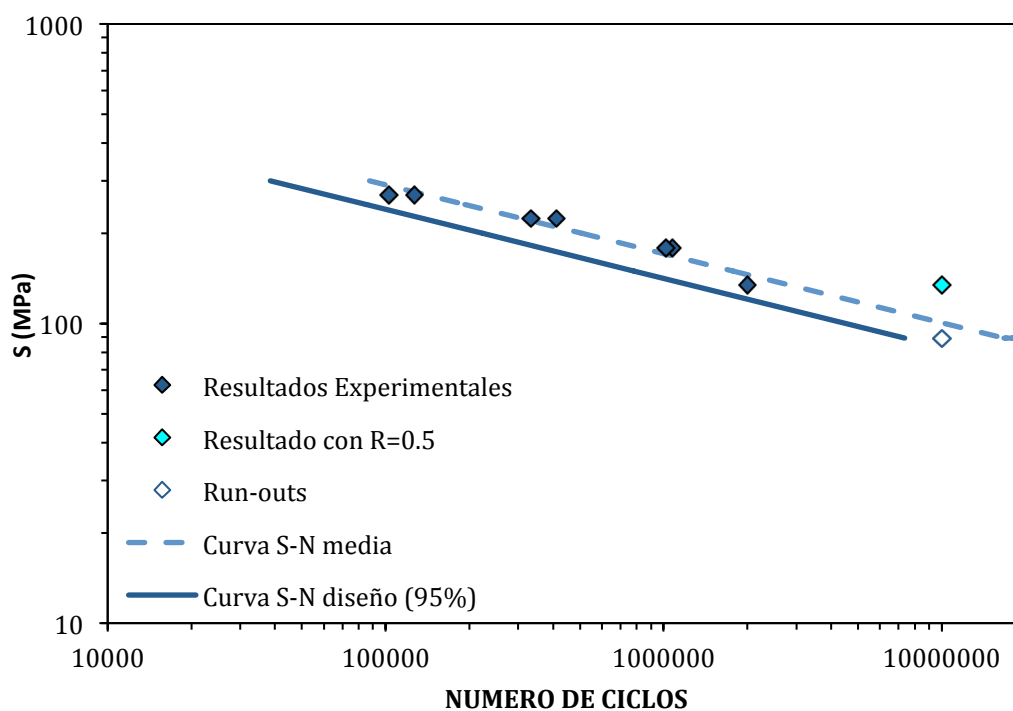


Figura 4.7 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, oxycorte y espesor 25 mm.

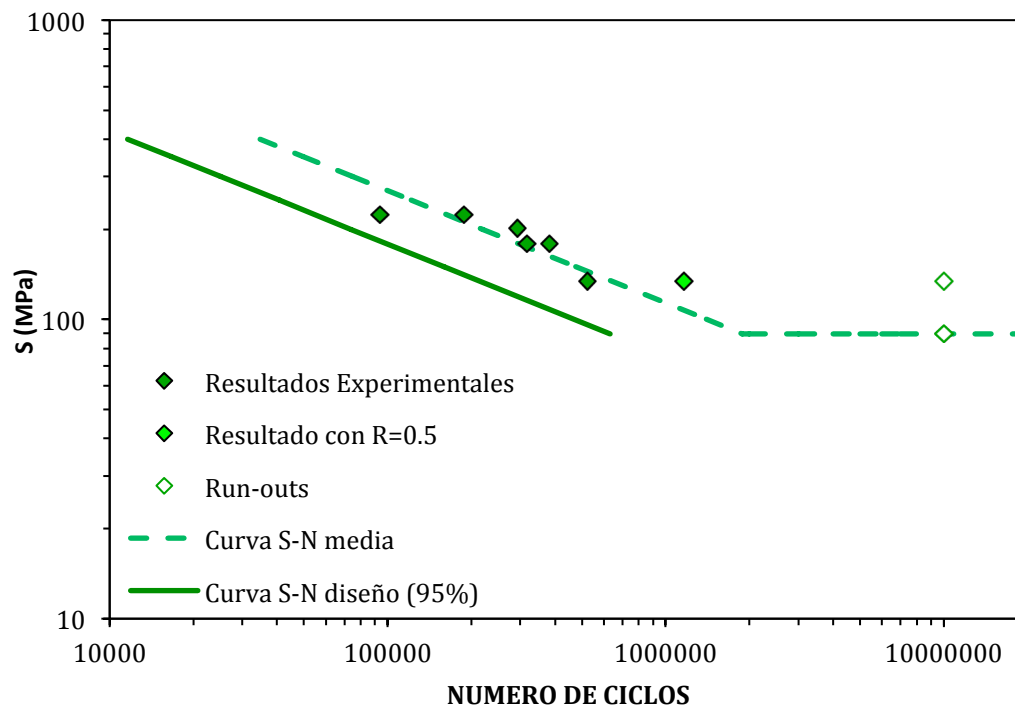


Figura 4.8 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, corte por plasma y espesor 25 mm.

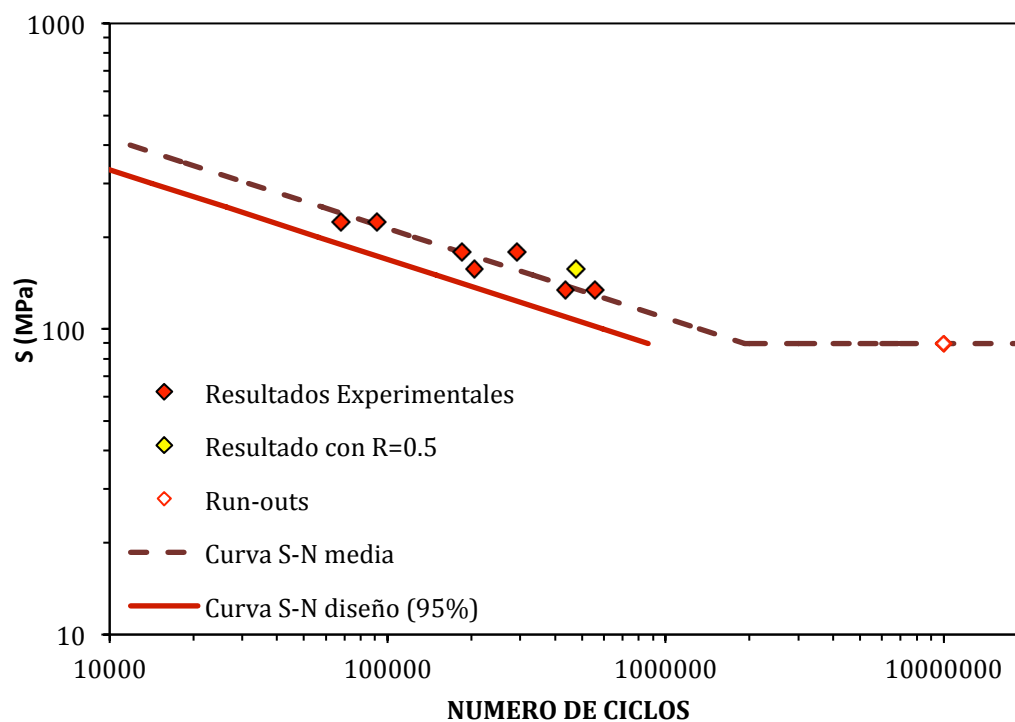


Figura 4.9 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S460M, corte por láser y espesor 25 mm.

Tabla 4.12 – Parámetros estimados a partir de los resultados experimentales para la combinación agujero, acero S460M, espesor 25 mm y los tres métodos de corte.

PARÁMETRO	OXICORTE	CORTE POR PLASMA	CORTE POR LÁSER
m	4.340	2.666	3.398
logA	15.694	11.479	12.917
logA'	15.337	11.004	12.570
R'	0.97	0.84	0.94
CAFL	89.45 MPa	89.45 MPa	89.45 MPa
S _{umbral}	47.72 MPa	47.72 MPa	47.72 MPa

4.2.4. Acero S690Q y 15 mm de espesor

Para cada uno de los tres procedimientos de corte se dispone de 10 ensayos válidos. La estimación de los parámetros de la curva S-N se ha realizado con 8 ensayos en el corte por plasma y láser, y con 7 en el caso del oxicorte. Por lo tanto se cumple el requisito mínimo de 6 ensayos válidos definido por [49].

Se observa en este caso un ligero incremento en la dispersión de los resultados experimentales. Sin embargo, los valores del parámetro R' continúan siendo bastante altos, lo cual permite obtener un ajuste preciso de los parámetros que definen la curva S-N.

Los ensayos realizados se distribuyen en todo el rango de aplicación de la fatiga de alto número de ciclos.

Finalmente, el límite de fatiga se ha determinado en base a dos ensayos que no han fallado tras la aplicación de 10 millones de ciclos (*run-outs*). A diferencia del resto de combinaciones en probetas con agujero, no ha sido posible obtener un valor de S_{umbral} igual para los tres procedimientos de corte. Sin embargo, desde el punto de una comparación cualitativa entre los tres métodos, este hecho no altera las conclusiones obtenidas, ya que si el límite de fatiga del corte por láser hubiese sido obtenido con una precisión similar a la del oxicorte y el corte por plasma, seguiría presentado un valor del límite de fatiga inferior al de estos dos últimos.

En las Tablas 4.13, 4.14 y 4.15 se adjuntan los resultados obtenidos en las probetas con agujero de acero S690Q, con espesor de 15 mm y obtenidas por oxicorte, corte por plasma y corte por láser, mientras que las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 recogen el ajuste correspondiente en cada caso. Los parámetros de ajuste quedan recogidos en la Tabla 4.16.

Tabla 4.13 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S690Q, espesor 15 mm y oxicorte.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
6-15-A-O-1	375.15	45.00	48.33	53.70	92671
6-15-A-O-2	375.15	45.00	48.33	53.70	93884
6-15-A-O-3	312.63	37.50	40.28	44.75	78989
6-15-A-O-4	312.63	37.50	40.28	44.75	242610
6-15-A-O-5	250.10	30.00	32.22	35.80	324727
6-15-A-O-6	250.10	30.00	32.22	35.80	245052
6-15-A-O-7	218.84	26.25	28.19	31.33	1576175
6-15-A-O-8	218.84	26.25	28.19	31.33	10000000
6-15-A-O-9	187.57	22.50	24.17	26.85	10000000
6-15-A-O-10	187.57	22.50	24.17	26.85	10000000

Tabla 4.14 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S690Q, espesor 15 mm y corte por plasma.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
6-15-A-P-1	500.21	60.00	64.44	71.60	22366
6-15-A-P-2	437.68	52.50	56.39	62.65	92518
6-15-A-P-3	437.68	52.50	56.39	62.65	135578
6-15-A-P-4	375.15	45.00	48.33	53.70	102542
6-15-A-P-5	312.63	37.50	40.28	44.75	521110
6-15-A-P-6	312.63	37.50	40.28	44.75	207941
6-15-A-P-7	281.36	33.75	36.25	40.28	342654
6-15-A-P-8	375.15	45.00	48.33	53.70	93329
6-15-A-P-9	250.10	30.00	32.22	35.80	10000000
6-15-A-P-10	250.10	30.00	32.22	35.80	10000000

Tabla 4.15 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S690Q, espesor 15 mm y corte por láser.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
6-15-A-L-1	500.21	60.00	64.44	71.60	34007
6-15-A-L-2	500.21	60.00	64.44	71.60	25525
6-15-A-L-3	375.15	45.00	48.33	53.70	125800
6-15-A-L-4	375.15	45.00	48.33	53.70	42344
6-15-A-L-5	250.10	30.00	32.22	35.80	453285
6-15-A-L-6	250.10	30.00	32.22	35.80	1086746
6-15-A-L-7	218.84	26.25	28.19	31.33	311313
6-15-A-L-8	187.57	22.50	24.17	26.85	2534329
6-15-A-L-9	125.05	15.00	16.11	17.90	10000000
6-15-A-L-10	125.05	15.00	16.11	17.90	10000000

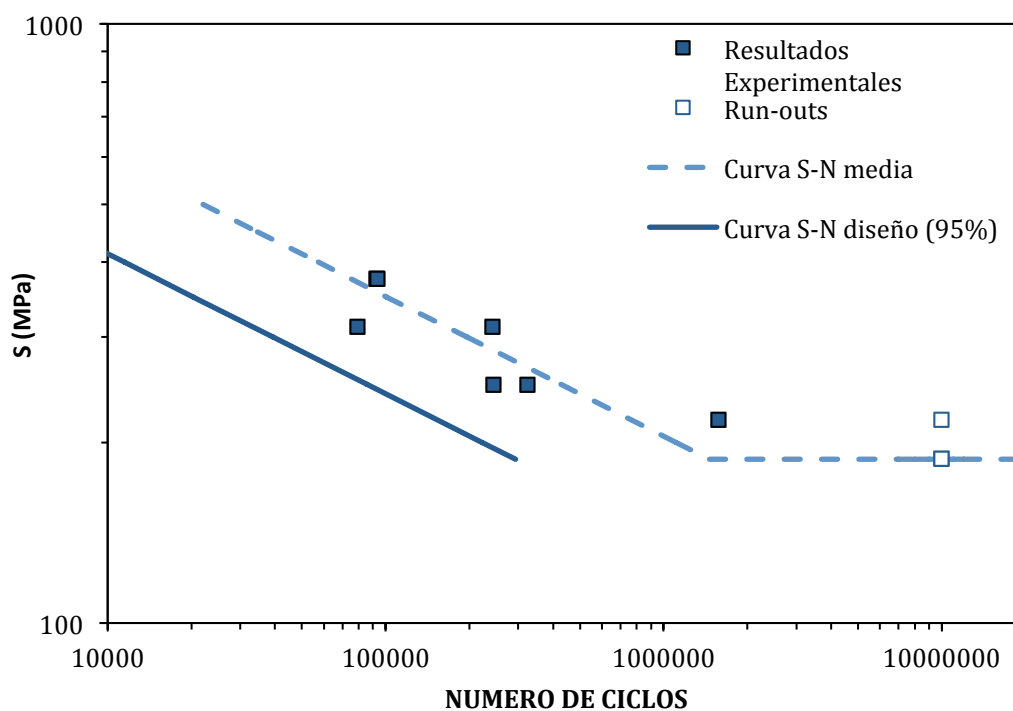


Figura 4.10 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S690Q, oxicorte y espesor 15 mm.

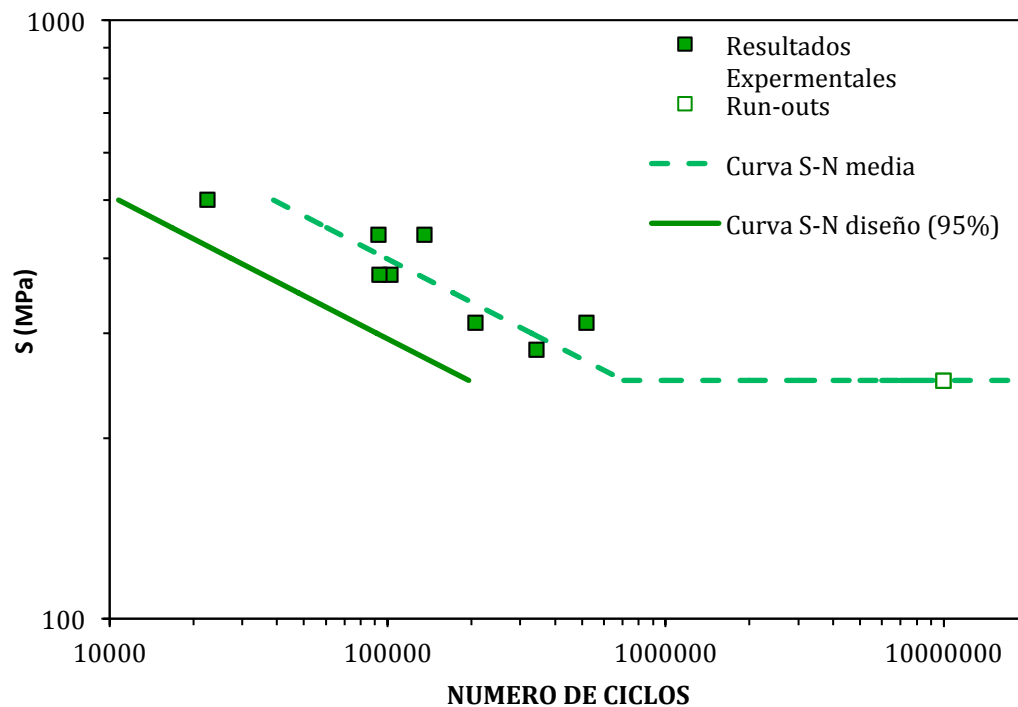


Figura 4.11 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S690Q, corte por plasma y espesor 15 mm.

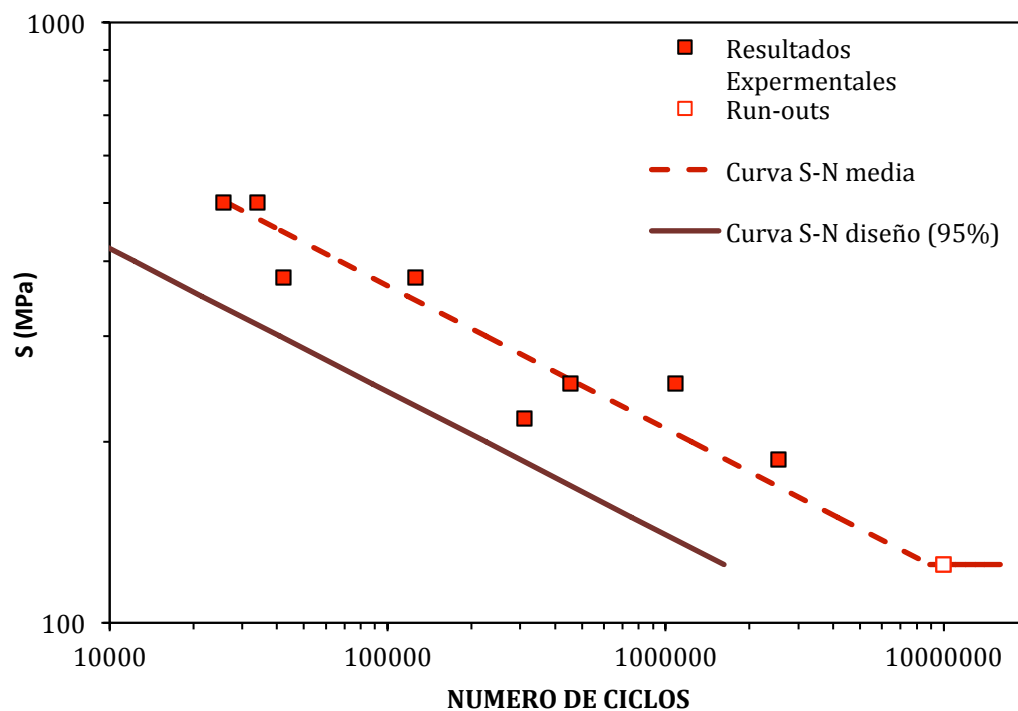


Figura 4.12 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S690Q, corte por láser y espesor 15 mm.

Tabla 4.16 – Parámetros estimados a partir de los resultados experimentales para la combinación agujero, acero S690Q, espesor 15 mm y los tres métodos de corte.

PARÁMETRO	OXICORTE	CORTE POR PLASMA	CORTE POR LÁSER
m	4.277	4.186	4.200
logA	15.888	15.887	15.759
logA'	15.181	15.329	15.018
R	0.86	0.87	0.93
CAFL	187.57 MPa	250.1 MPa	125.05 MPa
S _{umbral}	31.27 MPa	31.27 MPa	62.45 MPa

4.2.5. Acero S890Q y 15 mm de espesor

En el caso del acero S890Q y probetas con agujero también se dispone de 10 ensayos válidos por cada proceso de corte. En el oxicorte se ha cumplido estrictamente la distribución considerada inicialmente de 8 ensayos en la parte inclinada de la curva S-N (dispuestos en 4 intervalos de carga igualmente separados) y 2 correspondientes al límite de fatiga. En el corte por plasma y láser no ha sido posible el cumplimiento de este reparto, ya que en ambos casos una probeta no ha roto al aplicar un rango de tensiones superior al límite de fatiga (*run-out*). En cualquier caso, se han empleado 7 probetas en la estimación de los parámetros del tramo inclinado de la curva S-N, siendo este número superior al mínimo exigido por la normativa [49].

Los ensayos de fatiga llevados a cabo para los tres procedimientos de corte cubren prácticamente todo el rango de dominio de la fatiga de alto número de ciclos. Así mismo, el porcentaje de réplica es del 50%, 43% y 29% en el caso del oxicorte, corte por plasma y láser, respectivamente.

Conviene mencionar que en el caso del oxicorte se han fabricado 3 probetas adicionales. Dado que tanto el tramo inclinado de la curva S-N como el límite de fatiga han sido estimados con precisión a partir de las 10 probetas originalmente disponibles, se ha optado por emplearlas para obtener información adicional sobre la influencia del valor de la relación de tensiones en la vida a fatiga, por lo que se han ensayado con un valor de $R=0.5$ en vez de $R=0.1$. Por ello, es necesario mencionar que no se han combinado con el resto de probetas a la hora de realizar el ajuste de la curva S-N.

Finalmente, el límite de fatiga se ha determinado en base a dos ensayos que no han fallado tras la aplicación de 10 millones de ciclos (*run-outs*). De la misma manera, el valor de S_{umbral} es idéntico para los tres procesos de corte y muy similar al considerado para el resto de combinaciones.

En las tablas 4.17, 4.18 y 4.19 se adjuntan los resultados obtenidos en las probetas con agujero de acero S890Q, con espesor de 15 mm y obtenidas por oxicorte, corte por plasma y corte por láser. Las gráficas y ajustes correspondientes quedan recogidos en las Figuras 4.13, 4.15 y 4.15.

Tabla 4.17 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S890Q, espesor 15 mm y oxicorte.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
8-15-A-O-1	449.57	45.00	47.82	53.13	55139
8-15-A-O-2	449.57	45.00	47.82	53.13	52851
8-15-A-O-3	299.71	30.00	31.88	35.42	200381
8-15-A-O-4	299.71	30.00	31.88	35.42	144525
8-15-A-O-5	224.78	22.50	23.91	26.56	400132
8-15-A-O-6	224.78	22.50	23.91	26.56	469250
8-15-A-O-7	187.32	18.75	19.92	22.14	1493847
8-15-A-O-8	187.32	18.75	19.92	22.14	997437
8-15-A-O-9	149.85	15.00	15.94	17.71	10000000
8-15-A-O-10	149.85	15.00	15.94	17.71	10000000
8-15-A-O-11 (R=0.5)	224.78	22.50	23.91	47.82	456902
8-15-A-O-12 (R=0.5)	224.78	22.50	23.91	47.82	612856
8-15-A-O-13 (R=0.5)	224.78	22.50	23.91	47.82	453072

Tabla 4.18 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S890Q, espesor 15 mm y corte por plasma.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
8-15-A-P-1	524.49	52.50	55.79	61.98	33188
8-15-A-P-2	449.57	45.00	47.82	53.13	61310
8-15-A-P-3	449.57	45.00	47.82	53.13	66776
8-15-A-P-4	299.71	30.00	31.88	35.42	177887
8-15-A-P-5	299.71	30.00	31.88	35.42	207925
8-15-A-P-6	224.78	22.50	23.91	26.56	398611
8-15-A-P-7	224.78	22.50	23.91	26.56	481543
8-15-A-P-8	206.05	20.63	21.92	24.35	10000000
8-15-A-P-9	187.32	18.75	19.92	22.14	10000000
8-15-A-P-10	187.32	18.75	19.92	22.14	10000000

Tabla 4.19 – Resultados experimentales de las probetas con agujero, acero S890Q, espesor 15 mm y corte por plasma.

Código	S (MPa)	$\frac{S}{R_m}$ (%)	$\frac{S}{R_e}$ (%)	$\frac{\sigma_{max}}{R_e}$ (%)	Nº Ciclos
8-15-A-P-1	524.49	52.50	55.79	61.98	33188
8-15-A-P-2	449.57	45.00	47.82	53.13	61310
8-15-A-P-3	449.57	45.00	47.82	53.13	66776
8-15-A-P-4	299.71	30.00	31.88	35.42	177887
8-15-A-P-5	299.71	30.00	31.88	35.42	207925
8-15-A-P-6	224.78	22.50	23.91	26.56	398611
8-15-A-P-7	224.78	22.50	23.91	26.56	481543
8-15-A-P-8	206.05	20.63	21.92	24.35	1000000
8-15-A-P-9	187.32	18.75	19.92	22.14	1000000
8-15-A-P-10	187.32	18.75	19.92	22.14	1000000

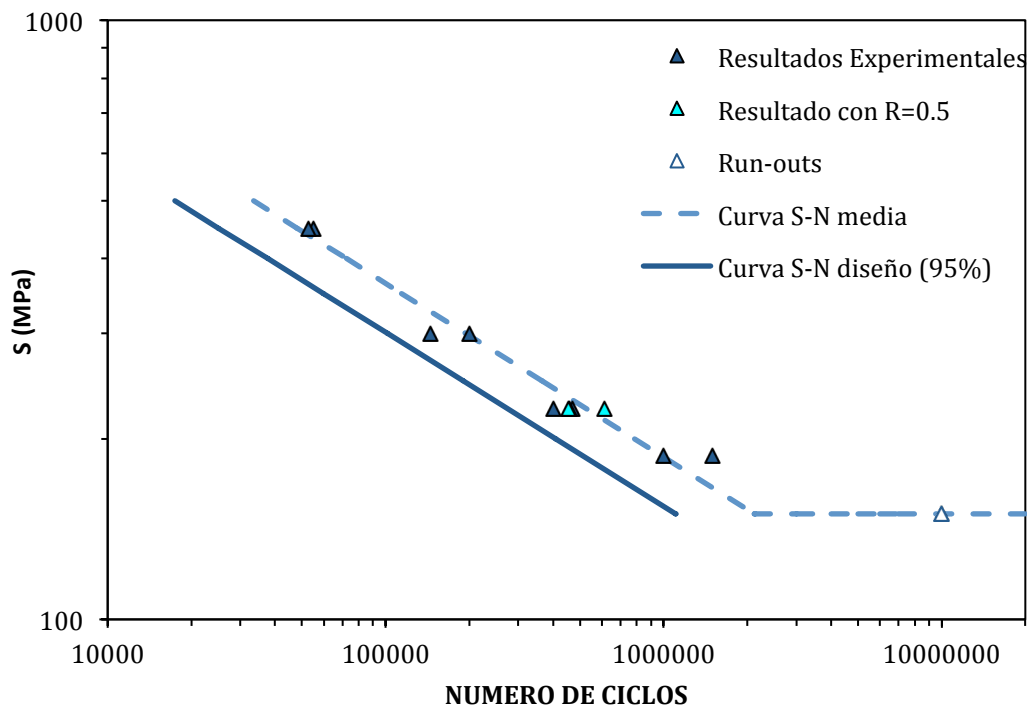


Figura 4.13 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S890Q, oxicorte y espesor 15 mm.

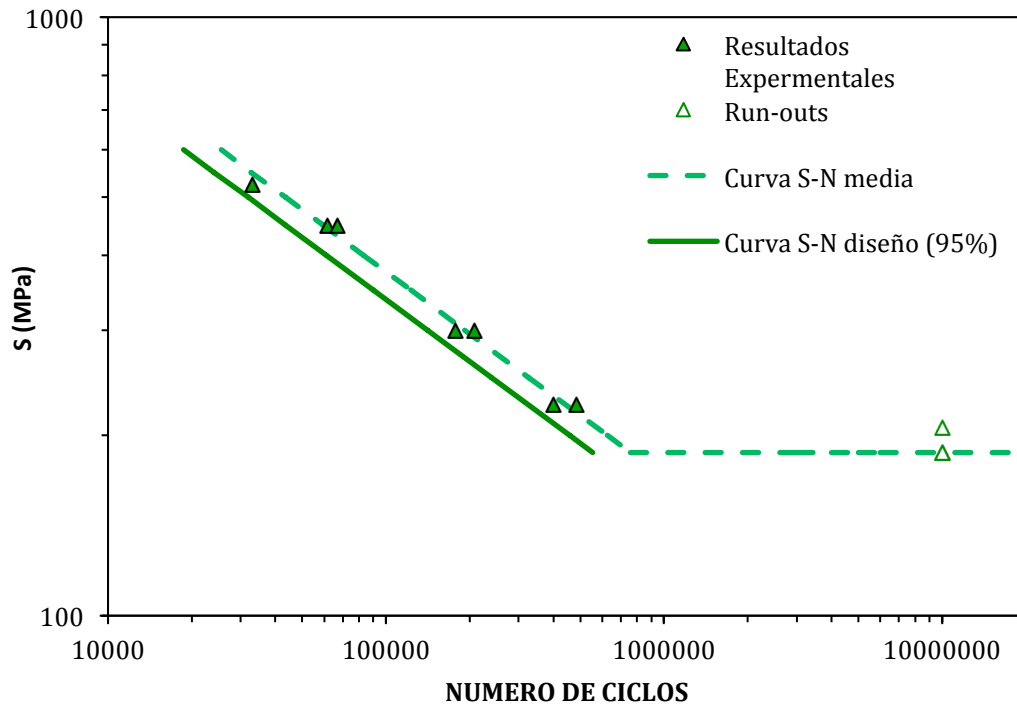


Figura 4.14 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S890Q, corte por plasma y espesor 15 mm.

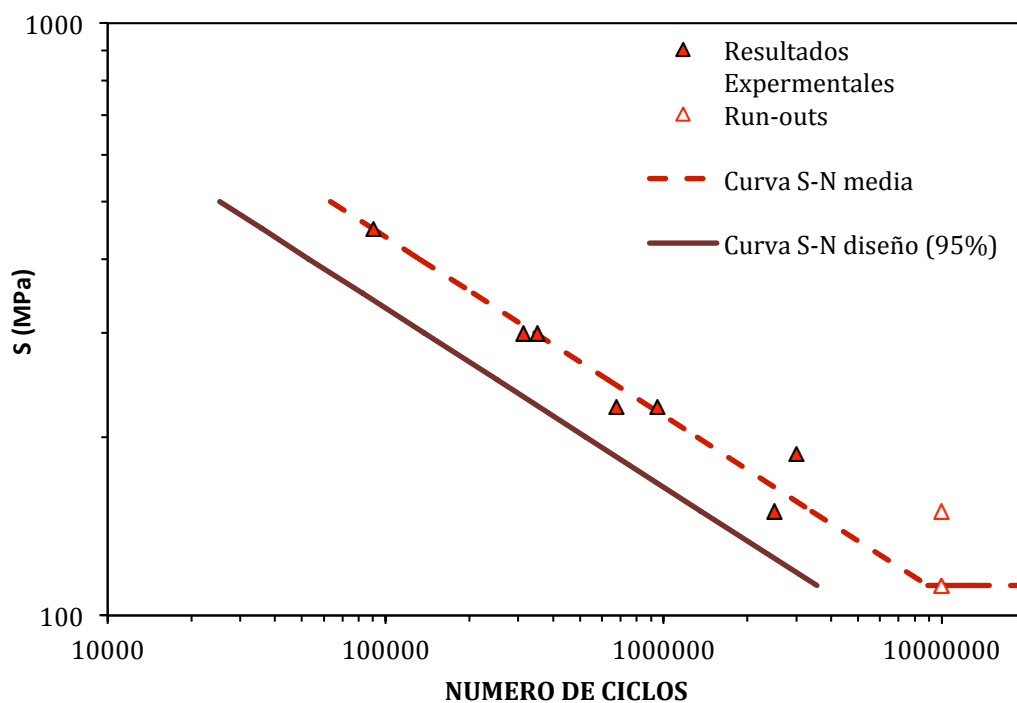


Figura 4.15 – Curvas S-N media y S-N asociada al 95% de confianza. Acero S890Q, corte por láser y espesor 15 mm.

Tabla 4.20 – Parámetros estimados a partir de los resultados experimentales para la combinación agujero, acero S890Q, espesor 15 mm y los tres métodos de corte.

PARÁMETRO	OXICORTE	CORTE POR PLASMA	CORTE POR LÁSER
m	3.445	2.909	3.315
logA	13.823	12.491	13.748
logA'	13.540	12.357	13.349
R'	0.98	0.99	0.97
CAFL	149.85 MPa	187.32 MPa	112.39 MPa
S _{umbral}	37.47 MPa	37.47 MPa	37.47 MPa

5. Análisis de los resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se va a proceder al análisis de los resultados experimentales obtenidos en las probetas con agujero circular.

Se ha llevado a cabo un análisis de los siguientes factores teniendo en cuenta su influencia sobre el comportamiento a fatiga:

- Proceso de corte térmico: Cada proceso de corte térmico (oxicorte, corte por plasma y corte por láser) genera unas condiciones superficiales y microestructurales características, las cuales pueden afectar de manera significativa a la resistencia a fatiga del detalle estructural.
- Tipo de acero: Habiendo considerado cuatro aceros estructurales (S355M, S460M, S690Q y S890Q) con diferentes propiedades a tracción, se ha evaluado su influencia en la resistencia a fatiga de cada proceso de corte térmico.
- Espesor de la probeta: Además de la influencia que generalmente ejerce el espesor del componente sobre la vida a fatiga, en el caso de los elementos cortados térmicamente este efecto se puede ver modificado por el hecho de que las características superficiales obtenidas para cada corte térmico son a su vez diferentes en función del espesor de corte. La influencia de este parámetro se ha analizado en el acero S460M, para el cual se han considerado dos espesores representativos de 15 mm y 25 mm.

Tras haber analizado la influencia sobre el comportamiento a fatiga de los factores antes mencionados, se procederá a la evaluación de la normativa de fatiga actual (Eurocódigo 3) [26] para el diseño de componentes con agujeros cortados térmicamente sometidos a cargas cíclicas.

5.2. Influencia del proceso de corte térmico

En este apartado se va evaluar la influencia de los procesos de corte térmico en el comportamiento a fatiga de componentes con un orificio circular. Por cada tipo de acero considerado (S355M, S460M, S690Q y S890Q) se compararán en esta sección la curva S-N y el límite de fatiga obtenidos con cada uno de los tres procesos de corte térmico.

5.2.1. Acero S355M y 15 mm de espesor

En la Figura 5.1 se muestran los resultados experimentales y la curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S355M.

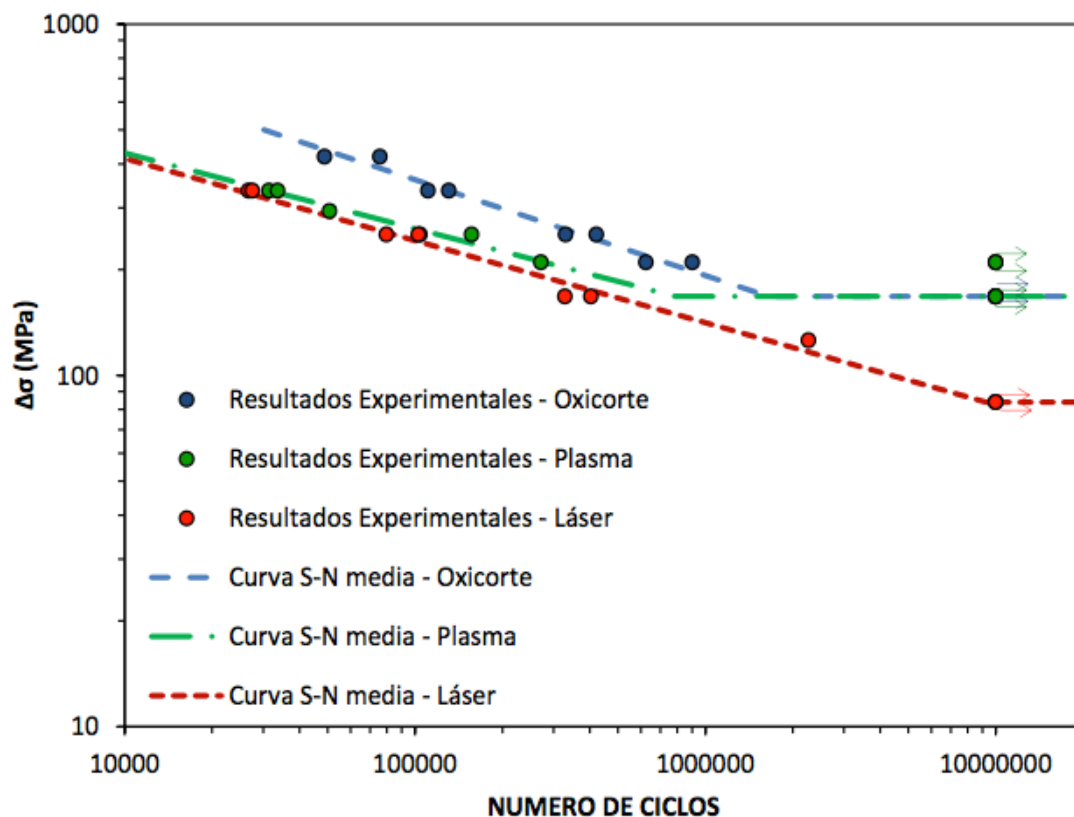


Figura 5.1 – Resultados experimentales y curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S355M.

Analizando la Figura 5.1, se observa que el oxycorte proporciona la mayor resistencia a fatiga en el rango de vida finita, mientras que el corte por plasma y corte por láser presentan comportamiento muy similar.

En cuanto al límite de fatiga, el oxycorte y el corte por plasma permiten alcanzar el mismo valor (168 MPa). El corte por láser provoca un descenso muy significativo de este parámetro, reduciendo a la mitad el valor del límite de fatiga obtenido con los otros dos procesos de corte (83 MPa).

5.2.2. Acero S460M y 15 mm de espesor

En la Figura 5.2 se muestran los resultados experimentales y la curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S460M.

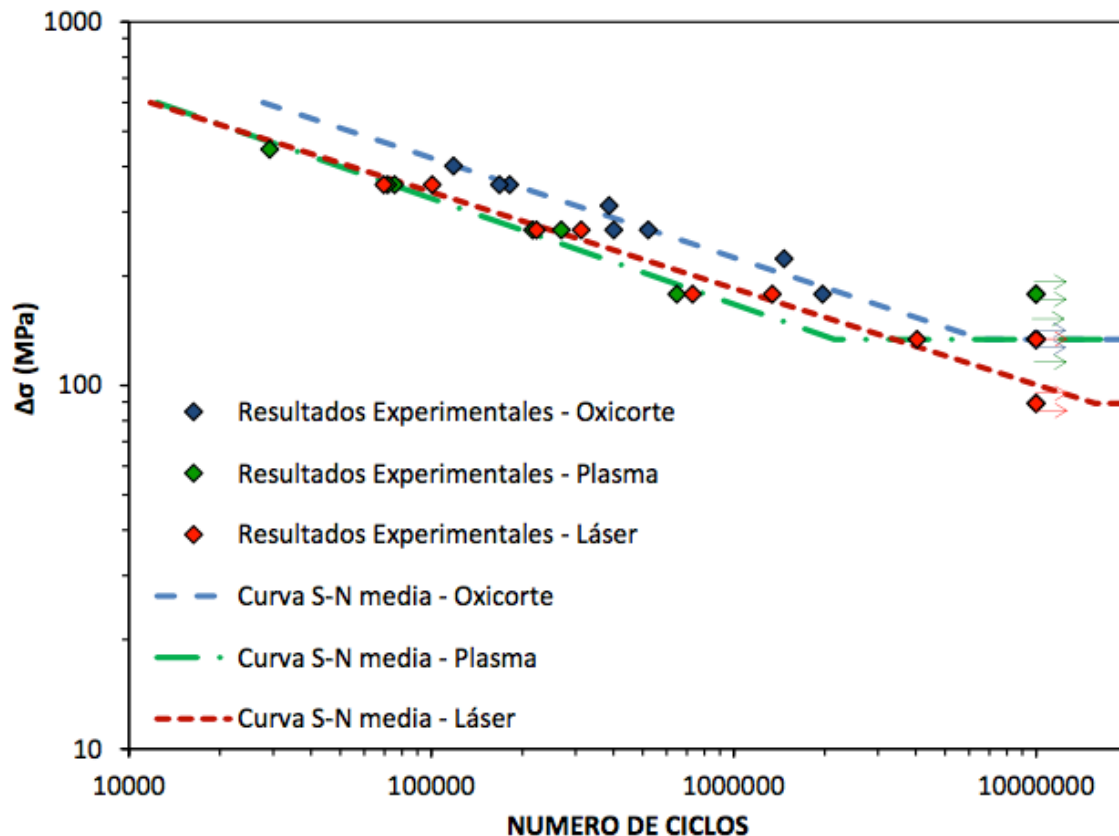


Figura 5.2 – Resultados experimentales y curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S460M.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 5.2, se pueden establecer ciertas similitudes con las observaciones realizadas en el acero S355M.

Por un lado, se comprueba que los agujeros oxicrotados mejoran ligeramente el comportamiento a fatiga mostrado en el rango de vida a fatiga finita por los agujeros cortados por plasma y láser, los cuales proporcionan una resistencia a fatiga similar en dicho rango de trabajo.

Por otro lado, el valor del límite a fatiga correspondiente a los agujeros oxicrotados y cortados por plasma es idéntico (134 MPa), y superior al obtenido con el corte por láser (90 MPa).

También conviene destacar que la pendiente m de la curva S-N es muy similar en los tres procesos de corte y está comprendida entre 3.5 y 4.

5.2.3. Acero S690Q y 15 mm de espesor

En la Figura 5.3 se muestran los resultados experimentales y la curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S690Q.

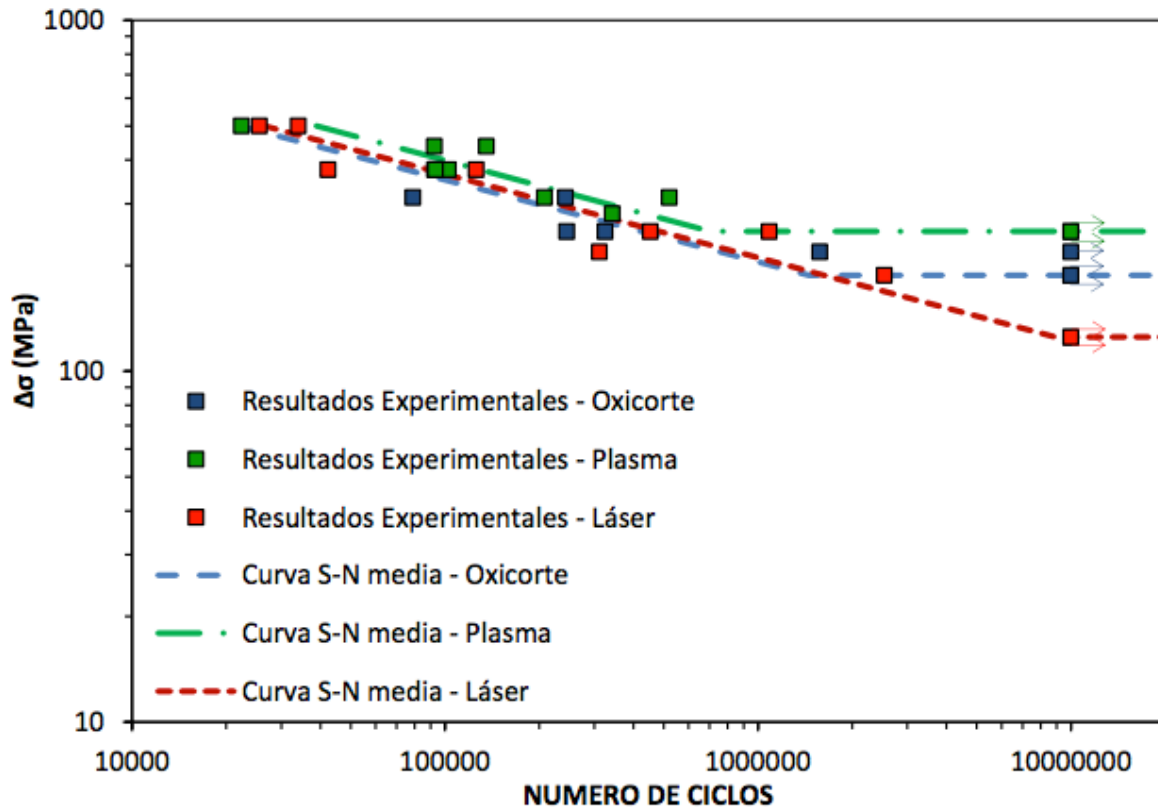


Figura 5.3 – Resultados experimentales y curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S690Q.

Tanto en el rango de vida a fatiga finita como en el rango de vida infinita se observan ciertas diferencias respecto a lo obtenido en los aceros S355M y S460M.

En lo que respecta al límite de fatiga, el corte por láser sigue proporcionando el valor más reducido de los tres métodos de corte (125 MPa). En cuanto al oxicorte y al corte por plasma, que previamente habían mostrado un valor idéntico de límite a fatiga, en el caso del acero S690Q se comprueba que el límite de fatiga del corte por plasma (250 MPa) mejora el valor correspondiente al oxicorte (187 MPa).

En el rango de vida a fatiga finita, el mejor comportamiento a fatiga de los agujeros oxicortados que se había observado en los aceros S355M y S460M ha desaparecido. En este caso, los tres procesos de corte proporcionan una resistencia a fatiga relativamente similar, siendo la mostrada por los agujeros cortados por plasma ligeramente superior. Conviene destacar que la pendiente m de la curva S-N correspondiente a los tres procesos de corte es prácticamente idéntica y con un valor igual a 4.

5.2.4. Acero S890Q y 15 mm de espesor

En la Figura 5.4 se muestran los resultados experimentales y la curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S890Q.

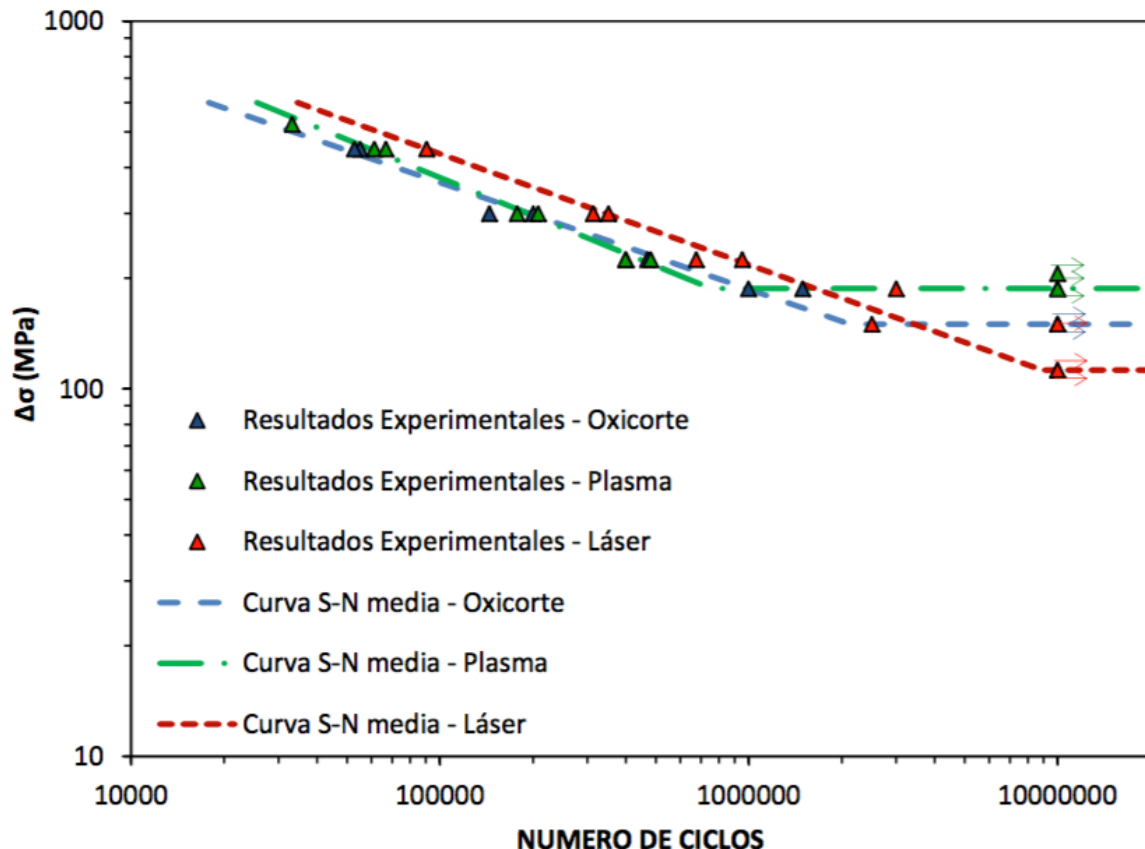


Figura 5.4 – Resultados experimentales y curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S890Q.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 5.4, se pueden observar ciertas tendencias similares a las comentadas en el acero S690Q. Los agujeros cortados por plasma proporcionan el valor del límite de fatiga más elevado (187 MPa). Al mismo tiempo, los agujeros cortados por láser presentan el menor valor de límite de fatiga (113 MPa). Sin embargo, la diferencia entre ambos valores es de 74 MPa, significativamente inferior a la obtenida en el acero S690Q (125 MPa). Los agujeros oxicrotados vuelven a presentar un límite de fatiga (150 MPa) comprendido entre el de los agujeros cortados por plasma y por láser.

En el rango de vida a fatiga finita, los tres procesos de corte presentan un comportamiento similar, siendo ligeramente mejor el correspondiente al corte por láser.

5.2.5. Acero S460M y 25 mm de espesor

En la Figura 5.5 se muestran los resultados experimentales y la curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S460M y 25 mm de espesor.

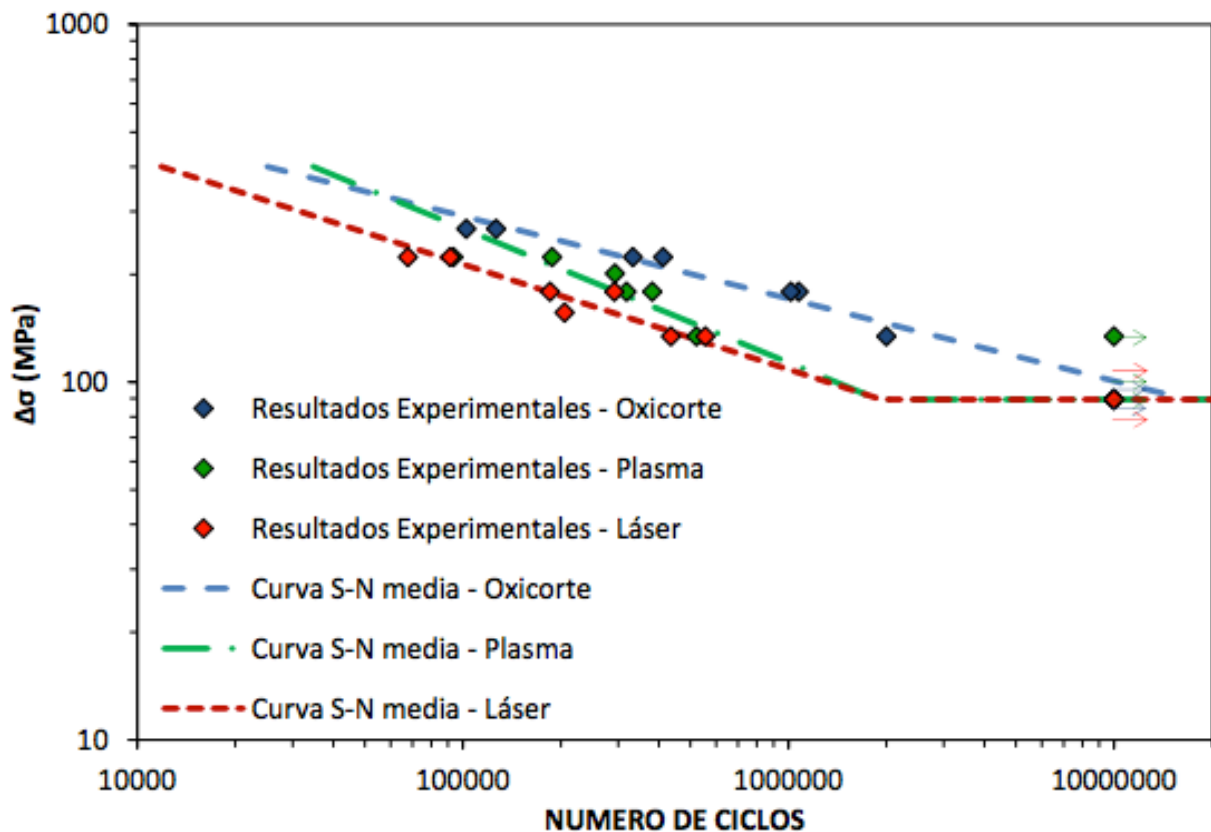


Figura 5.5 – Resultados experimentales y curva S-N media correspondientes a los tres procesos de corte en el acero S460M y 25 mm de espesor.

Se observa que los tres procesos de corte presentan un valor del límite de fatiga idéntico (90 MPa). En el rango de vida a fatiga finita, se comprueba cierta dependencia de la resistencia a fatiga en función de proceso de corte escogido. De forma similar a lo mostrado en el mismo acero y 15 mm de espesor, los agujeros oxigortados proporcionan una resistencia a fatiga considerablemente superior a la de los agujeros cortados por láser.

Los agujeros cortados por plasma presentan un comportamiento a fatiga intermedio entre el correspondiente a los agujeros oxigortados y los agujeros cortados por láser.

5.2.6. Influencia del tipo de acero

La presencia de un elemento concentrador de tensiones atenúa el efecto de las propiedades a tracción del material sobre el comportamiento en fatiga [4]. Teniendo en cuenta que se han ensayado cuatro aceros con diferentes propiedades a tracción (S355M, S460M, S690Q y S890Q) y con objeto de verificar si la afirmación anterior se cumple en los agujeros cortados térmicamente, se han representado en las figuras 5.6 a 5.8 las curvas S-N correspondientes a los tres procesos de corte.

Para los agujeros oxicortados (Figura 5.6), las curvas S-N estimadas en los cuatro aceros son prácticamente idénticas, solapándose unas sobre otras. En el caso de los agujeros cortados por plasma (Figura 5.7), la curva S-N correspondiente al acero S355M está por debajo de las correspondientes a los otros tres aceros (S460M, S690Q y S890Q), los cuales proporcionan un comportamiento a fatiga muy similar en el rango de vida a fatiga finita. Sin embargo, en lo que respecta al límite de fatiga, en el acero S890Q se obtiene un límite a fatiga ligeramente superior al del acero S355M, y el del acero S460M es incluso inferior.

En lo que respecta a los agujeros cortados por láser (Figura 5.8), se pueden realizar las mismas observaciones que las comentadas sobre los agujeros cortados por plasma: los aceros S460M, S690Q y S890Q presentan una resistencia a fatiga similar y superior a la del acero S355M en el rango de vida a fatiga finita.

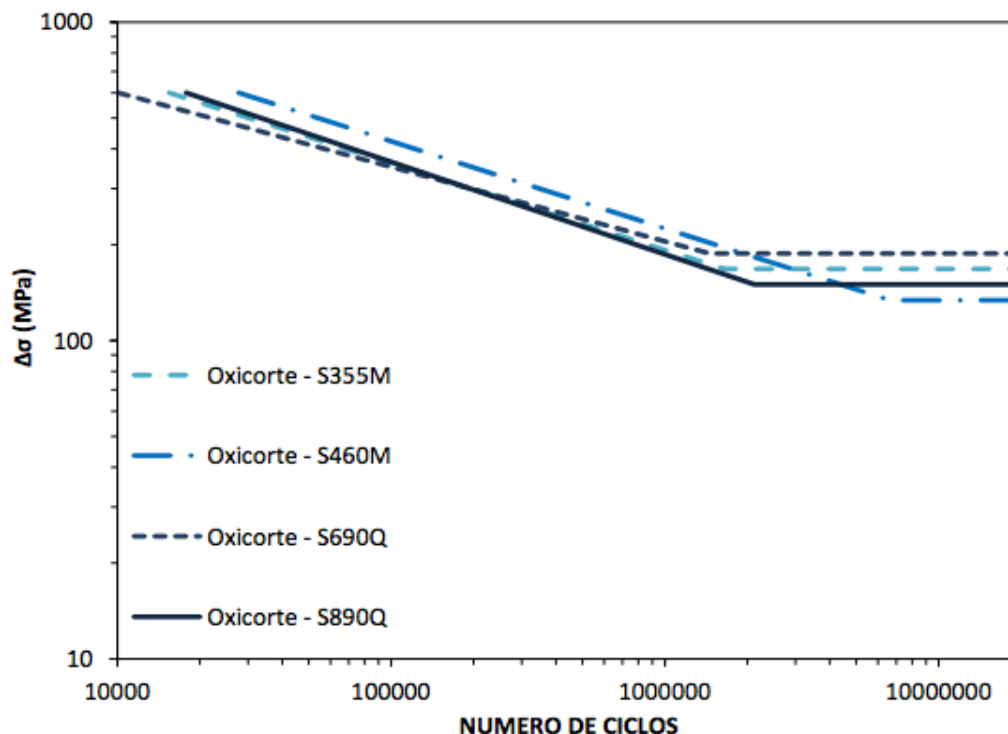


Figura 5.6 – Curva S-N media estimada para cada acero y con el agujero oxicortado.

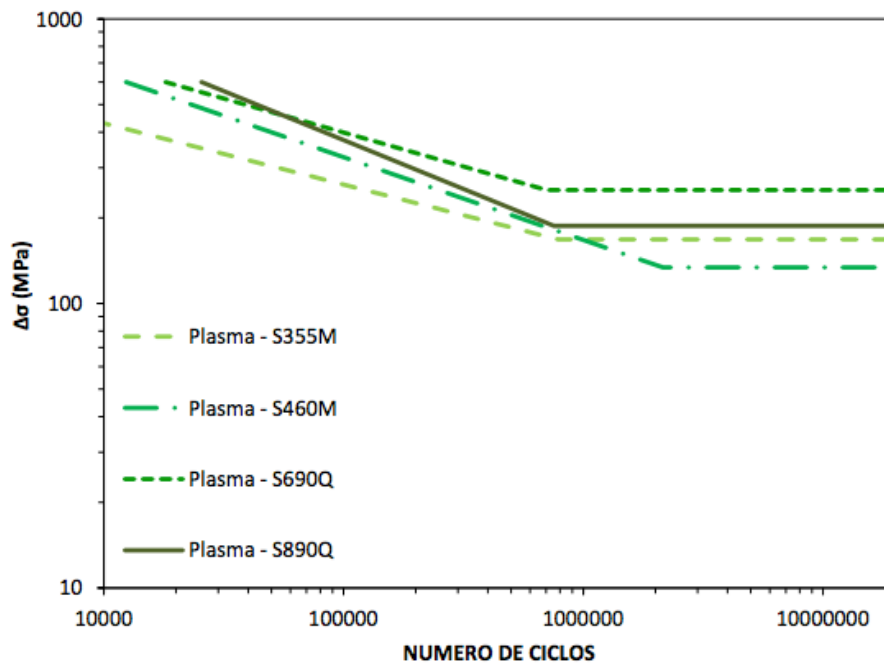


Figura 5.7 – Curva S-N media estimada para cada acero y con el agujero cortado por plasma.

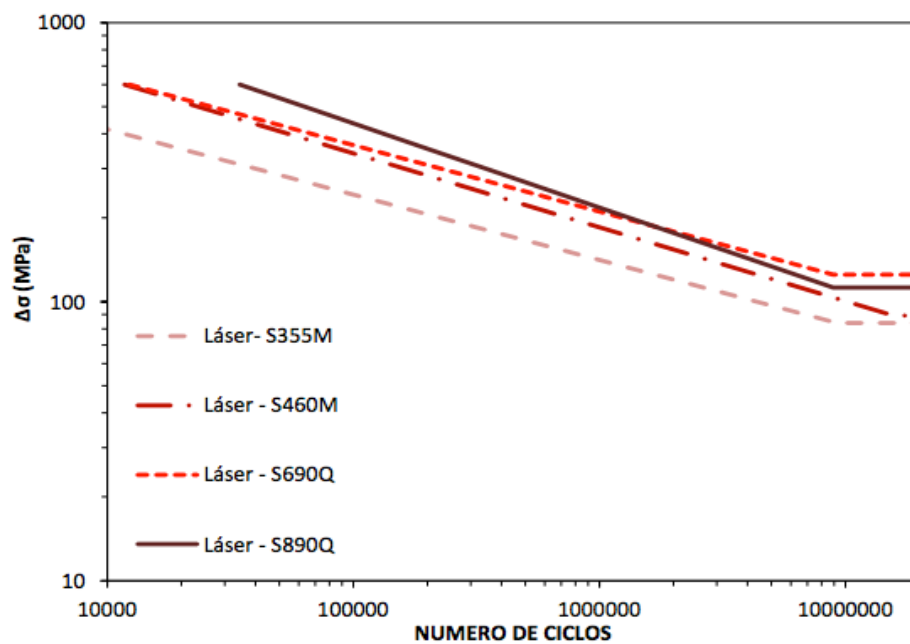


Figura 5.8 – Curva S-N media estimada para cada acero y con el agujero cortado por láser.

5.3. Influencia del espesor de la probeta

Para proceder al análisis de la influencia del espesor en la resistencia a fatiga de los agujeros cortados térmicamente, se van a comparar los resultados obtenidos en el acero S460M y los dos espesores considerados (15 y 25 mm).

En la Figura 5.9 se comparan los valores de fatiga obtenidos en los agujeros oxicortados para ambos espesores, los cuales muestran una calidad superficial similar. Se observa una reducción de la resistencia a fatiga en el rango de vida a fatiga finita. Este hecho tiene una componente estadística, en tanto que la probabilidad de que aparezca un defecto iniciador de una fisura aumenta conforme lo hace el espesor. También se ha obtenido una reducción en el límite de fatiga, pasando de 133 MPa en el espesor de 15 mm a 89 MPa en el de 25mm.

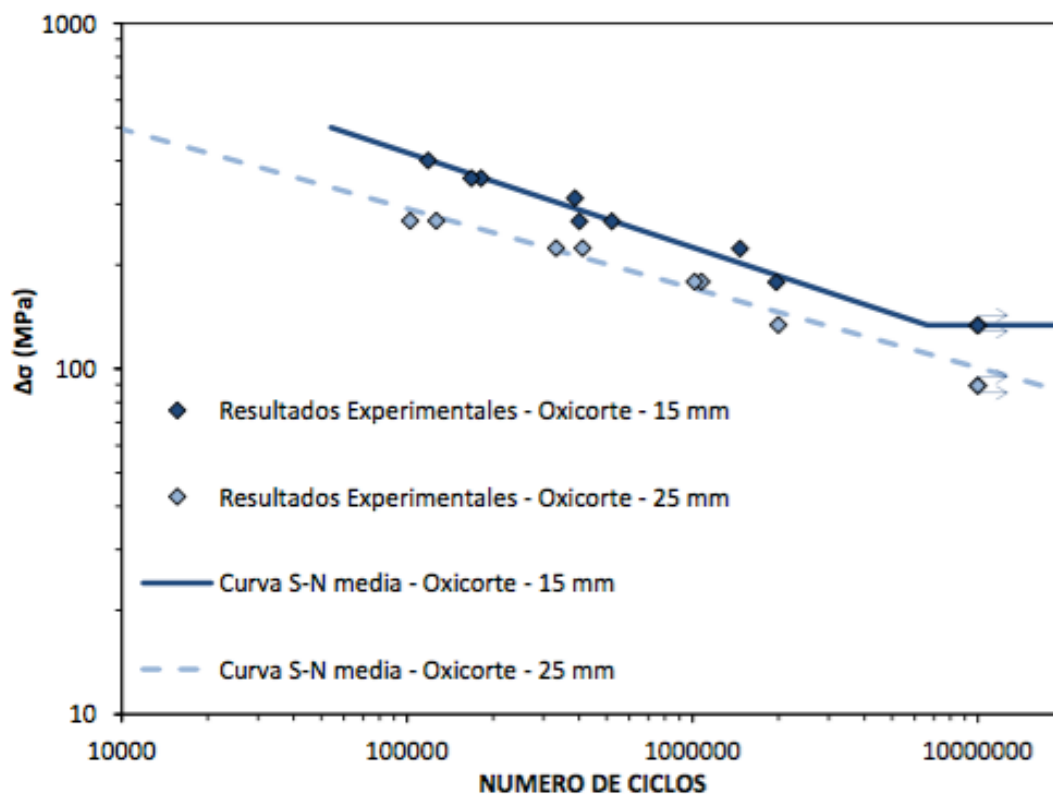


Figura 5.9 – Efecto del espesor sobre la resistencia a fatiga del acero S460M y agujeros oxicortados.

En el caso de los agujeros cortados por plasma (Figura 5.10), el efecto del espesor es similar al observado en los agujeros oxicortados. Se comprueba que al incrementar el espesor de 15 mm a 25 mm (con calidades superficiales similares) se ha producido una reducción en la resistencia a fatiga tanto en el rango de vida a fatiga finita como en el rango de vida a fatiga infinita.

Conviene señalar que la reducción en el límite de fatiga es de 44 MPa, magnitud similar a la obtenida en los agujeros oxicortados.

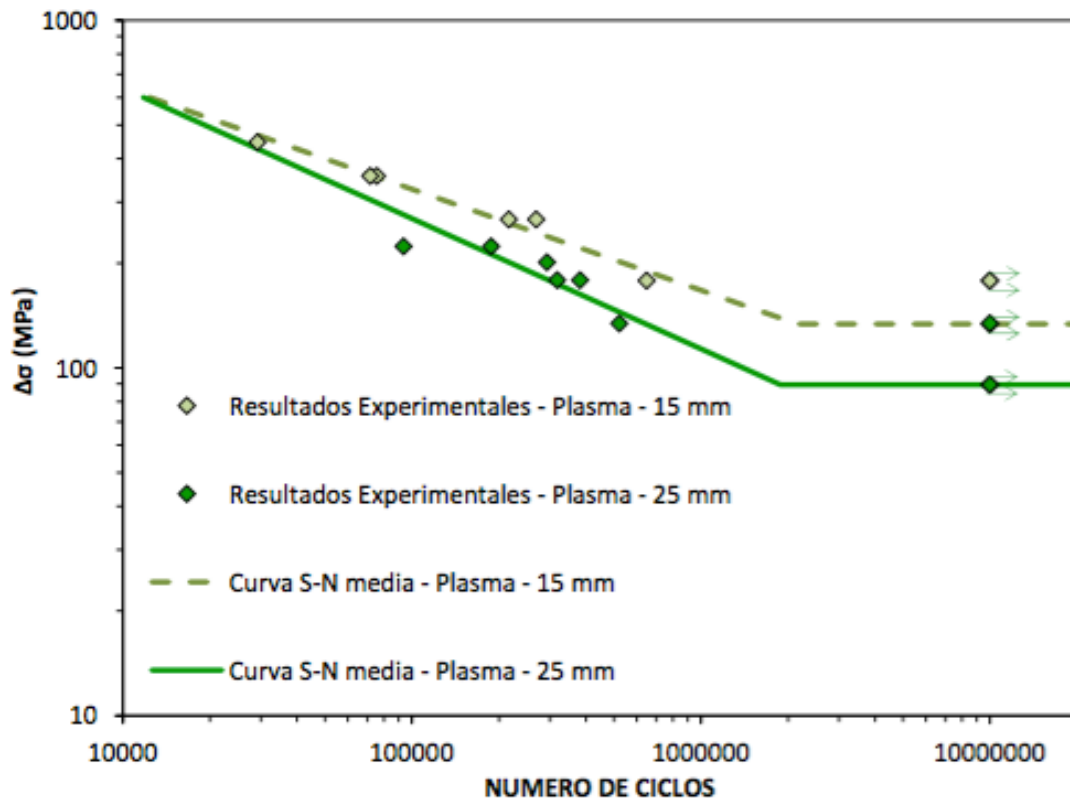


Figura 5.10 – Efecto del espesor sobre la resistencia a fatiga del acero S460M y agujeros cortados por plasma.

Respecto a los agujeros cortados por láser, en primer lugar conviene señalar que la disminución de la calidad superficial producida al aumentar el espesor es significativamente mayor a la obtenida en los otros dos procesos de corte.

En la Figura 5.11, por un lado se observa que el valor del límite de fatiga no se ha visto afectado por el incremento del espesor, obteniendo el mismo valor para ambos espesores (89 MPa). Por otro lado, también se observa una evidente reducción de la resistencia a fatiga en el rango de vida a fatiga finita cuando se aumenta el espesor de 15 a 25 mm.

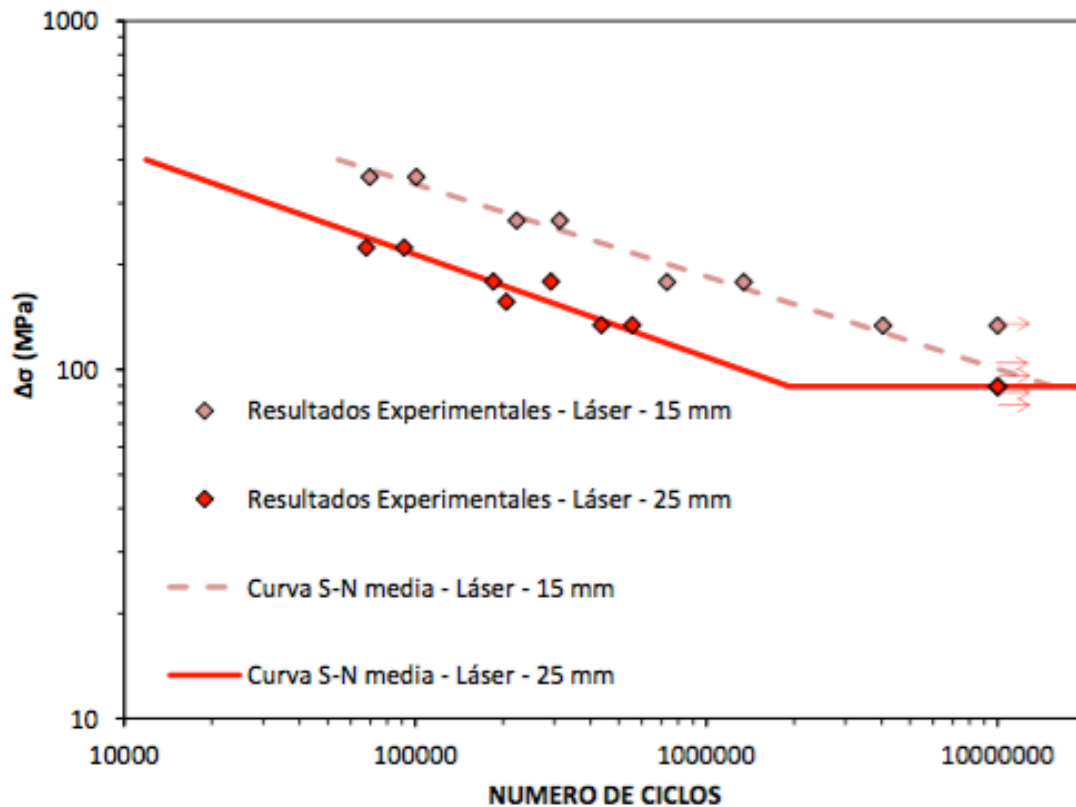


Figura 5.11 – Efecto del espesor sobre la resistencia a fatiga del acero S460M y agujeros cortados por láser.

En la Tabla 5.1 se evalúa la influencia de incrementar el espesor de 15 mm a 25 mm sobre la clase $FAT_{media, ensayos}$ de los tres procesos de corte.

Tabla 5.1 – Influencia del espesor en la clase FAT de los tres procesos corte.

PROCESO DE CORTE	$FAT_{media, ensayos}$ 15 mm	$FAT_{media, ensayos}$ 25 mm	$1 - (FAT_{25mm} / FAT_{15mm})$
OXICORTE	169	125	0.26
CORTE POR PLASMA	122	95	0.22
CORTE POR LÁSER	138	81	0.41

Los resultados mostrados en la Tabla 5.1 muestran una reducción similar de la clase FAT al aumentar el espesor en los agujeros oxicortados y cortados por plasma (26% y 22%, respectivamente). Teniendo en cuenta que la disminución de la calidad superficial es pequeña en ambos casos, la menor clase FAT obtenida en el espesor

de 25 mm es debida principalmente al efecto estadístico. En el caso de los agujeros cortados por láser, se comprueba que la reducción de la clase FAT (41%) al pasar de 15 mm a 25 mm de espesor es mayor a la observada en los otros dos procesos de corte. La razón a este hecho reside en que a la componente estadística argumentada para los agujeros oxicortados y cortados por plasma es necesario añadir la componente debida a la importante disminución de la calidad superficial observada en los agujeros cortados por láser de espesor 25 mm.

5.4. Comparación con los resultados de fatiga correspondientes a agujeros taladrados y punzonados

El taladrado y el punzonado son las dos principales tecnologías empleadas hasta el momento para la ejecución de orificios en chapas de acero.

En esta Trabajo no se han llevado a cabo ensayos sobre probetas con agujeros realizados por ninguno de ambos métodos, pero sin embargo se dispone de los resultados procedentes del programa experimental llevado a cabo en el proyecto europeo COLDFOSS [48]. La particularidad de dicho programa experimental, y que permite su comparación con los valores aquí obtenidos, es la similitud de los parámetros de ensayo empleados.

En las figuras 5.12 a 5.14 se comparan las curvas S-N medias estimadas para los agujeros realizados mediante corte térmico y los resultados de fatiga en los agujeros taladrados y punzonados. En el acero S335M/S355N (Figura 5.12) se observa que los agujeros cortados por láser presentan un comportamiento a fatiga similar al de los punzonados tanto en el rango de vida a fatiga finita como rango de vida a fatiga infinita. Los agujeros cortados por plasma también proporcionan la misma resistencia a fatiga que los agujeros punzonados en el rango de vida a fatiga finita, sin embargo el límite de fatiga es muy superior al de estos últimos. Los agujeros oxicortados proporcionan una resistencia a fatiga idéntica que los agujeros taladrados en ambos rangos de comportamiento.

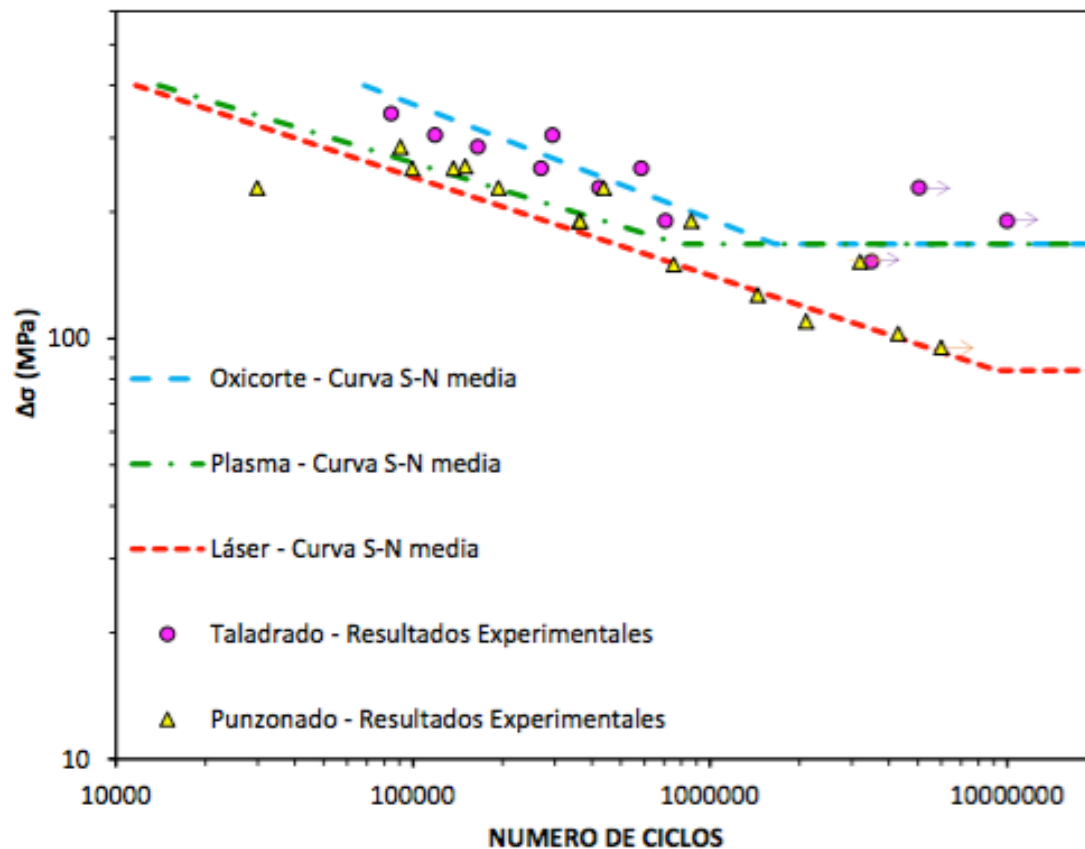


Figura 5.12 – Comparación de los resultados obtenidos en agujeros taladrados y punzonados con los cortados térmicamente. S355M/S355N.

Analizando la Figura 5.13 se comprueba que, para el acero S460M/S460Q, los agujeros punzonados presentan una resistencia a fatiga inferior a la obtenida con cualquiera de los procesos de corte térmico. Así mismo, convendría señalar que el límite de fatiga de los agujeros punzonados es idéntico al de los agujeros cortados por láser (90 MPa).

Los agujeros taladrados presentan un comportamiento en el rango de vida a fatiga finita similar al de los procesos de corte térmico, incluso ligeramente peor que el correspondiente al oxycorte. En lo que respecta al límite de fatiga, el valor obtenido en los agujeros taladrados (188 MPa) se aproxima al valor de los agujeros oxycortados y cortados por plasma (134 MPa), sin embargo, es muy superior al de los agujeros cortados por láser (90 MPa).

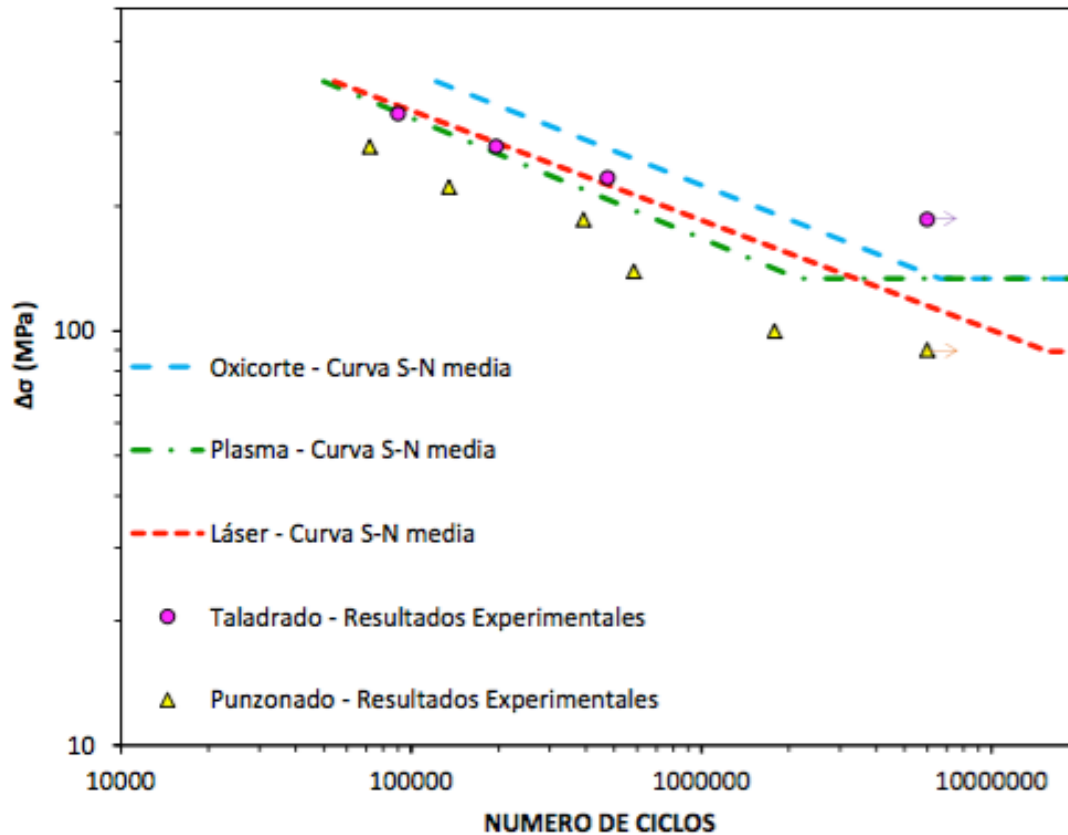


Figura 5.13 – Comparación de los resultados obtenidos en agujeros taladrados y punzonados con los cortados térmicamente. S460M/S460Q.

Los resultados obtenidos en el acero S690Q (Figura 5.14) son muy similares a los mostrados en el acero S460M/S460Q. Se comprueba que los agujeros cortados mediante cualquier proceso de corte térmico proporcionan una resistencia a fatiga superior a la de los agujeros punzonados, siendo el límite de fatiga correspondiente a estos últimos (102 MPa) ligeramente inferior que el alcanzado en los agujeros cortados por láser (125 MPa).

En el rango de vida a fatiga finita, los agujeros taladrados presentan un comportamiento a fatiga prácticamente idéntico al de los agujeros cortados térmicamente. El valor de límite de fatiga en los agujeros taladrados coincide con el obtenido en los agujeros oxycortados (192 MPa), lo cual supone un valor intermedio entre el límite de fatiga de los agujeros cortados por plasma (250 MPa) y los cortados por láser (125 MPa.)

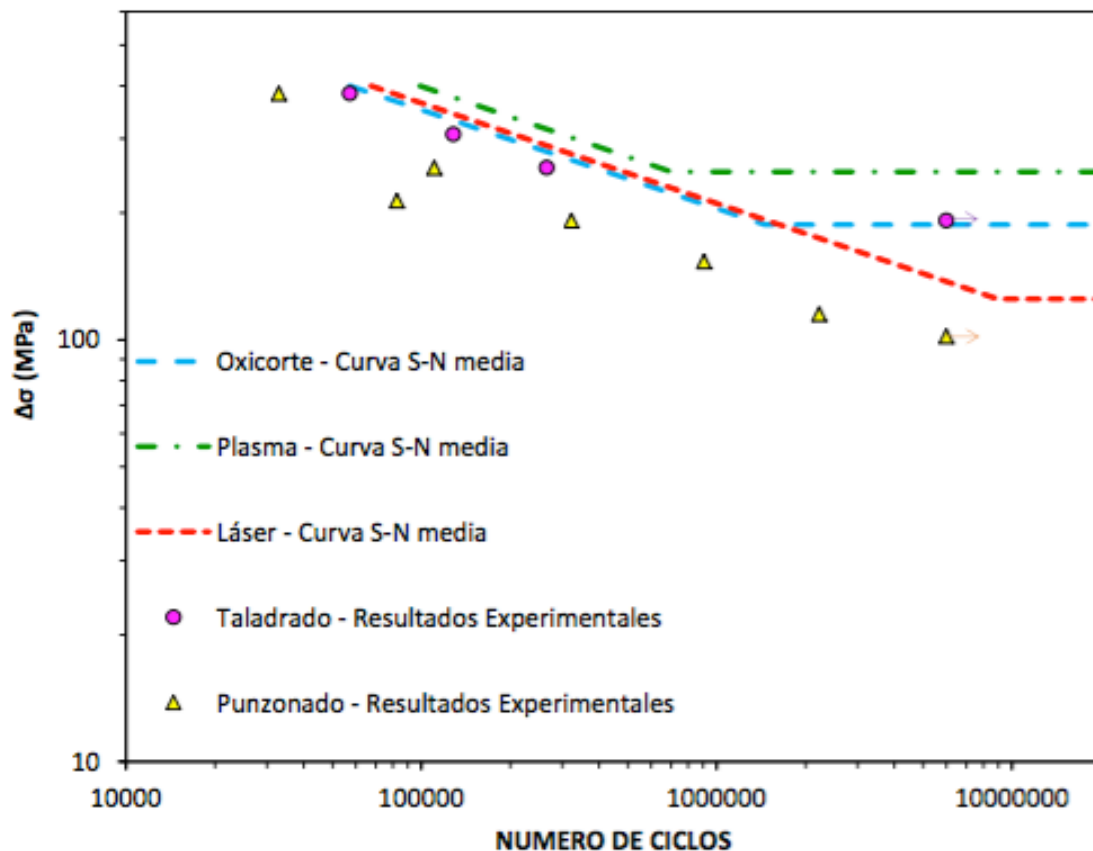


Figura 5.14 – Comparación de los resultados obtenidos en agujeros taladrados y punzonados con los cortados térmicamente. S690Q.

Tras la comparación de los resultados de fatiga obtenidos en los tres aceros considerados (S355M/S355N, S460M/S460Q y S690Q), se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Generalmente, los agujeros punzonados presentan una resistencia fatiga inferior a los agujeros cortados térmicamente en el rango de vida a fatiga finita.
- El límite de fatiga de los agujeros punzonados es el más bajo de todas las tecnologías de fabricación de orificios analizadas, siendo en todo caso muy similar al obtenido con los agujeros cortados por láser.
- Tanto el comportamiento en el rango de vida a fatiga finita como el valor del límite de fatiga de los agujeros taladrados es muy similar al de los agujeros oxicortados.

5.5. Evaluación de la normativa de fatiga: Eurocódigo 3

El tratamiento que hace en la actualidad el Eurocódigo 3 [26] para componentes que presentan orificios es similar al de la normativa BS7608 [28]. Únicamente aplica la clase FAT90 para agujeros taladrados en elementos estructurales sometidos a un esfuerzo normal y un momento flector. Con objeto de evaluar qué clase FAT correspondería a los agujeros cortados térmicamente, se van a determinar las curvas S-N de diseño teniendo en cuenta los condicionantes impuestos por el Eurocódigo 3:

- Pendiente m igual a 3, independientemente de la clase FAT considerada.
- La curva S-N de diseño representa una probabilidad de supervivencia del 95% y un nivel de confianza del 75% respecto a la media.

En la Tabla 5.2 se recogen los valores de $FAT_{\text{diseño, ensayos}}$ en el espesor de 15 mm y la clase FAT inmediatamente inferior que les correspondería.

Tabla 5.2 – Clases FAT del Eurocódigo 3 [26] correspondientes a cada combinación de proceso de corte y acero en el espesor de 15 mm.

OXICORTE				
	$\log A_{\text{ensayos, media}}$	$\log A_{\text{ensayos, diseño}}$	$FAT_{\text{ensayos, diseño}}$	$FAT_{\text{normativa}}$
S355M	12.731	12.293	100	100
S460M	12.987	12.549	121	112
S690Q	12.735	12.289	100	100
S890Q	12.737	12.299	100	100
CORTE POR PLASMA				
S355M	12.217	11.761	66	63
S460M	12.559	12.103	86	80
S690Q	12.838	12.400	108	100
S890Q	12.720	12.273	98	90
CORTE POR LÁSER				
S355M	12.158	11.720	64	63
S460M	12.722	12.276	98	90
S690Q	12.765	12.328	102	100
S890Q	12.998	12.548	121	112

Analizando la Tabla 5.2, se observa que la clase FAT90 correspondiente a los agujeros taladrados no solo podría extrapolarse a los agujeros oxicortados, sino que incluso se podría elevar a la FAT100. En los agujeros cortados por plasma se produce una diferencia significativa entre el acero S355M (FAT63) y los aceros S460M, S690Q y S890Q, en los cuales se podrían adoptar las clases FAT80, FAT100 y FAT90, respectivamente. En cuanto a los agujeros cortados por láser, se observa un comportamiento similar al de los cortados por plasma: al acero S355M le correspondería la clase FAT63, mientras que en los tres aceros más resistentes se podría aplicar la clase FAT correspondiente a los agujeros taladrados (FAT90).

Una vez obtenidas las clases FAT de diseño para las distintas técnicas de corte y espesor de 15 mm, se va a realizar el mismo proceso con los resultados obtenidos en el acero S460M y 25 mm de espesor. En la Tabla 5.3 se comparan los valores de la clase FAT para ambos espesores y los tres procesos de corte.

Tanto en el oxicorte como en el corte por plasma se produce un ligero descenso de la clase FAT al incrementar el espesor de 15 mm a 25 mm, sin embargo la clase FAT obtenida es la que se había deducido en el espesor de 15 mm para ambos procesos de corte. En el corte por láser dicha disminución de clase FAT es más significativa, de FAT90 a FAT56.

Tabla 5.3 – Clases FAT del Eurocódigo 3 [26] correspondientes a los espesores de 15 y 25 mm del acero S460M.

PROCESO DE CORTE	15 mm	25 mm
OXICORTE	112	90
CORTE POR PLASMA	80	63
CORTE POR LÁSER	90	56

En las figuras 5.15 a 5.17 se comparan los resultados experimentales obtenidos con los tres procesos de corte y las curvas S-N media y de diseño correspondientes a la clase FAT90 (propuesta por el Eurocódigo para agujeros taladrados) y a la determinada en este trabajo adaptando 25 mm como espesor de referencia (Tabla 5.3).

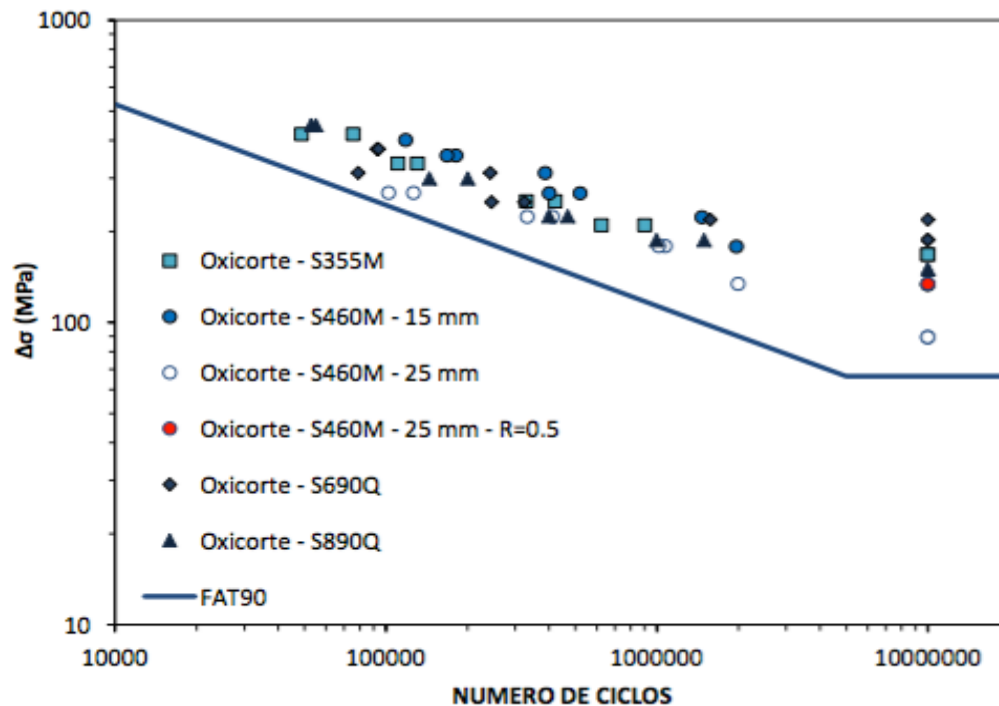


Figura 5.15 – Comparación entre los resultados obtenidos con agujeros oxicortados y la clase FAT90 del Eurocódigo 3 [26].

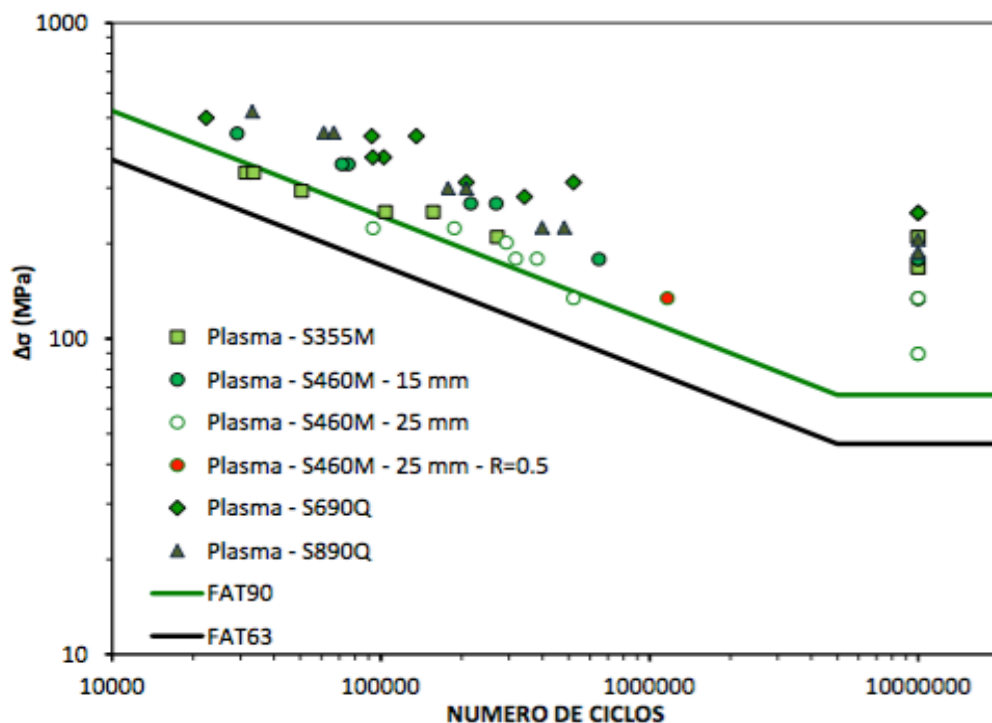


Figura 5.16 – Comparación entre los resultados obtenidos con agujeros cortados por plasma y las clases FAT90 y FAT63 del Eurocódigo 3 [26].

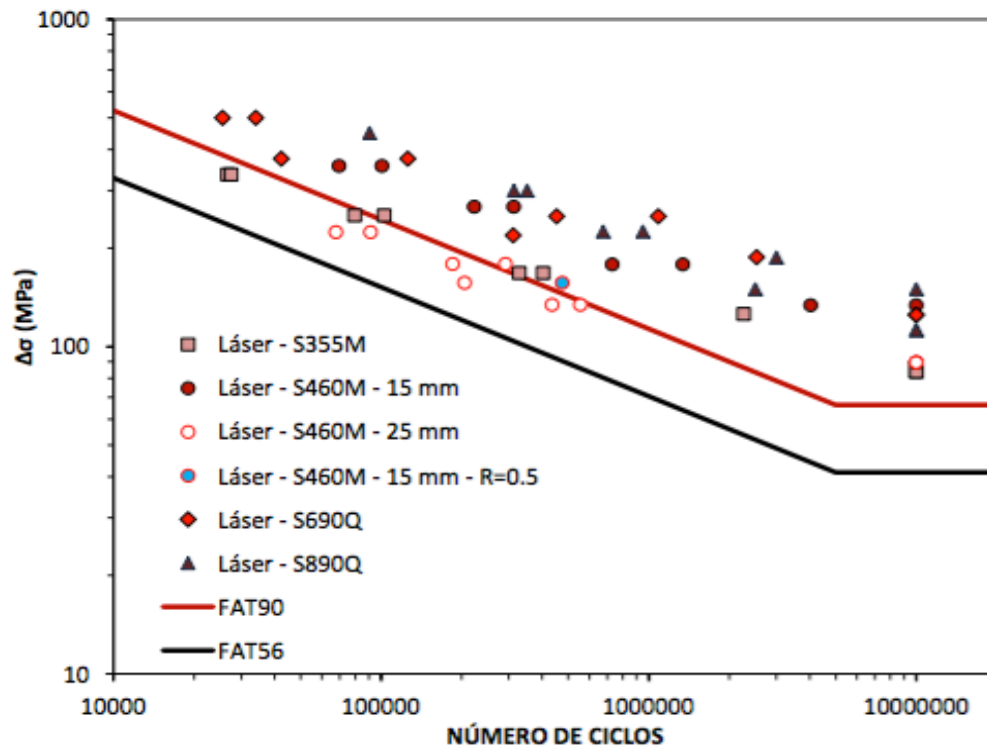


Figura 5.17 – Comparación entre los resultados obtenidos con agujeros cortados por plasma y las clases FAT90 y FAT56 del Eurocódigo 3 [26].

Teniendo en cuenta estos condicionantes, las clases FAT aplicables a agujeros cortados térmicamente serían la FAT90 para agujeros oxicortados, la FAT63 para agujeros cortados por plasma y FAT56 para los agujeros cortados por láser.

6. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha evaluado tanto la influencia de los métodos de corte térmico en el comportamiento en fatiga de aceros estructurales como la idoneidad del Eurocódigo 3 [26] para el diseño a fatiga de componentes cortados térmicamente.

La versatilidad, productividad y calidad obtenida con los procesos de corte térmico los posiciona como una alternativa real y eficaz frente al taladrado y al punzonado. Sin embargo, su uso en la actualidad está muy restringido, sobre todo en estructuras sometidas a cargas variables, en tanto que las normativas de fabricación actuales limitan su uso a estructuras secundarias o dejan a criterio del ingeniero responsable la utilización de estas tecnologías. Así mismo, las normativas de fatiga actuales carecen de una categoría de detalle específica para orificios cortados térmicamente.

Las principales conclusiones son las siguientes:

1. Los agujeros cortados por láser proporcionan el valor del límite de fatiga más reducido en los cuatro aceros considerados, siendo la presencia de estrías la causa principal de este comportamiento. Los agujeros oxicortados y cortados por plasma presentan un límite de fatiga muy similar, siendo el de los primeros ligeramente inferior en los aceros S690Q y S890Q.
2. En el rango de vida a fatiga finita, la resistencia a fatiga obtenida con los tres procesos de corte es muy similar en los aceros S460M, S690Q y S890Q. Sin embargo, en el acero S355M se ha observado un notable empeoramiento del comportamiento a fatiga en los agujeros cortados por láser y plasma.
3. Al aumentar el espesor de 15 mm a 25 mm, se ha observado en los agujeros oxicortados y cortados por plasma una idéntica reducción de la resistencia a fatiga tanto en el rango de vida a fatiga finita como infinita. En el caso de los agujeros cortados por láser, la disminución de la resistencia a fatiga en el rango de vida a fatiga finita es superior a la mostrada por los otros dos procesos de corte, mientras que el límite de fatiga no se ha visto afectado.

4. Este trabajo propone el uso de las siguientes clases FAT para agujeros obtenidos mediante corte térmico.

Tabla 6.1 – Categorías de detalle propuestas en esta Tesis para el diseño a fatiga de agujeros cortados térmicamente en el Eurocódigo 3 [26].

PROCESO DE CORTE	ESPESOR	CATEGORIA DE DETALLE PROPUESTA
OXICORTE	≤ 25 mm	FAT90
CORTE POR PLASMA	≤ 25 mm	FAT63
CORTE POR LÁSER	≤ 15 mm	FAT63
	> 15 mm	FAT56

5. Teniendo en cuenta que ninguna de las normativas consideran el comportamiento a fatiga de agujeros cortados térmicamente, las categorías de diseño propuestas constituyen el punto de partida para su introducción en los códigos actuales.

7. Bibliografía

[1] Bolaños F. Módulo I - Tema 13: Procesos de corte, punzonado y preparación de bordes. Formación Ingeniero Internacional de Soldadura. Asociación Española de Soldadura y Técnicas de Unión. 2012.

[2] Meurling F., Melander A., Linder J., Larsson M. The influence of mechanical and laser cutting on the fatigue strengths of carbon and stainless sheet steels. Scandinavian Journal of Metallurgy 2001; 30: 309–319.

[3] Schijve J. Fatigue of structures and materials. Springer. 2009.

[4] Norwegian Public Commission. Report of Norwegian public commission: The Alexander L. Kielland accident. 1981.

[5] http://www.kosori.org/02.R&D/08_0101.asp

[6] <http://officerofthewatch.com/2013/04/29/alexander-l-kielland-platform-capsize-accident/>

[7] <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/alexander-l-kielland-accommodation-platform-145/>

[8] Oehme, P. Damage analysis of steel structures. IABSE Proceedings 1989; 139-189.

[9] Fisher J.W. Fatigue and fracture in steel bridges. Wiley-Interscience. 1984.

[10] Chen W.F., Lui E.M. Handbook of structural engineering. 2ª Edición, Taylor & Francis. 2004.

[11] Hosford WF. “Solid Mechanics”. University of Cambridge. 2010.

[12] Paris P.C., Gomez M.P., Anderson W.P. “A rational analytic theory of fatigue”. The Trend in Engineering, Vol. 13, pp. 9-13. 1961.

[13] Fernandez de Rucoba D. Optimización del diseño a fatiga de unions soldadas a tope y su aplicación al dimensionamiento de soldaduras transversales de torres eólicas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Y Ciencia de los Materiales; Universidad de Cantabria. 2012.

[14] ASTM E647-13, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. American Society for Testing and Materials. 2013.



- [15] Radaj D. Review of fatigue-strength assessment of non-welded and welded structures based on local parameters. *International Journal of Fatigue* 1996; 18: 153-170.
- [16] Thomas D.J. Characterisation of steel cut edges for improved fatigue property data estimations and enhanced CAE durability. Tesis Doctoral. Materials Research Centre; School of Engineering; University of Wales. 2002.
- [17] Maddah N. Fatigue life assessment of roadway bridges based on actual traffic loads. Tesis Doctoral. Laboratoire de la Construction Métallique; École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2013.
- [18] Radaj D. Design and analysis of fatigue resistant welded structures. Abington Publishing. 1990.
- [19] Basquin O.H. The exponential law of endurance tests. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials* 1910; 10: 625-630.
- [20] Mason S.S. Behaviour of Materials under conditions of thermal stress. *Heat Transfer Symposium*; 9-75. Engineering Institute; University of Michigan. 1953.
- [21] Coffin L.F. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Transactions: American Society for Testing and Materials* 1954; 76: 931-950.
- [22] Coffin L.F. The problem of thermal stress fatigue in austenitic steels at elevated temperatures. *Transactions: American Society for Testing and Materials* 1954; 16: 31.
- [23] Fernandez de Rucoba D. Optimización del diseño a fatiga de unions soldadas a tope y su aplicación al dimensionamiento de soldaduras transversales de torres eólicas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Y Ciencia de los Materiales; Universidad de Cantabria. 2012.
- [24] Ellwood R. Fatigue performance of downgauged high strength steel automotive components. Tesis Doctoral. Materials Research Centre; School of Engineering; University of Wales. 2002.
- [25] Fisher J.W., Albrecht P.A., Yen, B.T. Klingerman D.J., McNamee, B.M. Report 147, Fatigue strength of steel beams with welded stiffeners and attachments. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board. 1974.



[26] EN 1993-1-9, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. European Committee for Standardization (CEN). 2005.

[27] ASSHTO, LRFD Bridge–Design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials (ASSTHO). 2012.

[28] BS 7608: 2013, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures. British Standard Institution (BSI). 2013.

[29] Schneider C.R.A., Maddox S. J. IIW-XIII-WG1-121r3-06, Guidance for the application of the best practice guide on statistical analysis of fatigue working sheets. International Institute of Welding. 2006.

[30] Reliasoft Corporation, 1992. Life data types.

[31] Draft International Standard ISO/DIS 14345. Fatigue testing of welded components. International Organization for Standardization. 2000.

[32] Bastenaire F. New method for the statistical evaluation of constant stress amplitude fatigue test results. Probabilistic Aspects of Fatigue 1972; ASTM STP 511: 3-28.

[33] ASTM E739-10, Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain life (ϵ -N) fatigue data. American Society for Testing and Materials. 2010.

[34] BS ISO 12107:2003, Metallic materials – Fatigue testing: Statistical planning and analysis of data. International Organization for Standardization. 2003.

[35] Little R.E., Ekvall J. C. Review of statistical analyses of fatigue life data using one sided lower statistical tolerance limits. Statistical Analysis of Fatigue Data 1981; ASTM STP 744: 3-23.

[36] Yu J. Development of data sheets for statistical evaluation of fatigue data. Tesina de Master. Department of Mechanical Engineering; University of Lappeenranta. 2007.

[37] Miki C. Nominal stress based fatigue design. Viva presentation.

[38] <http://pune.all.biz/oxy-fuel-cutting-s18488#.VE9clvJ0yP8>

[39] <http://www.waterside-training.co.uk/oxy-fuel-cutting--47.html>

[40] <http://www.alabamaplate.com/portfolio.php>



[41] http://www.hypertherm.com/en-us/Training_and_education/

[42] Ramakishnan S. Shrinet V. Polivka F.B. Kearney T.N. and Koulun P. Influence of gas composition on plasma arc cutting. Journal of Applied Physics 2000; 33: 2288-2299.

[43] <https://www.iedepot.ie/blog/plasma-cutter-work/>

[44] http://www.brilliantdesignonline.com/CNC_Plasma_Cutting.htm

[45] Plasma Cutting Process. ESAB. <http://www.esab.com>.

[46] EN ISO 6892-1:2010, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayos a temperatura ambiente. European Committee for Standardization (CEN). 2010.

[47] EN 1090-2:2011, Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero. European Committee for Standardization (CEN). 2011.

[48] Bannister A.C., Skolidakis M., Pariser A., Langenberg P., Gutierrez-Solana F., Sánchez L., Pesquera D., Azpiaz W. EUR 22056EN, Performance criteria for cold formed structural steels. Research Fund for Coal and Steel Unit (RFCS). European Commission. 2003.

[49] ASTM E739-10, Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain life (ϵ -N) fatigue data. American Society for Testing and Materials. 2010.