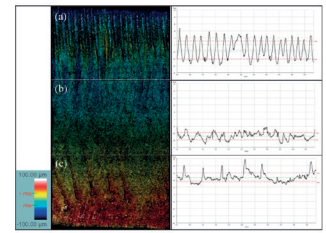


Influencia de la composición y el estado superficial de chapas de acero sobre el proceso de corte por láser



Composition and surface state influence in laser process for steel sheets



Joana Ramos¹, Sonia Moralejo¹, Jordi Figueras¹ e Aitzol Lamikiz²

¹ IK4-Ideko. Calle Arriaga, 2 - 20870 Elgoibar, Gipuzkoa (España).

² Universidad del País Vasco UPV/EHU. ETSII. Departamento de Ingeniería Mecánica. Alameda de Urquijo, s/n - 48013 Bilbao (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9677> | Recibido: 17/02/2020 • Inicio Evaluación: 30/09/2019 • Aceptado: 06/03/2020

ABSTRACT

- Laser cutting process is highly influenced by material composition and surface state before cutting. Variability in these elements involve changes in cutting parameter values (productivity) and cut quality (part acceptance or rejection). The vast majority of studies on this matter have been conducted employing CO₂ lasers, therefore, the aim of this analysis is to complete existing literature and update it with actual industrial trends which move towards the use of fibre lasers.
For this purpose, behaviour of three steel types (pickled steel, Ruukki and Hardox) with thicknesses of 6mm, 10mm and 15mm has been analysed, using the sheets just as they left the mill, with a superficial machining and superficial rust. Quality of obtained parts has been measured visually and through a confocal microscope, comparing roughness results with the standard UNE-EN ISO 9013 for thermal cuts.
Results have revealed three different existing quality zones (upper, centre, bottom) for thick materials (>6mm) and a single quality for the thin ones (≤6mm). Differences in quality and cutting parameter values between pickled steel and Hardox have been noticed, but not between pickled steel and Ruukki. Moreover, significant variations in cutting process have been observed when previous superficial rust is present, while machined surface has no effect on it.
- **Keywords:** laser cutting, fiber laser, steel, composition, surface state, surface finish, cutting parameters, edge quality.

RESUMEN

El proceso de corte por láser está influenciado por la composición del material y su estado superficial previo al corte. Variabilidades en estos dos elementos implican modificaciones en los valores de los parámetros de corte (productividad) y en la calidad obtenida (aceptación o rechazo de pieza).

Debido a que la gran mayoría de los estudios previos se han realizado con láseres de CO₂, este trabajo pretende complementar la literatura existente y actualizarla con las tendencias industriales actuales que se inclinan por el uso de láseres de fibra.

Para ello, se ha analizado el comportamiento de tres tipos de aceros (decapado, Ruukki y Hardox) con espesores de 6mm, 10mm y 15mm, utilizando las chapas tal y como llegan de fábrica, con mecanizado superficial u oxidación superficial. Se ha medido la calidad de las piezas obtenidas de forma visual y mediante

microscopio confocal, comparando las rugosidades con lo descrito en la norma UNE-EN ISO 9013 para cortes térmicos.

Los resultados han revelado que existen tres zonas diferenciadas en calidad (superior, central e inferior) para los materiales gruesos (>6mm) y una única calidad para los más finos (≤6mm). Se han observado diferencias en parámetros y calidad entre acero decapado y Hardox, pero no entre acero decapado y Ruukki. También han expuesto que la oxidación superficial previa conlleva variaciones significativas en el proceso, mientras que el mecanizado no lo hace.

Palabras clave: corte por láser, láser de fibra, composición, estado superficial, acabado superficial, parámetros de corte, calidad lateral.

1. INTRODUCCIÓN

El corte por láser es una técnica empleada para cortar chapas en la que se utiliza la energía del láser para fundir el material que a su vez se evacúa utilizando un gas a presión. Principalmente, está implementado en la industria para cortar materiales metálicos tales como el aluminio, el acero o el acero inoxidable, siendo especialmente el acero al carbono uno de los más utilizados. Este acero presenta a su vez una gran variabilidad en su composición en función del proveedor del material.

En la literatura, los investigadores centran el corte de acero al carbono utilizando oxígeno como gas de asistencia. Durante este proceso, la reacción de oxidación que convierte el hierro en FeO proporciona al corte una cantidad extra de energía que se traduce en un aumento de la capacidad de corte [1]. Esto es de especial importancia en los procesos de corte de materiales gruesos, debido a que la energía necesaria para llevar a cabo su corte con calidad aceptable es mayor.

Los principales estudios en torno al proceso de corte por láser se centran en determinar qué afecta a la calidad obtenida tras el corte. Las estrias, junto con la rebaba, son los defectos más comunes producidos durante el proceso de corte por láser, junto con la anchura superior e inferior del *kerf* (anchura del corte generado) y su desviación, la zona afectada por el calor, la rugosidad superficial, la formación de microgrietas y la dureza [2], entre otros. Pocorni et al. [3] estudian la dinámica de fluidos y la morfología del frente de corte en chapas de acero inoxidable gruesas con láser de fibra, obteniendo calidades de corte inferiores en materiales gruesos debido a la generación de montículos esporádicos en el material y a reflexiones múltiples del láser en el

kerf. Karatas et al. [4] también analizan la influencia del espesor de chapa durante el corte de acero con láser de CO₂, obteniendo peor calidad de corte a mayor espesor de chapa.

Los trabajos existentes para estudiar la calidad se dividen en (i) factores del entorno, como la máquina u operario; (ii) factores del proceso desarrollado, como potencia utilizada, velocidad de corte, presión del gas de aporte, plano focal o distancia de trabajo; y (iii) factores propios del material, como su espesor, composición o estado superficial.

El estudio realizado por Lugan et al. [5] se centra en analizar la influencia del efecto combinado máquina-operario en la calidad del corte obtenido frente a la composición del material y estado superficial, determinando que el binomio máquina-operario tiene menos peso.

Sobih et al. [6] estudian la influencia de la velocidad de corte en aceros de espesor fino con láser de fibra de 1kW de potencia. Al aumentar la velocidad observan que la calidad del corte pasa por varias fases (estriación, estrias pequeñas, libre de estrias, estrias pequeñas, estriación, sin corte), dejando un intervalo de velocidad de corte óptimo. Por encima o por debajo de él, aparecen estrias. John Powell [7] muestra similares resultados, analizando con detalle la influencia de la velocidad de corte sobre la rugosidad de la pieza y diferenciando la calidad en la parte superior e inferior del corte. Describe la formación de estrias en la parte superior del corte como "dominadas por el láser", y "controladas por el flujo de fundido" en la inferior. Thomas [8] investiga la influencia de los parámetros de corte en la calidad final de las piezas utilizando un láser de CO₂ para cortar acero de alta resistencia. Para los casos analizados, las mejores calidades obtenidas mantienen una relación directa entre potencia y velocidad de corte (baja-baja o alta-alta) y utilizan presiones de gas bajas. En cuanto al plano focal y a la distancia de trabajo, Sobih et al. [6] determinan que para chapas de 1mm y 2 mm el intervalo de focal libre de estriaciones es menor al aumentar el espesor o disminuir la distancia de trabajo. Con respecto a la presión del gas, Nagels et al. [9] observan que a presiones bajas hay aparición de rebaba debido a que la fuerza de expulsión no es suficiente para evacuar el material líquido al cortar un acero de 22mm con láser de CO₂. Yilbas [10] encuentra el mismo fenómeno en su estudio elaborado con chapas de acero 12 mm y láser de CO₂. Por el contrario, a presiones altas, hay un aumento del número de estrias. Atribuyen este aumento a una acción directa del oxígeno presente.

Con respecto a los análisis realizados en torno a factores propios del material, John Powell [7] afirma que los aceros inoxidables ferríticos o martensíticos contienen menos componentes de aleaciones que los austeníticos, pudiéndose cortar a velocidades ligeramente más altas. Thomas [8] indica que en aceros con alto contenido en silicio se produce una reacción con el oxígeno del gas de asistencia que aumenta la viscosidad del líquido, implicando variaciones significativas en la calidad de corte. Nagels et al. [9] encuentran que el azufre disminuye la tensión superficial y la viscosidad del acero, lo que se traduce en un proceso de corte más estable y una ventana de trabajo mayor. Manohar et al. [11] también confirman que la presencia de azufre mejora la calidad de corte. En otro estudio Manohar [12] indica que se necesita una mínima cantidad de elementos residuales (cobre, níquel y cromo) para asegurar un buen corte por láser de aceros gruesos (20-25mm) con láser de CO₂, tanto en aceros laminados como en granallados. Además, Manohar et al. [11] concluyen que los aceros que contienen cobre y níquel son los que mejores resultados de calidad ofrecen. No obstante, altos contenidos de cromo (>10%) deterioran la calidad de corte, sin importar la cantidad de cobre

y níquel. Ivarson et al. [13] presentan resultados para aceros gruesos (20 mm) con composiciones diferentes. Han encontrado que aumentar la cantidad de carbono ayuda a estabilizar el proceso, mientras que aumentar la cantidad de manganeso reduce la calidad de corte. Además, mencionan que el silicio genera un frente de corte que cambia la tensión superficial y la viscosidad del material fundido, resultando en velocidades de corte reducidas y adhesión de rebaba. Por último, Lugan et al. [5] estudian la influencia del acabado superficial del material sobre la rugosidad del corte, observando que la superficie brillante que genera un mecanizado no afecta a la calidad del corte, mientras que el granallado produce cortes con mayor rugosidad.

El análisis de la literatura refleja que la mayoría de los estudios existentes sobre cómo afecta el proceso de corte por láser a la calidad obtenida se han llevado a cabo con láseres de CO₂, con bajas potencias o en espesores finos. En el caso del tipo del láser, se debe principalmente a que los de CO₂ fueron los primeros en desarrollarse para este tipo de procesos y han sido los que mayormente se han utilizado en la industria. Hoy en día, la tendencia emergente es la de sustituir el láser de CO₂ por láser de fibra, ya que presentan ventajas como bajo consumo de energía, mayor productividad, mínimo mantenimiento y larga vida útil. Pero no sólo llevan asociados cambios en el equipamiento, ya que respecto a la calidad de corte, tal y como comenta Amara [14], las estrias son más profundas y pronunciadas en el corte con CO₂. Además, observa que para el caso de láser de fibra la máxima temperatura obtenida es mayor, lo que hace que el material se evacue más rápido, dando lugar a un proceso físico distinto.

El presente artículo se ha llevado a cabo con el objetivo de analizar la influencia de la composición y el estado superficial inicial de tres aceros gruesos sobre el proceso de corte por láser utilizando un láser de fibra. Este estudio pretende completar el vacío existente en torno a los procesos de corte con láser de fibra en espesores gruesos a alta potencia, de modo que los resultados obtenidos sirvan para complementar la literatura existente y actualizarla con las tendencias industriales actuales.

2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los experimentos se han llevado a cabo utilizando una fuente láser marca IPG de fibra de iterbio con una potencia máxima de salida de 4kW y 1068nm de longitud de onda. El haz láser se ha llevado mediante una fibra óptica de Ø100µm hasta un cabezal ProCutter de Precitec en el que se emplea una lente focal de 125mm.

Para analizar la influencia de la composición y estado superficial en las condiciones de corte y calidad resultante se ha desarrollado el proceso de corte en materiales de distinta composición, espesor, y tratamiento superficial previo. Se han escogido tres tipos de aceros al carbono utilizados habitualmente por empresas usuarias de máquinas de corte por láser que cuentan con distintas composiciones y propiedades mecánicas: un acero básico de construcción con un tratamiento superficial de decapado para eliminar las impurezas (Decapado), un acero optimizado para el corte por láser (Ruukki) y un acero resistente al desgaste y a la abrasión (Hardox). Cada chapa se ha dividido en 3 trozos. Para realizar el estudio comparativo que se presenta, una de las chapas se ha dejado intacta, otra se ha sometido a un proceso de mecanizado superficial y la tercer a un proceso de oxidado superficial. En la Tabla 1 se muestran las composiciones de los aceros utilizados.

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	N	B
Decapado	0,17	0,005	1,24	0,01	0,011	0,043	0,001	0,004	0,017	0,003	0,01	0,003	-	0,004	0,0001
Ruukki	0,097	0,02	0,95	0,009	0,008	0,047	-	0,004	0,018	0,013	0,05	0,04	0,004	0,003	-
Hardox	0,173	0,25	1,27	0,007	0,001	0,034	0,001	0,01	0,01	0,01	0,25	0,05	0,02	0,003	0,0011

Tabla 1. Composición química (%) de los aceros

El estudio se ha realizado con chapas de acero de espesores de 6mm, 10mm y 15mm. Para espesores de 6mm y 10mm, se han utilizado boquillas de 1,2mm de diámetro. Para 15mm de espesor, se han escogido boquillas de mayor diámetro (2mm), ya que al ser un material más grueso requiere más caudal de gas. En todos los casos, se ha utilizado una distancia de 0,8mm entre chapa y cabezal, potencia máxima (4kW) y oxígeno como gas de asistencia.

Mediante los ensayos realizados se ha buscado tener la máxima velocidad de corte con la máxima calidad. A la hora de evaluar la calidad durante el desarrollo del proceso de corte e ir ajustando los parámetros de proceso se ha tomado el factor visual como primera aproximación. Todos los ensayos se han realizado cortando cuadrados de 25x30mm. Se ha comenzado obteniendo la velocidad máxima de corte para el acero decapado, definiendo a su vez los valores para los demás parámetros, y a partir de estos, se han modificado la velocidad, presión y focal hasta conseguir la velocidad máxima de corte para los demás casos.

No obstante, además de un análisis visual con el que se ha determinado cualitativamente la calidad final de las piezas, se ha medido la rugosidad con un microscopio confocal para las piezas con la mejor combinación entre velocidad de corte y calidad. Para cada pieza, se han realizado tres repeticiones en tres zonas diferenciadas por distintas calidades de corte. La evaluación de la calidad de las piezas medidas en el microscopio confocal se ha hecho con respecto a la norma UNE-EN ISO 9013 (Julio 2017) para cortes térmicos. Según está descrito en la norma, la calidad de las superficies cortadas mediante procesos de corte térmico se describe por medio de los valores Rz de rugosidad. La norma presenta cuatro rangos de calidad, y aunque este sea un aspecto subjetivo, los dos primeros rangos se consideran cortes con buena calidad [5]. En general, no se espera alcanzar el primer rango de calidad a no ser que sea un requerimiento específico, con lo que conseguir cortes dentro del segundo rango se tomará como buen resultado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos realizados se ha encontrado un patrón de calidad de corte para los espesores más gruesos analizados (10mm y 15mm), al igual que describe Powell [7] para aceros cortados utilizando láser de CO₂. En la Fig.1 se diferencian tres zonas de distinta calidad, correspondientes a la parte superior de la chapa, la central y la inferior para un acero decapado de 15mm de espesor. Se ha medido la amplitud de las estrias generadas en las tres zonas de la cara lateral de la chapa, observándose más estriado en la parte superior (Fig.1(a)) que en la inferior (Fig.1(c)). Tal y como explica Powell [7] en su investigación, la zona superior (Fig.1(a)) es la que está controlada por el láser, donde se observan estrias con frecuencia y amplitud casi constantes. La zona central (Fig.1(b)) es la más uniforme, ya que está en torno al punto focal del haz. Eso hace que la mayor cantidad de energía esté concentrada en esa región, facilitando tener un flujo constante de material. En la zona inferior (Fig.1(c)) se aprecian estrias aleatorias, controladas por el flujo del metal líquido. Las estrias que aparecen en la pieza reflejan que, aunque la energía introducida en la zona de corte (láser y oxígeno) sea constante, la interacción existente entre el

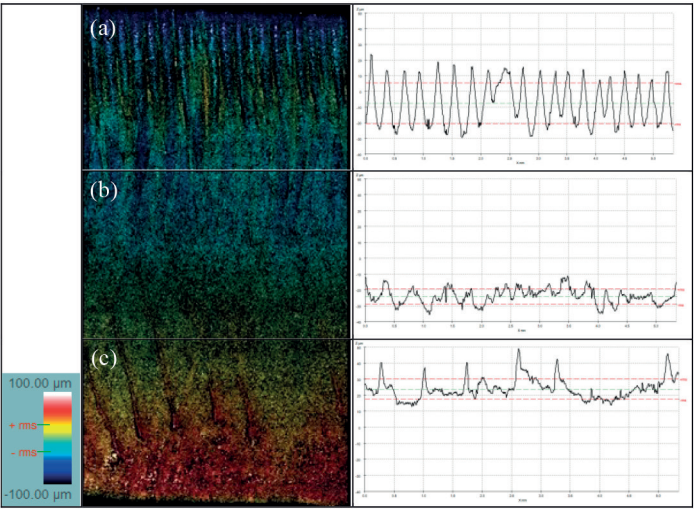


Fig. 1: Imagen tomada con microscopio confocal para una chapa de acero decapado de 15mm donde se diferencian tres zonas de calidad. Las gráficas de la derecha muestran el detalle del estriado presente

material y esa energía se comporta de manera cíclica. Este efecto no es tan pronunciado en el menor de los espesores estudiados. En el caso de las chapas de 6mm (Fig.3(a,b,c)) toda la cara muestra estrias uniformes, lo que sugiere que en este rango de espesor el corte está controlado sobre todo por la energía del láser.

3.1. EFECTO DE LA COMPOSICIÓN

El análisis del efecto de la composición de los tres tipos de aceros se ha llevado a cabo utilizando las chapas tal y como llegan de fábrica, sin procesos posteriores de oxidación ni mecanizado. Se han comparado el Ruukki y el Hardox con el acero decapado, por ser este último el más básico y utilizado en la industria.

3.1.1. Parámetros de corte

Para el análisis del efecto de la composición sobre los parámetros de corte se han determinado los valores correspondientes a los parámetros de proceso para cada una de las chapas objetivo, buscando tener la máxima productividad con la máxima calidad.

El estudio revela que no hay diferencia reseñable en velocidad entre el acero decapado y Ruukki (Fig.2(izq)), parámetro que afecta de un modo más directo a la productividad, y sí más notable entre los valores de los parámetros de corte de acero decapado y Hardox. En la Fig.2(dcha), se observa una reducción de velocidad entre el decapado y el Hardox de hasta un 10%, para los espesores de 6 y 10mm. Esto se debe principalmente a la diferencia en la cantidad de silicio, ya que el Hardox contiene un alto porcentaje en peso de silicio (0,367%), mientras que su presencia en el acero decapado y el Ruukki es menor (0,006% y 0,02%, respectivamente). El silicio es un elemento que modifica la tensión superficial y la viscosidad del material, reduciendo la velocidad de corte tal y como se aprecia en la Fig.2, estando estos resultados en concordancia con investigaciones anteriores [13]. En las chapas de 15mm de los tres materiales se aprecia un comportamiento diferente. Debido a que la cantidad de material fundido que hay que expulsar por el kerf es mayor, el caudal del gas utilizado se convierte en el parámetro con más relevancia del proceso, quitándosela a la velocidad de corte.

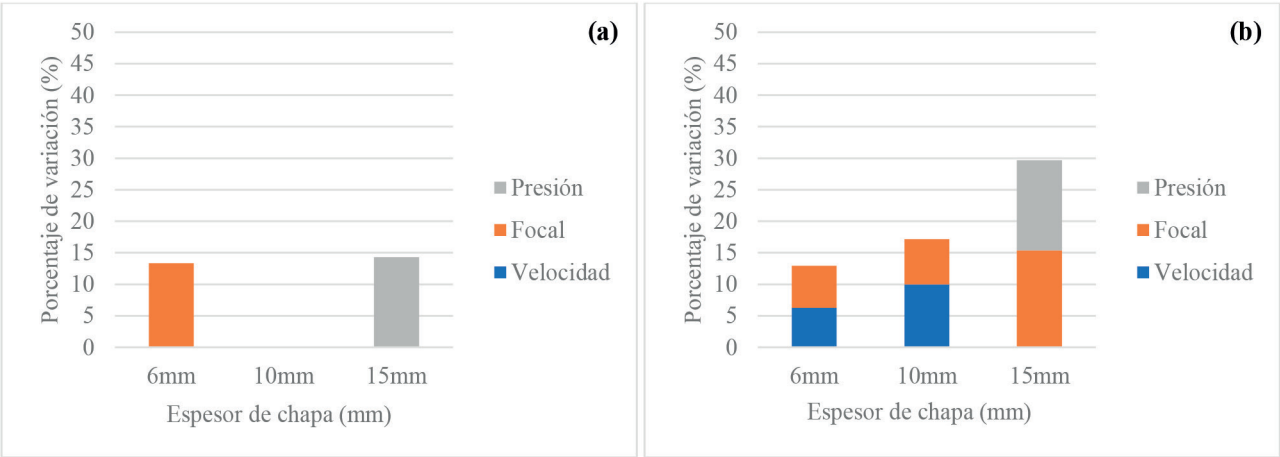


Fig. 2: Porcentaje de variación de cada parámetro de corte entre composiciones para cada espesor. Comparativa entre:(a) acero decapado y Ruukki (b) acero decapado y Hardox

Además, la reducción en velocidad que se experimenta en las chapas de 15mm conlleva que para mantener una buena calidad de corte se requieran cambios en la presión y la focal, pero no en la velocidad, ya que podrían aparecer más fácilmente inestabilidades en el proceso.

3.1.2. Calidad de corte

Durante la obtención de los parámetros de corte óptimos, el primer análisis que se hace en entornos industriales es visual, ya que normalmente no se cuenta con sistemas de medición avanzados en los alrededores de la máquina. Teniendo en cuenta esta observación, la calidad del acero decapado (Fig.3(a)) es superior a la del Ruukki (Fig.3(b)), ya que éste muestra estrías. Por otra parte, el Hardox (Fig.3(c)) muestra una buena calidad superficial pero se aprecia rebaba en la parte inferior. El aumento de cantidad de rebaba se achaca a la cantidad de silicio que contiene el Hardox (0,367%), que al aumentar éste la viscosidad del material, impulsa la aparición de rebaba [13].

Los resultados del análisis visual se han corroborado midiendo la rugosidad de las piezas en el microscopio confocal mostradas en la Fig.3. La Tabla 2 muestra los datos de rugosidad Rz en las tres zonas diferenciadas en calidad (parte inferior, centro y parte superior) que se han obtenido de las mediciones del microscopio confocal. La mayoría de los datos están dentro del segundo rango de calidad descrito en la norma (color negro), confirmando que la calidad obtenida en las piezas finales es adecuada. El primer

MATERIAL	ESPESOR (mm)	Rugosidad Rz (μm)		
		Parte inferior	Centro	Parte superior
DECAPADO	6	26,040	14,403	10,428
RUUKKI	6	20,497	16,037	22,760
HARDOX	6	20,580	11,680	10,844
DECAPADO	10	21,630	20,127	37,657
RUUKKI	10	33,257	16,717	35,853
HARDOX	10	39,483	19,650	61,427
DECAPADO	15	22,240	34,723	32,097
RUUKKI	15	32,130	40,290	40,153
HARDOX	15	36,330	43,073	118,500

Tabla 2: Parámetros de rugosidad Rz (μm) para chapas sin tratar. En verde, primer rango de calidad; en negro, segundo rango de calidad; en rojo, tercer rango de calidad

rango de calidad (color verde) solo se ha obtenido para el espesor de 6mm, ya que para espesores más bajos la rugosidad lateral es inferior [3],[4]. También se observan dos casos (Hardox 10mm y 15mm) en los cuales la parte superior de la pieza supera el segundo rango de calidad (color rojo), lo cual podría suponer el rechazo de la pieza dependiendo de su aplicación final. Al ser la zona alta de la pieza la controlada por la energía del láser, se considera que se necesita más potencia para cortar este material con buena calidad en toda la pieza. En la Fig.3 se presenta una comparación entre

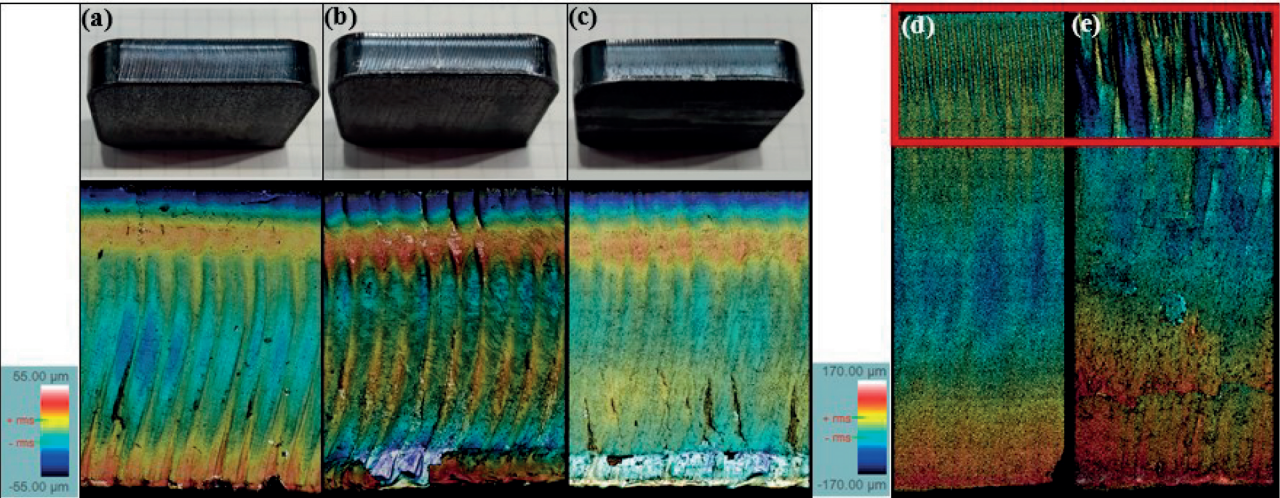


Fig. 3: Calidad de corte visual y mediciones del microscopio confocal para un espesor de 6mm de (a) acero decapado (b) Ruukki (c) Hardox. Imágenes obtenidas con microscopio confocal para un espesor de 15mm (d) acero decapado (e) Hardox

acero decapado con buena calidad (Fig.3(d)) y Hardox con calidad inferior (Fig.3(e)) para un espesor de 15mm, donde se visualiza en el recuadro rojo la diferencia en calidad entre los dos materiales.

Los resultados muestran que para distintas composiciones es posible obtener una calidad que cumpla el segundo rango de la norma, empeorando la calidad en el caso del Hardox a medida que aumenta el espesor.

3.2. EFECTO DEL ESTADO SUPERFICIAL

Para determinar el efecto de las diferencias superficiales en el proceso de corte, se han simulado dos casos típicos a nivel industrial. Para ello, a una parte de las chapas de cada una de las composiciones y de sus espesores se les ha realizado un mecanizado superficial fresando 0,1mm y a otra parte una oxidación superficial dejando actuar durante un día un producto utilizado para el pulido electrolítico. Esto ha permitido realizar el proceso de corte en chapas con idéntica composición y diferencia en su estado superficial. El análisis que se presenta es solo para acero decapado, debido a que ha sido el que se ha tomado como base en este trabajo.

En este segundo apartado es necesario destacar que si la oxidación es irregular y hay variaciones significativas donde el óxido está más acentuado, el corte falla en las partes con el óxido más marcado. Por este motivo, el análisis de la oxidación realizado en este estudio ha sido con niveles de oxidación homogéneos.

3.2.1. Parámetros de corte

El estudio revela que la oxidación es el efecto más influyente. En la Fig.4 se observa que la variación en los parámetros de corte que supone el cambiar de acero sin tratar a oxidado es mucho más notable que la variación que hay entre acero sin tratar y mecanizado.

El gran efecto que muestra la oxidación superficial en los parámetros de corte (Fig.4(dcha)) se explica porque, tal y como describe Powell en su investigación [7], el óxido es un material poroso que retiene una cantidad significativa de humedad. La combinación entre los óxidos de hierro y el agua asociada dificultan el corte, ya que el vapor desprendido al hervir esta agua interfiere con la reacción de oxidación diluyendo el flujo de oxígeno. Al reducir la energía creada por la reacción entre el oxígeno y el acero, se necesita introducir energía al sistema por otra vía. En este caso, se ha optado por reducir la velocidad de corte para incidir durante más tiempo en una misma zona y variar la posición focal, agrandando el surco para facilitar la expulsión del material, siendo la focal el parámetro más afectado. En el caso del espesor de 15mm, no

ESTADO	ESPESOR (mm)	Rugosidad Rz (μm)		
		Parte inferior	Centro	Parte superior
NORMAL	6	26,040	14,403	10,428
MECANIZADO	6	20,900	13,863	28,140
OXIDADO	6	17,413	10,450	7,991
NORMAL	10	21,630	20,127	37,657
MECANIZADO	10	21,517	15,037	28,520
OXIDADO	10	22,447	33,130	55,920
NORMAL	15	22,240	34,723	32,097
MECANIZADO	15	29,863	30,893	39,840
OXIDADO	15	24,973	46,119	60,357

Tabla 3: Parámetros de rugosidad Rz (μm) para chapas de acero decapado. En verde, primer rango de calidad; en negro, segundo rango de calidad; en rojo, tercer rango de calidad

ha sido posible reducir más la velocidad ya que se produciría un proceso inestable, tal y como sucedía en la comparativa realizada en el apartado anterior. Por eso, para compensar el efecto que tiene la velocidad en espesores más finos, se ha variado la presión.

En lo que respecta al mecanizado (Fig. 4 (izq)), los valores observados permiten concluir que este estado superficial no tiene influencia significativa en los parámetros de corte. En general, se mantienen los mismos valores que en el caso del estado superficial sin tratar. Esto ocurre debido a que el cambio en reflectividad que supone el mecanizar la superficie del acero no hace que se pierda la energía suficiente como para tener que introducir más energía al sistema.

3.2.2. Calidad de corte

Como en apartados anteriores, se ha realizado tanto un análisis visual de las piezas como mediciones con el microscopio confocal para determinar su calidad. Analizando los valores de rugosidad Rz obtenidos a partir de las mediciones con el microscopio confocal mostrados en la Tabla 3, se observa que casi todos los valores se encuentran dentro del segundo rango de calidad de la norma (color negro). Los valores de rugosidad más bajos corresponden al espesor de 6mm, entrando incluso en el primer rango de calidad (color verde), ya que, tal y como se ha visto en el análisis de la influencia de la composición, la rugosidad va aumentando a medida que aumenta el espesor [3],[4].

Estos valores muestran que las piezas cortadas con óxido superficial presentan calidades de corte inferiores en espesores

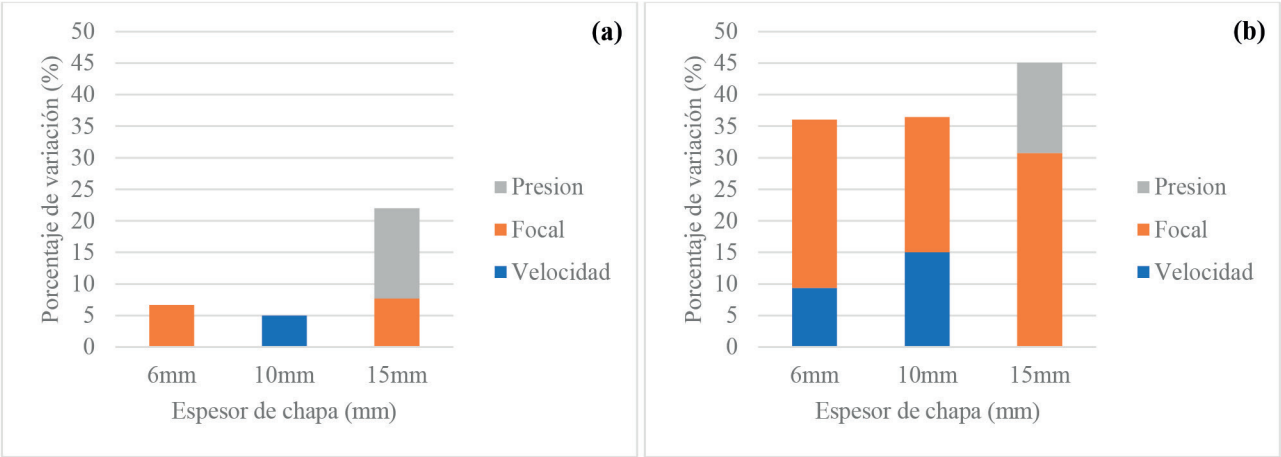


Fig. 4: Porcentaje de variación de cada parámetro de corte entre estados superficiales para cada espesor. Comparativa entre: (a) sin tratar y mecanizado (b) sin tratar y oxidado

gruesos (10mm y 15mm), presentando incluso zonas con calidad en el tercer rango (color rojo), mientras que en el más fino (6mm) se ha obtenido una buena calidad en toda la pieza, obteniendo zonas con calidad en el primer rango. La reducción de velocidad que se ha necesitado para obtener un corte estable en la chapa con oxidación superficial de 6mm ha permitido obtener una calidad superior a otros casos. Para espesores más gruesos, el cambio en los parámetros de corte no ha sido causa suficiente para evitar los defectos. Estos aparecen en la parte superior de la pieza, y al estar estas estrías controladas por la energía del láser, se necesitaría un aumento en la potencia para prevenirlas. Por otro lado, aunque a simple vista parece que la superficie mecanizada ofrece una calidad de corte ligeramente mejor, la variación en rugosidad no es muy elevada, con lo que el mecanizar la superficie no tiene influencia significativa en la calidad lateral. Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, la energía perdida por el aumento de reflectividad en las chapas mecanizadas no es notable a nivel de proceso, con lo que los resultados apenas varían con respecto a los de las chapas sin tratar.

Según se observa en la Fig.5, la mejor calidad lateral para el espesor de 10mm la ofrece la pieza con la superficie mecanizada (Fig.5(b)). La pieza de acero sin tratar (Fig.5(a)) muestra alguna estría más en la parte inferior y la pieza con oxidación superficial (Fig.5(c)) presenta estrías más profundas en toda la cara.

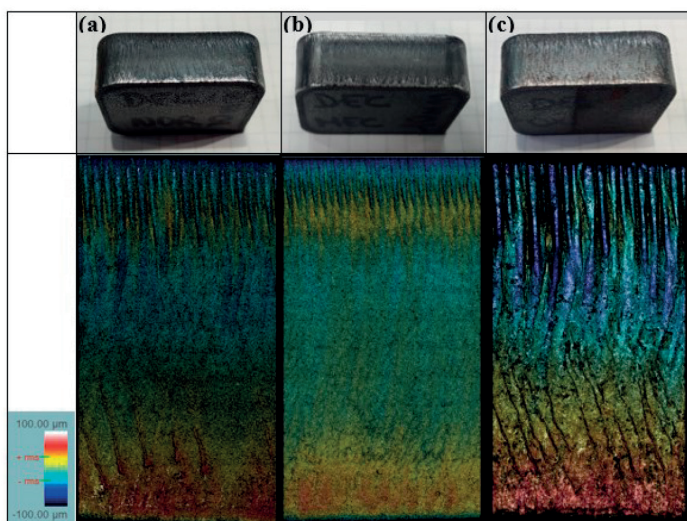


Fig. 5: Calidad de corte visual y mediciones del microscopio confocal para un espesor de 10mm de (a) acero sin tratar (b) mecanizado superficial (c) oxidación superficial

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia de la composición de tres tipos de aceros (decapado, Ruukki y Hardox) y su estado superficial (original, oxidado y mecanizado) en el proceso de corte utilizando un láser de fibra.

Los resultados revelan lo siguiente:

- En el caso de los materiales más gruesos (>6mm) se aprecian tres calidades de corte en el lateral de las piezas cortadas: zona superior controlada por el láser, central cerca de la posición del foco del haz e inferior controlada por el flujo del material; para los más finos (≤ 6 mm) se aprecia una única calidad en toda la pieza.
- Las piezas cumplen con el segundo rango de calidad definido por la norma, mostrando una calidad adecuada. Las excepciones son los espesores 10mm y 15mm de la composición Hardox y el estado superficial oxidado que corresponden al tercer rango en

la parte superior, con lo que, dependiendo de la aplicación final y los procesos posteriores, podrían ser rechazadas.

- Las variaciones en la composición química ocasionan cambios en los parámetros de corte y la calidad final, siendo la cantidad de silicio el factor predominante.
- Entre los materiales estudiados, el Hardox es el material con más porcentaje de silicio en su composición, mostrando grandes variaciones en los parámetros de corte, adhesión de rebaba y aumento en la rugosidad lateral en los espesores más gruesos.
- No se han visto diferencias significativas en el proceso de corte entre el Ruukki y el acero decapado, debido a que las composiciones apenas varían de un material a otro.
- Trabajar con chapas oxidadas superficialmente supone una gran variación en parámetros de corte y pérdida de calidad en espesores gruesos, debido a que la humedad retenida por el óxido interfiere con la posterior reacción de oxidación.
- La influencia del mecanizado superficial en el proceso láser no es representativa.

REFERENCIAS

- [1] J. Powell, D. Petring, R. V. Kumar, S. O. Al-Mashikhi, A. F. H. Kaplan, y K. T. Voisey, «Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, n.º 1, p. 015504, ene. 2009 <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/1/015504>
- [2] A. Sharma y V. Yadava, «Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials - A review», *Optics & Laser Technology*, vol. 98, pp. 264-280, ene. 2018 <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.002>
- [3] J. Pocorni, J. Powell, E. Deichsel, J. Frostevarg, y A. F. H. Kaplan, «Fibre laser cutting stainless steel: Fluid dynamics and cut front morphology», *Optics & Laser Technology*, vol. 87, pp. 87-93, ene. 2017 <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.08.002>
- [4] C. Karatas, O. Kees, I. Uslan, y Y. Usta, «Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, n.º 1, pp. 22-29, feb. 2006 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.08.017>
- [5] A. Lugan, P. A. Hilton, y D. W. Taylor, «The effects of steel composition on the laser cut edge quality of carbon and C-Mn steels», en *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Scottsdale, Arizona, USA, 2002, p. 161912 <https://doi.org/10.2351/1.5066146>
- [6] M. Sobih, P. L. Crouse, y L. Li, «Elimination of striation in laser cutting of mild steel», *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, n.º 22, pp. 6908-6916, nov. 2007 <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/009>
- [7] J. Powell, *CO2 Laser Cutting*. London: Springer London, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3384-1>
- [8] D. J. Thomas, «The effect of laser cutting parameters on the formability of complex phase steel», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, n.º 9-12, pp. 1297-1311, feb. 2013 <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4087-2>
- [9] E. Nagels, J. R. Dufloy, y J. Van Humbeeck, «The influence of sulphur content on the quality of laser cutting of steel», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 194, n.º 1-3, pp. 159-162, nov. 2007 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.103>
- [10] B. S. Yilbas, «Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, n.º 1-3, pp. 285-290, may 2008 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.265>
- [11] M. Manohar, R. L. Bodnar, R. I. Asfahani, N. Chen, y C. Huang, «Effect of steel composition on the laser cutting behavior of 25-mm-thick plates», *Journal of Laser Applications*, vol. 17, n.º 4, pp. 211-218, nov. 2005 <https://doi.org/10.2351/1.2080327>
- [12] M. Manohar, «CO2 laser beam cutting of steels: Material issues», *Journal of Laser Applications*, vol. 18, n.º 2, pp. 101-112, may 2006 <https://doi.org/10.2351/1.2193173>
- [13] A. Ivarson, J. Powell, y J. Siltanen, «Influence of Alloying Elements on the Laser Cutting Process», *Physics Procedia*, vol. 78, pp. 84-88, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.020>
- [14] E.-H. Amara, K. Kheloufi, y T. Tamsaout, «Wavelength effect on striation formation during metal laser cutting», en *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Atlanta, Georgia, USA, 2015, pp. 950-954 <https://doi.org/10.2351/1.5063243>