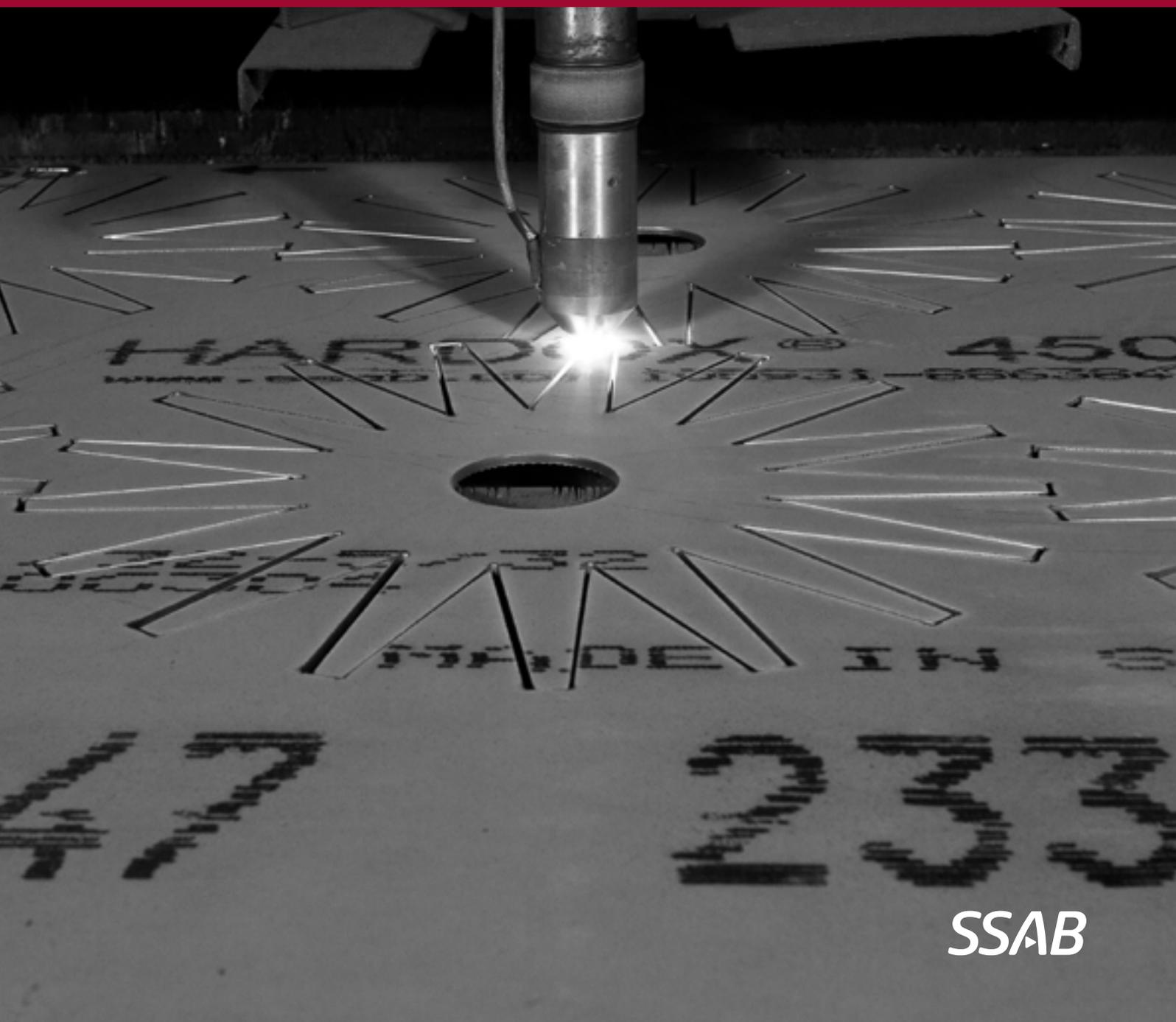


**HARDOX<sup>®</sup>**  
WEAR PLATE

# CORTE HARDOX<sup>®</sup>



**SSAB**

# ÍNDICE

Corte de la plancha antidesgaste Hardox®	3
Métodos de corte	4
<i>Oxicorte</i>	4
<i>Corte por plasma</i>	5
<i>Corte con láser</i>	6
Propiedades de dureza en la zona afectada por el calor (HAZ)	7
Riesgos de corte	8
<i>Agrietamiento inducido por hidrógeno</i>	8
<i>Hidrógeno</i>	12
Medidas para evitar el agrietamiento inducido por hidrógeno	12
<i>Pre calentamiento</i>	13
<i>Post calentamiento</i>	14
<i>Reducción de la velocidad de corte</i>	15
<i>Enfriamiento lento</i>	15
Reblandecimiento	16
<i>Reducción del riesgo de reblandecimiento</i>	17
Consejos prácticos	18
<i>Manipulación de chapas</i>	18
<i>Pre calentamiento y post calentamiento</i>	19

# CORTE DE LA CHAPA ANTI-DESGASTE HARDOX®

## CALIDADES DE HARDOX®

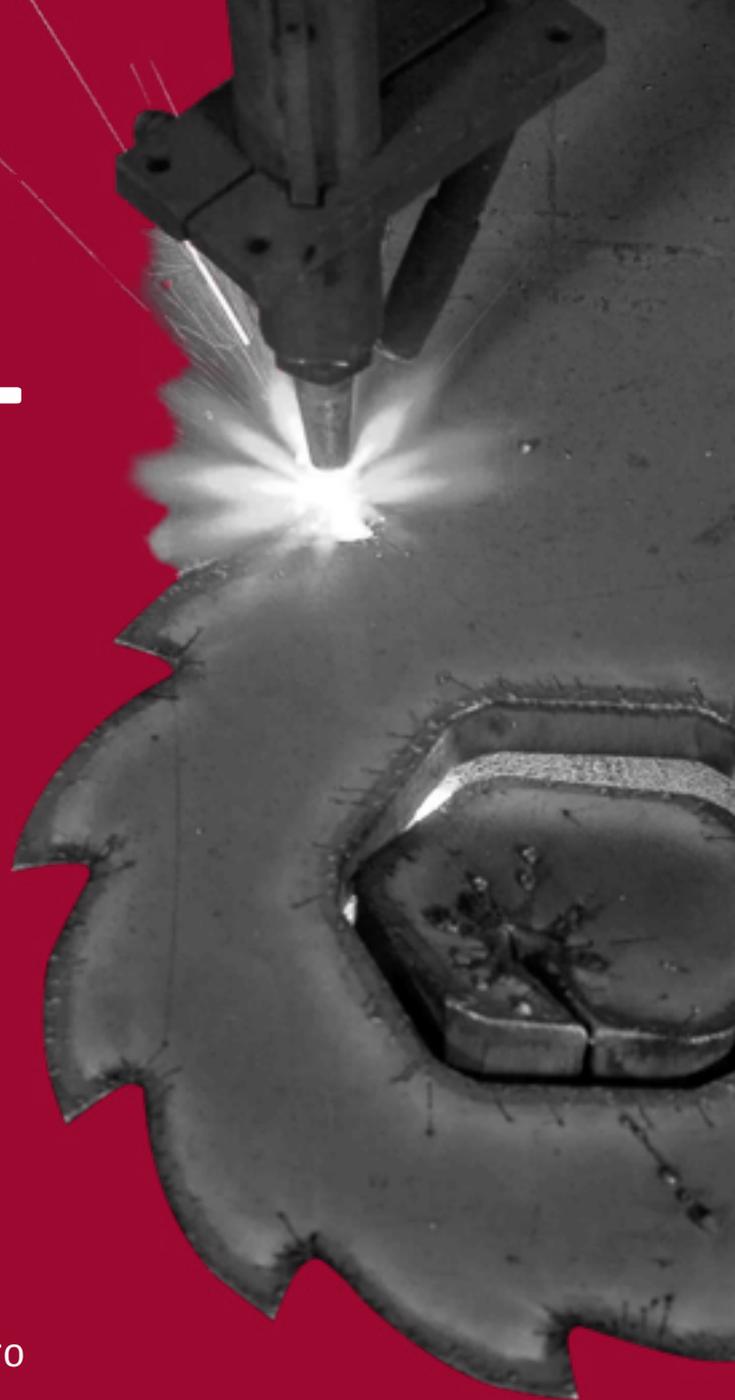
Los grados del acero Hardox® son adecuados para todos los métodos de corte térmico, incluido el oxicorte, el corte por plasma y el corte con láser. Aunque también, que duda cabe, puede utilizar muchos de los procesos de corte en frío normales, como el corte por chorro de agua abrasivo (AWJ) y el serrado.

El rendimiento mejorado en el corte térmico de los grados de acero Hardox® se debe principalmente a su bajo contenido de aleación y a sus bajos niveles de impurezas. Para el corte por láser también se pueden utilizar otras propiedades favorables, entre las que se incluyen las tolerancias de espesor estrechas y superficies lisas de la chapa de acero. Muchas de las calidades de acero Hardox®, sobre todo las que presentan espesores moderados, se pueden cortar térmicamente utilizando los mismos parámetros que se emplean con los aceros al carbono. En algunos casos, tendrá que adaptar los parámetros para minimizar el riesgo de agrietamiento inducido por hidrógeno. Entre otras cuestiones que deben tenerse en cuenta en relación con las características del acero se encuentran:

- ▶ El cambio de las propiedades mecánicas en la zona del acero afectada por el calor (ZAC) debido al corte.

- ▶ Las deformaciones causadas por el corte térmico. Debido a unos niveles de tensión más altos, las chapas de acero Hardox® son propensas a moverse más durante el corte térmico que los aceros ordinarios.

Los gases para los diferentes métodos de corte térmico se seleccionan y aplican del mismo modo que para los aceros no aleados y de baja aleación con límites elásticos de hasta 355 MPa. Existen diferentes composiciones de gas y parámetros de aplicación adecuados para los métodos de corte térmico. SSAB no tiene nada más que recomendar a este respecto para las calidades de acero Hardox®. Los métodos de corte en frío, cizallamiento y punzonado, se limitan al acero Hardox® 400 y Hardox® 450 con espesores de chapa de hasta 10 mm. El corte por chorro de agua abrasivo (AWJ) es un método de corte en frío que ofrece unas propiedades mecánicas ventajosas, ya que ninguna zona se ve afectada por el calor.





# MÉTODOS DE CORTE

## OXICORTE

El acero antidesgaste Hardox® se corta fácilmente mediante oxicorte. El oxicorte casi no tiene limitaciones en cuanto al espesor del material, por lo que se pueden cortar espesores de material de hasta 1000 mm. El espesor mínimo recomendado para el corte es de 10 mm. El corte de materiales más finos debe realizarse con métodos en los que el aporte de calor sea bajo, como el corte por plasma o con láser, para minimizar el riesgo de deformación y pérdida de dureza. Las características generales para el oxicorte se pueden ver en la Tabla 1.

Normalmente se cree equivocadamente que para cortar aceros duros se necesita una presión de oxígeno de corte más alta. El oxicorte es un proceso térmico cuyo rendimiento no se ve afectado por la dureza del acero. La chapa de acero antidesgaste Hardox® tiene un concepto de baja aleación que, sumado a la limpieza del acero, facilita el corte.

Método de corte	Anchura de corte	Zona afectada por el calor (ZAC)	Tolerancias dimensionales
Oxicorte	2-5 mm	4-10 mm	± 2,0 mm

**Tabla 1:** Características general del oxicorte.

## CORTE POR PLASMA

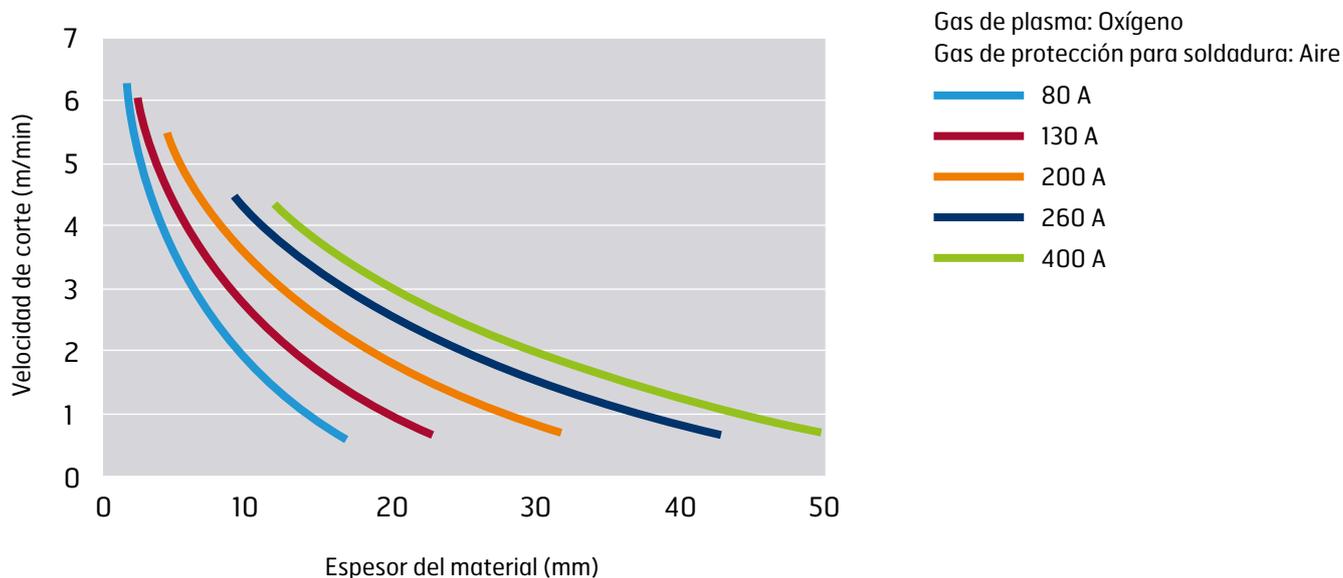
El acero Hardox® se corta fácilmente mediante el corte por plasma. Este tipo de corte se ve limitado en cuanto al espesor del material. El espesor principal que se va a cortar debe ser inferior a 50 mm (dependiendo de la máquina de corte por plasma). Las características generales para el oxicorte se pueden ver en la Tabla 2.

En la Figura 1 se muestra la velocidad de corte en función del espesor del material y la energía disponible para el corte por plasma.

No hay diferencia en el corte por plasma del acero antidesgaste Hardox® en comparación con el acero al carbono ordinario. Aunque durante el corte por plasma, en comparación con el oxicorte, existe una menor necesidad de precalentamiento o postcalentamiento. Sin embargo, al cortar por plasma chapa gruesa Hardox® con oxígeno como gas de plasma, es posible que requiera pre o postcalentamiento. Para evitar el agrietamiento del borde de corte, utilice los mismos parámetros que para el oxicorte (Tabla 6).

Método de corte	Anchura de corte	Zona afectada por el calor (ZAC)	Tolerancias dimensionales
Corte por plasma	2-6,5 mm	2-5 mm	± 1,0 mm

**Tabla 2:** Características general del oxicorte.



**Figura 1:** Velocidades de corte generales para diferentes fuentes de energía de plasma.





## CORTE CON LÁSER

El corte con láser del acero Hardox® se puede realizar fácilmente utilizando los parámetros de procesamiento normales para el espesor del material en cuestión. El espesor máximo debe ser de aproximadamente 30 mm, dependiendo del equipo de corte con láser. Los espesores de corte más comunes son inferiores a 25 mm. Las características generales para el corte con láser se pueden ver en la Tabla 3.

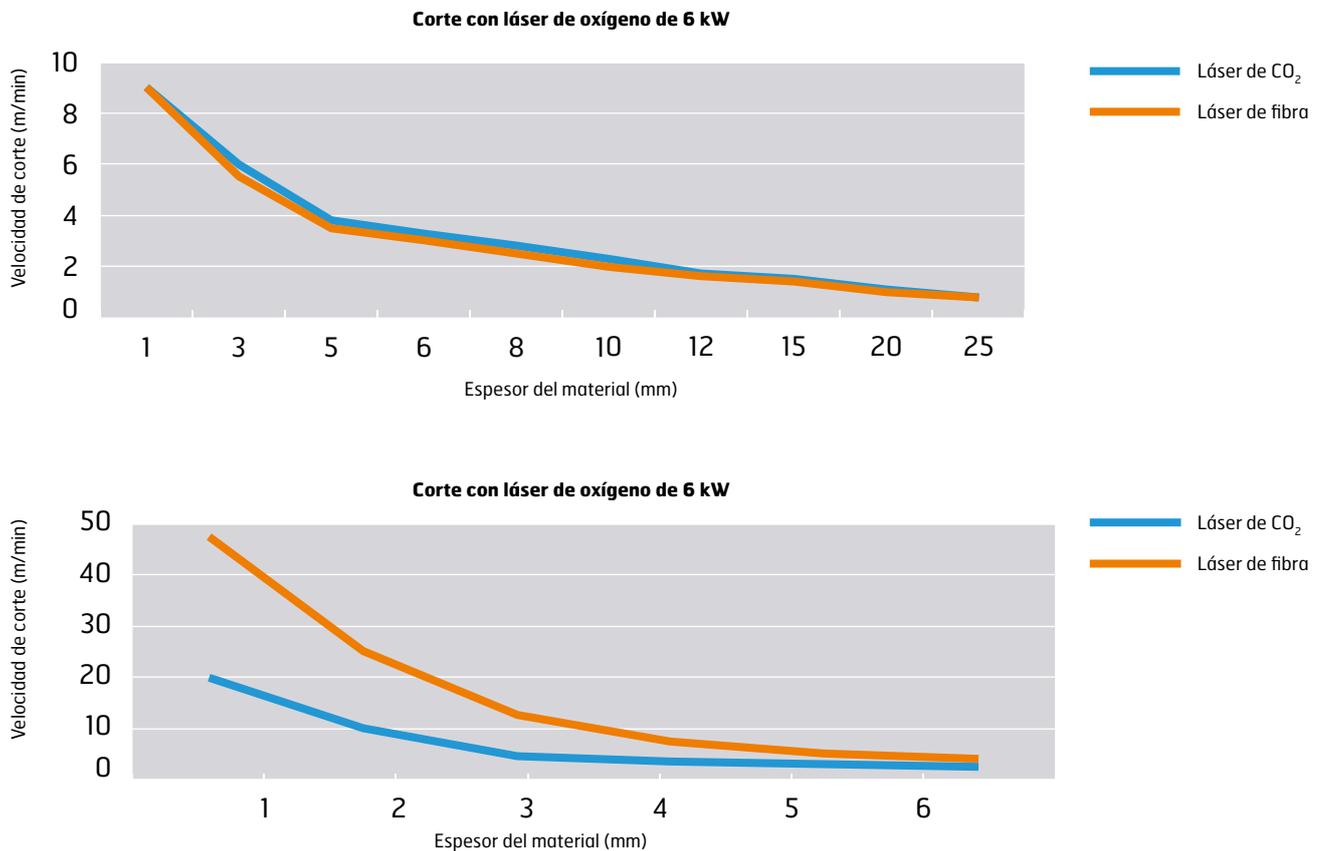
Una de las ventajas que ofrece el corte con láser es una velocidad de corte alta. En la Figura 2 se muestra la velocidad de corte en función del espesor del material, el tipo de láser y la potencia del láser.

Debido a los espesores relativamente finos y al pequeño impacto térmico, durante el corte con láser de los aceros Hardox® no se requiere precalentamiento ni postcalentamiento. Por el contrario, el precalentamiento afecta negativamente a la calidad del borde cortado.

Si comparamos el corte con láser del acero Hardox® con el del acero dulce ordinario, no existen diferencias, por lo que puede utilizar los mismos parámetros de proceso. El imprimante reduce la velocidad de corte, pero esto se puede solucionar vaporizando en primer lugar el imprimante y cortando a continuación el contorno a la máxima velocidad.

Método de corte	Anchura de corte	Zona afectada por el calor (ZAC)	Tolerancias dimensionales
Corte por láser	< 1 mm	0,2 – 2 mm	± 0,2 mm

**Tabla 3:** Características generales para el corte con láser.



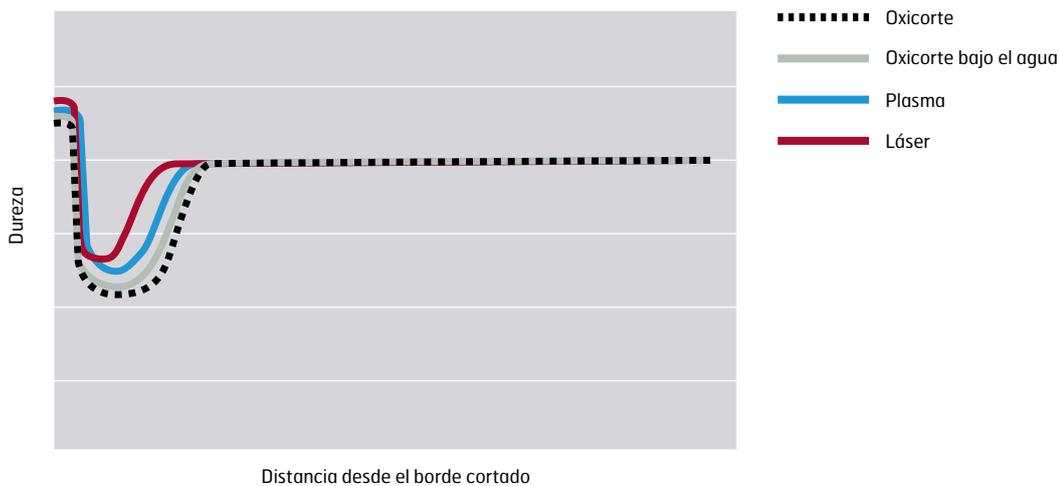
**Figura 2:** Velocidad de corte con láser.

# PROPIEDADES DE DUREZA EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)

Las propiedades de la zona afectada por el calor dependen de:

- ▶ Si el acero se templó o no durante la fabricación y, si es así, cómo se llevó a cabo
- ▶ La composición química del acero
- ▶ El impacto del tratamiento térmico del proceso de corte

El ancho de la zona afectada por el calor aumenta con el aumento del impacto térmico derivado del proceso de corte. Por ejemplo, cortar con la misma potencia y reducir la velocidad de corte resulta en una zona afectada por el calor de mayor anchura. Los diferentes procesos de corte térmico ejercen impactos térmicos distintos, ofreciendo como resultado una zona afectada por el calor de mayor o menor anchura. El oxicorte es el método que ejerce un mayor impacto térmico seguido del corte por plasma y con láser. En la Figura 3 se muestra la zona afectada por el calor para calidades de acero Hardox® cortadas con diferentes métodos de corte térmico.



**Figura 3:** Esquema de perfiles de dureza en la zona afectada por el calor tras el corte térmico del acero antidesgaste Hardox® con diferentes métodos de corte.

# RIESGOS DE CORTE

## GRIETAS INDUCIDAS POR HIDRÓGENO

El agrietamiento de los bordes cortados es un fenómeno que está estrechamente relacionado con el agrietamiento inducido por hidrógeno en soldaduras y suele producirse cuando se utilizan métodos de corte térmico. Si se producen grietas en el borde cortado, estas se harán visibles en un plazo que varía de 48 horas a varias semanas después del corte. El riesgo de agrietamiento de los bordes cortados aumenta con la dureza del acero y el espesor de la chapa, tal y como se muestra en la Tabla 4. A pesar de que el agrietamiento de los bordes cortados está relacionado normalmente con el corte térmico, también pueden producirse en materiales muy duros cuando se cortan mediante serrado o por chorro de agua abrasivo.

En la primera fase, se forman pequeñas grietas en el centro de la placa que discurren horizontalmente en el interior de la zona afectada por el calor. Estas se forman justo detrás del borde cortado y suelen aparecer en las dos horas posteriores al corte. En esta fase, las grietas no son visibles a simple vista.

En la segunda fase, que suele producirse transcurridos dos días, las grietas se propagan y alargan en dirección horizontal por la superficie del borde cortado, normalmente hasta 5 – 10 cm.

A veces, también tiene lugar una tercera fase, que se produce normalmente en un plazo de dos semanas, en la que continúa la propagación de grietas, cambiando de dirección y extendiéndose hasta la superficie de la chapa. Aunque las grietas verticales son inusuales, el riesgo de que se produzcan se incrementa al aumentar la dureza y espesor del acero. Las grietas inducidas por hidrógeno debidas al corte se ilustran en la Figura 4.

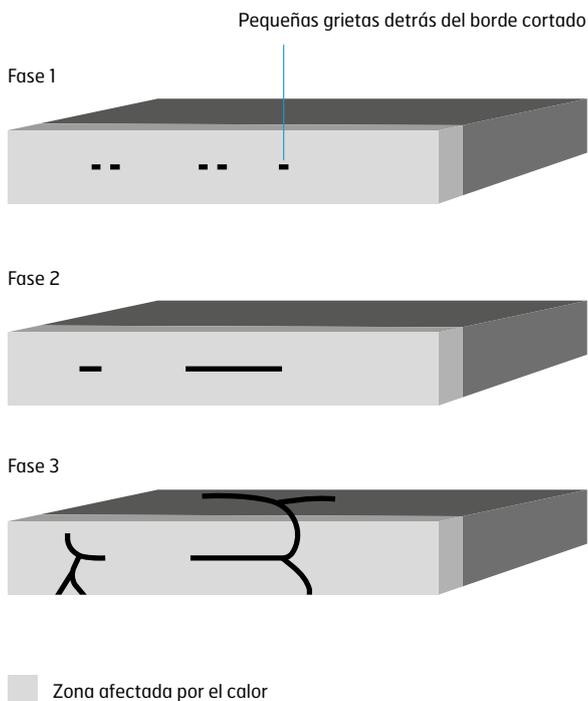
**Tabla 4:** Susceptibilidad al agrietamiento térmico de bordes

Espesor de chapa mm	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	125	160
Hardox® HiTemp	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Más sensible	Muy sensible
Hardox® HiTuf	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Más sensible	Muy sensible
Hardox® 400	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Menos sensible	Menos sensible	Más sensible	Muy sensible				
Hardox® 450	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Muy sensible
Hardox® HiAce	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Muy sensible
Hardox® 500	Insensible	Insensible	Insensible	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Insensible
Hardox® 550	Insensible	Insensible	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Insensible
Hardox® 600	Insensible	Insensible	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible
Hardox® Extreme	Menos sensible	Más sensible	Más sensible	Más sensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible	Insensible





**Figura 4:** Formación de grietas inducidas por hidrógeno en el borde cortado y alrededor de este.



Si se corta una chapa en componentes, se reducirán las tensiones residuales en las condiciones de entrega. Cuanto más pequeño sea el componente, menos tensiones residuales presentará en las condiciones de entrega. Un componente lo suficientemente pequeño solo presentará tensiones residuales derivadas del proceso de corte térmico. Además, un componente pequeño tiene una longitud cortada más corta que uno grande. Por lo tanto, esto también favorece a los componentes pequeños. No es probable que un componente cortado, si es lo suficientemente pequeño, se agriete (Tabla 5).

Los bordes biselados son más susceptibles al agrietamiento que los bordes cuadrados.

Debido a su naturaleza probabilística, es imposible predecir con precisión el agrietamiento de los bordes cortados con un proceso de corte térmico. Sin embargo, podemos influir en gran medida en las probabilidades de que se produzcan grietas con el procedimiento de corte que hayamos elegido.

Para que se formen grietas inducidas por hidrógeno, en el acero deben darse tres condiciones simultáneamente. Estas son:

- ▶ Un contenido relativamente alto de elementos de aleación.
- ▶ Un nivel alto de tensiones de tracción.
- ▶ Un contenido relativamente alto de hidrógeno en el material.

Estos factores interactúan entre sí. Si mantenemos sus niveles adecuadamente bajos, estaremos minimizando el riesgo de agrietamiento inducido por hidrógeno.

**Tabla 5:** Influencia del tamaño del componente en la probabilidad de agrietamiento del borde cortado en dicha pieza

Tamaño del componente	200 x 200 mm	400 x 400 mm	800 x 800 mm	1600 x 1600 mm	Más grande
Riesgo relativo de agrietamiento del borde para un componente	1	10	100	1000	5000

## La influencia de los elementos de aleación en el acero

La influencia de los elementos de aleación es la misma para el corte térmico que para la soldadura. Esto significa que unos valores de carbono equivalente superiores en el acero corresponden a una mayor sensibilidad a las grietas inducidas por hidrógeno. En términos generales, el carbono equivalente aumenta al aumentar el espesor, la dureza y la resistencia de la calidad del acero Hardox®.

Por ello:

- ▶ Existen más restricciones en cuanto al corte de grados de acero Hardox® cuando aumenta el valor de su dureza.

Cuanto mayor sea el espesor de un grado de acero Hardox® determinado, mayores serán las restricciones para minimizar el riesgo de que se produzcan grietas inducidas por hidrógeno durante el corte.

Ciertas aleaciones pueden favorecer la formación de grietas inducidas por hidrógeno. A medida que aumenta el nivel de estos elementos en el contenido, también aumentará la sensibilidad del acero, lo que hace que sean necesarias más restricciones de corte para minimizar el riesgo agrietamiento inducido por hidrógeno.

Las recomendaciones para la prevención de grietas inducidas por hidrógeno en el acero antidesgaste Hardox® se basan en evaluaciones realizadas cuidadosamente por SSAB. El objetivo de estos estudios es definir unas recomendaciones optimizadas en relación con las características individuales de cada grado de acero Hardox®.

Como complemento a las recomendaciones de SSAB, se pueden utilizar otros modelos generales para evaluar el agrietamiento inducido por hidrógeno en distintos tipos de aceros de alta resistencia. Los modelos establecidos describen la resistencia a las grietas inducidas por hidrógeno para una determinada chapa de acero de acuerdo con su equivalente de carbono, que se

calcula sobre la base del contenido químico de la chapa de acero. Unos valores de carbono equivalente favorables resultan en una alta resistencia a las grietas inducidas por hidrógeno.

Existen varios modelos para el equivalente de carbono y cada fórmula se deriva de estudios basados en aceros específicos. Los equivalentes de carbono internacionales más comunes se corresponden con los modelos CET y CEV.

SSAB prefiere la fórmula CET para el acero antidesgaste Hardox®, ya que este equivalente de carbono está especialmente diseñado para adaptarse a aceros de alta resistencia como la chapa antidesgaste Hardox®. La fórmula CEV también es válida para aceros de alta resistencia. Sin embargo, su equivalente de carbono se centra en aceros no aleados y de baja aleación con menor resistencia que el acero antidesgaste Hardox®.

A continuación, se definen las fórmulas para calcular los valores CET y CEV. Un sinónimo de CEV es CE. Cuando se calcula un valor equivalente de carbono, se debe utilizar el contenido de aleación indicado en el certificado de inspección de la chapa. Todos los elementos de la aleación se indican por su porcentaje de peso en las fórmulas que se presentan a continuación.

**$CET = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) 20 + Ni / 40$  [%]**  
**Fórmula 4.1**

**$CEV = C + (Cr + Mo + V) / 5 + Mn / 6 + (Ni + Cu) / 15$  [%]**  
**Fórmula 4.2**

El cálculo de un equivalente de carbono constituye un medio para determinar si es necesario el precalentamiento (y qué nivel) para evitar grietas inducidas de hidrógeno. Los métodos para determinar la temperatura de precalentamiento en este contexto son el método CET y el método CEV, que hacen referencia a los respectivos equivalentes de carbono. Estos dos métodos se describen en la norma europea EN 1011-2.



# Tensiones

## Tensiones de tracción debidas al corte

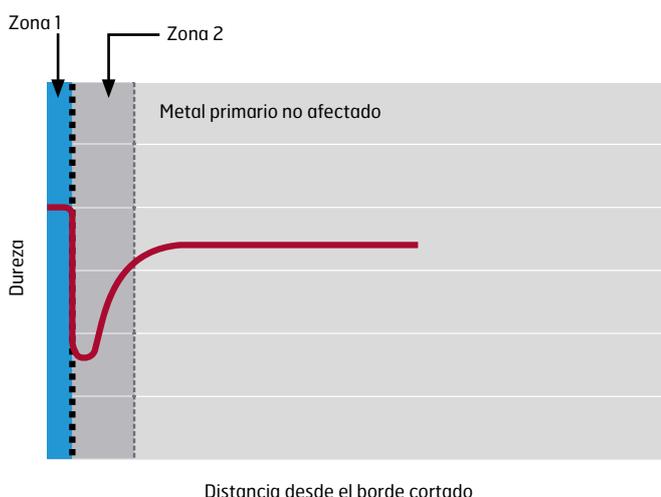
La operación de corte provoca un tratamiento térmico no uniforme en el borde de corte y alrededor de este. Por ejemplo, las temperaturas máxima en el acero se reducen a medida que aumenta la distancia desde el borde de corte. Este tratamiento térmico no uniforme provoca una variación en las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor. Los métodos de corte térmico siempre inducen tensiones de tracción en la zona que se va a cortar y alrededor de esta. El corte térmico del acero antidesgaste Hardox® ofrecerá como resultado una zona afectada por el calor que puede dividirse en dos zonas: una zona re-templada y otra revenida.

La parte exterior de la zona afectada por el calor, situada a aproximadamente 1 – 2 mm del borde cortado, se ha calentado a más de 900 °C durante el proceso de corte. Después del paso del soplete de corte, el calor se propaga rápidamente a la chapa, enfriando el material en la zona 1 tan rápidamente que el material es re templado.

La dureza, así como la resistencia, en esta zona es mayor que en otras partes de la zona afectada por el calor y el metal de base no afectado.

La zona 2, situada entre la zona 1 y el material primario no afectado, se calienta a temperaturas inferiores a 900 °C durante el corte. Los valores de dureza de esta zona varían dependiendo de la calidad del acero y del rendimiento de corte. El material de esta zona se temple con el calor de la operación de corte.

Durante el enfriamiento, la zona 1 intenta expandirse en la dirección del espesor, mientras que la zona 2 no se ve afectada, o incluso se contrae. Como resultado, en la zona 2 se crean tensiones de tracción residuales en la dirección del espesor. Es en esta zona con altas tensiones de tracción donde se inician



**Figura 5:** Esquema de perfiles de dureza de la zona afectada por el calor (ZAC) debido al corte térmico del acero Hardox® 450.

las grietas inducidas por hidrógeno. La tendencia general es que estos niveles de tensión aumenten cuanto mayor sea el espesor de la chapa.

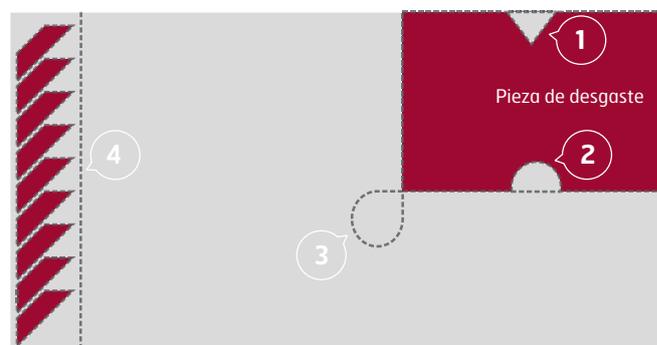
En la Figura 5 se ilustran las diferentes zonas afectadas por el calor de un acero Hardox® 450 cortado térmicamente.

## Tensiones de tracción debidas al campo de tensiones globales

El templado del acero antidesgaste genera tensiones residuales. Cuando se cortan piezas con esquinas afiladas, las tensiones residuales de la fabricación se concentran en dichas zonas. Estas tensiones concentradas podrían ser lo suficientemente altas como para provocar grietas inducidas por hidrógeno, por lo que las esquinas afiladas aumentarán el riesgo de agrietamiento del borde cortado. Esto es válido para métodos de corte térmico y en frío como el corte por chorro abrasivo de agua (AWJ). Si se tienen en cuenta las siguientes acciones, se reducirá el riesgo de que se produzcan grietas (consultar la Figura 6):

1. Si es posible, evite esquinas afiladas orientadas hacia dentro.
2. Si es posible, utilice geometrías lisas.
3. Si no se pueden evitar las esquinas afiladas, haga movimientos circulares, siempre que sea posible, alrededor de las esquinas orientadas hacia fuera.
4. Si es necesario detener la operación de corte (es decir, al finalizar el turno de trabajo), haga un corte limpio para eliminar cualquier condición de elevar la tensión.

Con excepción de los aceros Hardox® HiTuf y Hardox® HiTemp, todos los grados de acero Hardox® son sensibles al agrietamiento de los bordes cortados en geometrías afiladas.



**Figura 6:** Un procedimiento adecuado para cortar esquinas. Tenga en cuenta que la velocidad de corte normalmente se reduce en la sección transversal, donde se cruzan las trayectorias de corte, para estabilizar la operación de corte.

## HIDRÓGENO

Las grietas que se producen con el corte están directamente relacionadas con el hidrógeno. Estas grietas de corte se producen transcurrido un tiempo después del corte. Mientras la chapa está caliente, a unos 200 °C, no se agrietará. Si la temperatura desciende por debajo de 200 °C, las grietas pueden producirse transcurrido un tiempo. Si se producen grietas, aparecerán varias horas después del corte y el proceso de formación de grietas se completará normalmente después de dos días. El inicio del agrietamiento puede, en el peor de los casos, demorarse varias semanas. El hidrógeno se disuelve en la chapa de acero. Cuanto menor sea el contenido de hidrógeno, menor será la sensibilidad al agrietamiento de la chapa de acero. Si la chapa no tuviera hidrógeno, no se producirían grietas por el corte. La forma exacta en que el hidrógeno induce las grietas sigue siendo un misterio hasta la fecha.

Al cortar a una temperatura de trabajo elevada, el borde cortado permanecerá caliente durante un tiempo relativamente largo después de la operación. Cuanto más caliente esté el acero, más rápido se dispersará el hidrógeno por fuera del corte. A temperaturas inferiores a unos 100 °C, la difusión del hidrógeno es tan lenta que no tiene ningún efecto. Si el acero permanece por encima de 100 °C durante muchas horas seguidas, se expulsará el hidrógeno del corte y se reducirá el riesgo de agrietamiento.



# MEDIDAS PARA EVITAR EL AGRIETA- MIENTO INDUCIDO POR HIDRÓGENO

Para evitar el agrietamiento del borde cortado, es importante mantener lo más bajo posible tanto el contenido de hidrógeno como las tensiones de tracción en la zona afectada por el calor.

Es posible realizar siguientes acciones para minimizar el contenido de hidrógeno y las tensiones residuales en la zona afectada por el calor.

1. Pre calentamiento de la chapa
2. Post calentamiento
3. Reducción de la velocidad de corte (oxicorte)
4. Una combinación de pre calentamiento, post calentamiento y reducción de la velocidad de corte, sumado a un proceso de enfriamiento prolongado de la zona afectada por el calor

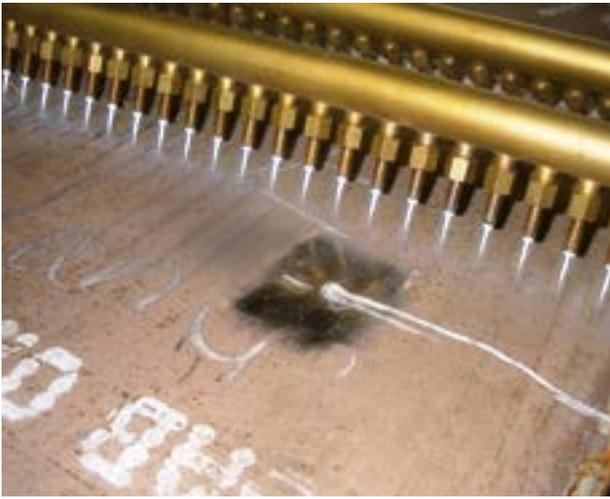


Figura 7: Sopletes de precalentamiento

## PRECALENTAMIENTO

Un método para evitar el agrietamiento inducido por hidrógeno durante el corte consiste en precalentar el material. El calor permitirá que se difunda más hidrógeno lejos del borde cortado y reducirá la velocidad de enfriamiento del borde de corte, lo que a su vez reducirá las tensiones de tracción introducidas.

El precalentamiento se puede utilizar preferiblemente antes del oxicorte y del corte por plasma con oxígeno como gas de plasma. Con respecto a todos los tipos de corte con láser y por plasma con nitrógeno, no se recomienda el precalentamiento debido a su efecto negativo en la calidad del borde cortado.

Dependiendo de la situación, se puede calentar una parte de la chapa o la chapa completa. Las maneras más comunes de precalentar la chapa son:

- ▶ Horno de calentamiento
- ▶ Sopletes de precalentamiento
- ▶ Alfombrillas eléctricas

El calentamiento en hornos constituye la mejor manera de precalentar la chapa, ya que aporta una temperatura uniforme en toda la chapa.

También se pueden utilizar sopletes de precalentamiento para precalentar la chapa antidesgaste Hardox®, consulte la Figura 7. Es importante que los sopletes estén en movimiento para que la temperatura de la chapa antidesgaste no supere la temperatura máxima de precalentamiento.

Además, la temperatura de precalentamiento se mide en el lado opuesto de la zona que se precalienta. Las alfombrillas eléctricas son un método de precalentamiento lento, por lo que una buena práctica es precalentar el material a 150 – 200 °C durante la noche y comenzar la operación de corte a la mañana siguiente.

Las recomendaciones de precalentamiento para el oxicorte se proporcionan en la Tabla 6.

Tabla 6: Temperaturas de precalentamiento para el oxicorte de las calidades Hardox®.

Calidad	Espesor de chapa, mm	Temperatura mínima de precalentamiento, °C	Temperatura máxima de precalentamiento, °C
Hardox® HiAce	< 40	Sin precalentamiento	225
	40-49,9	100	
	50-69,9	150	
	≥ 70	175	
Hardox® HiTemp	5-51	Sin precalentamiento	500
Hardox® HiTuf	< 90	Sin precalentamiento	300
	≥ 90	100	
Hardox® 400	< 45	Sin precalentamiento	225
	45-59,9	100	
	60-80	150	
	> 80	175	
Hardox® 450	< 40	Sin precalentamiento	225
	40-49,9	100	
	50-69,9	150	
	≥ 70	175	
Hardox® 500 Tuf	4-25,4	Sin precalentamiento	
Hardox® 500	< 25	Sin precalentamiento	225
	25-49,9	100	
	50-59,9	150	
	≥ 60	175	
Hardox® 550	< 20	Sin precalentamiento	200
	20-51	150	
	> 51	175	
Hardox® 600	< 12	Sin precalentamiento	180
	12-65	170	
Hardox® Extreme*	8-19	100	100

\*SSAB recomienda el corte por chorro abrasivo de agua (AWJ) Si solo se dispone de oxicorte, siga las recomendaciones de la Tabla 6.

## POSTCALENTAMIENTO

El postcalentamiento es un método fiable para evitar el agrietamiento de los bordes cortados. Se puede hacer en un horno o con sopletes. Es importante que el proceso de postcalentamiento se realice lo antes posible después de cortar la pieza. El tiempo entre el inicio del procedimiento de corte y el inicio del procedimiento de postcalentamiento debe ser lo más corto posible y nunca debe superar los 60 minutos.

Si se utilizan hornos, la temperatura no debe superar la temperatura máxima permitida indicada en la Tabla 6 y la chapa debe permanecer en el horno hasta que alcance esta temperatura. El tiempo de mantenimiento variará en función del espesor de la chapa. Como regla general, la duración del postcalentamiento debe ser de al menos 5 minutos por cada mm de espesor de la chapa (es decir, 50 minutos para una chapa de 10 mm de espesor). El postcalentamiento en un horno permitirá una mayor migración de hidrógeno desde la zona afectada por el calor, así como una pequeña reducción de las tensiones de tracción en la zona afectada por el calor.



**Figura 8:** Color del borde cortado por detrás del soplete de postcalentamiento.

Si se utilizan sopletes (Figura 9), es importante no sobrecalentar la chapa. La temperatura del borde cortado no debe superar 700 °C, preferiblemente de 300 a 500 °C. Normalmente, el post-calentamiento con sopletes se realiza manualmente y, si es el caso, es importante saber cómo controlar la temperatura. Esto se hace observando el color del borde cortado en la punta del soplete, solo debe comenzar a ponerse candente (en color rojo muy oscuro). Si el color es rojo cereza brillante o naranja oscuro, la temperatura será demasiado alta y el postcalentamiento no será satisfactorio. Consulte la Figura 8.

También es posible controlar la temperatura con un termómetro de infrarrojos, orientándolo directamente al borde de corte en la punta de la llama (Figura 10).

El calor del soplete templará la zona re-templada de la zona afectada por el calor, reduciendo las tensiones de tracción en el borde cortado. El soplete utilizado debe tener una llama bastante grande de baja intensidad. Esto permitirá que el calor penetre más en el material sin calentarlo demasiado.



**Figura 9:** Postcalentamiento manual.



**Figura 10:** Medición de la temperatura durante el postcalentamiento.

## REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORTE

La reducción de la velocidad de corte es un método cómodo para reducir el riesgo de que se produzcan grietas durante el oxicorte. Cuando se reduce la velocidad de corte, el material se calienta alrededor de la parte delantera del corte y la zona afectada por el calor es más amplia. Esto afecta a las tensiones residuales de un modo que reduce el riesgo de agrietamiento del borde cortado. Sin embargo, recuerde que la reducción de la velocidad de corte no es tan fiable como el precalentamiento o el postcalentamiento, y que solo debe utilizarse si, por ejemplo, el taller no dispone de un equipo de precalentamiento o postcalentamiento adecuado.

SSAB recomienda encarecidamente el precalentamiento en lugar de la reducción de la velocidad de corte. SSAB no garantiza que no aparezca una grieta al cortar a velocidad reducida, aunque el riesgo de que se produzcan estas grietas se reducirá en comparación con el corte a velocidad normal de chapas frías.

Si se reduce la velocidad de corte, es importante que esta no supere la indicada en la Tabla 7. De lo contrario, el riesgo de que se produzcan grietas no se reducirá en absoluto.

No utilice una boquilla excesivamente grande. Utilice una boquilla de 25 – 50 mm en lugar de una de 50 – 100 mm (2 – 4”) para chapa Hardox® de 50 mm de espesor. Para obtener un borde cortado de buena calidad, es necesario reducir la presión de oxígeno de corte. La cantidad de presión necesaria depende del tipo y tamaño de la boquilla. Realice siempre un corte de prueba y ajuste la presión del oxígeno de corte hasta obtener un borde cortado de buena calidad.

Asegúrese de que la chapa de acero Hardox® esté lo más caliente posible antes de cortarla. Durante el invierno, por ejemplo, almacene la chapa dentro del taller algún tiempo antes de cortarla.

La reducción de la velocidad de corte no se puede aplicar en el corte por plasma.

Espesor máx. de chapa	Hardox® HiTemp	Hardox® HiTuf	Hardox® 400	Hardox® 450	Hardox® 500	Hardox® 550	Hardox® 600	Hardox® Extreme
12 mm	sin restricciones	**						
15 mm	sin restricciones	300	**					
20 mm	sin restricciones	200	**					
25 mm	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	300	270	180	
30 mm	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	250	230	150	
35 mm	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	230	190	140	
40 mm	sin restricciones	sin restricciones	sin restricciones	230	200	160	130	
45 mm	sin restricciones	230	230	200	170	140	120	
50 mm	sin restricciones	210	210	180	150	130	110	
60 mm		200	200	170	140	*	*	
70 mm		190	190	160	135	*	*	
80 mm		180	180	150	130			
> 80 mm		*	*	*	*			

**Tabla 7:** Velocidad máxima de corte (mm/min) para oxicorte sin precalentamiento. Cortar solo a baja velocidad no es un método suficiente para contrarrestar el agrietamiento en Hardox® Extreme. Si el único método disponible es el oxicorte, utilice el precalentamiento junto con el postcalentamiento con un soplete. \*Solo es posible el precalentamiento. \*\* SSAB recomienda el corte por chorro abrasivo de agua (AWJ).

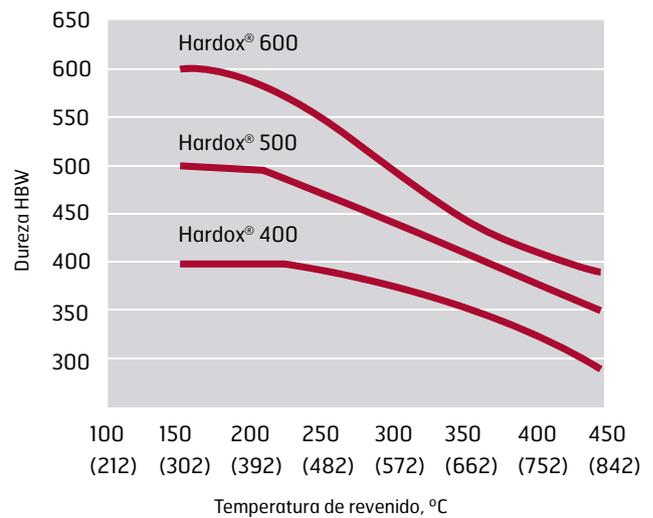
## ENFRIAMIENTO LENTO

Independientemente de si las piezas cortadas están precalentadas o no, una velocidad de enfriamiento lenta reducirá el riesgo de agrietamiento del borde cortado. Es posible ralentizar el enfriamiento si las piezas se apilan juntas mientras todavía están calientes por el proceso de corte y se cubren con una manta aislante. Permita que las piezas se enfríen lentamente a temperatura ambiente.

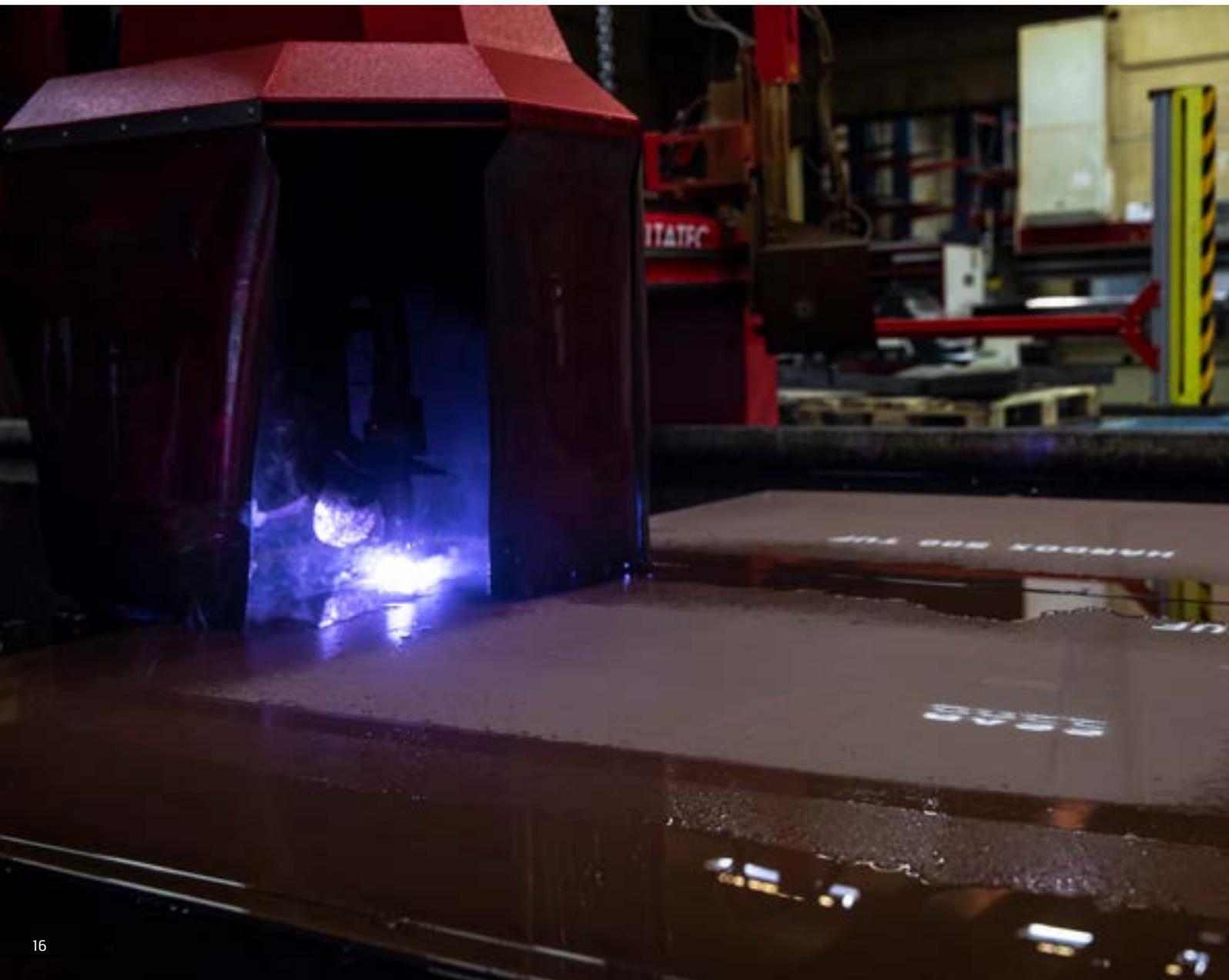


# REBLANDECIMIENTO

La resistencia del acero al reblandecimiento depende de su química, microestructura y de cómo se haya procesado. Cuanto más pequeña sea la pieza que se corta térmicamente, mayor será el riesgo de que se reblandezca todo el componente. Si la temperatura del acero es demasiado alta, se reducirá la dureza del acero, como se muestra en la Figura 11 (compruebe la temperatura máxima permitida en la Tabla 6).



**Figura 11:** Dureza de la superficie frente a temperatura de revenido.



# REDUCCIÓN DEL RIESGO DE REBLANDECIMIENTO

## Método de corte

Cuando se cortan piezas pequeñas, el calor suministrado por el soplete, y en el precalentamiento, se acumulará en la pieza. Cuanto menor sea el tamaño de la pieza cortada, mayor será el riesgo de reblandecimiento. Cuando se cortan chapas de 30 mm o más gruesas mediante oxicorte, la regla general es que: Existe el riesgo de pérdida de dureza de todo el componente si la distancia entre dos cortes es inferior a 200 mm. Para espesores inferiores a 30 mm, es posible cortar piezas más pequeñas sin perder dureza. Una manera adecuada de determinar si la pieza es demasiado pequeña, consiste en medir la temperatura de la pieza directamente después de cortarla. Las temperaturas máximas permitidas se pueden encontrar en la Tabla 6.

La mejor manera de eliminar el riesgo de reblandecimiento es con métodos de corte en frío, como el corte por chorro de agua abrasivo. Si es necesario realizar un corte térmico, el corte con láser o plasma es preferible al oxicorte. Esto se debe a que el oxicorte aporta más calor en la pieza en comparación con el corte por plasma o láser.

## Corte sumergido

Una forma eficaz de limitar y reducir la extensión de la zona de reblandecimiento es enfriar la placa y la superficie de corte con agua durante la operación de corte. Esto se puede hacer sumergiendo la placa en agua (Figura 12) o rociando agua sobre la pieza durante y después del corte.

Incluso si el corte se realiza bajo el agua o rociando agua sobre la pieza durante y después del corte, seguirá produciéndose una zona de reblandecimiento en el filo de corte a una distancia aproximada de 5 – 10 mm.

La llama y el chorro de oxígeno de corte expulsan el agua impidiendo enfriar el frontal de corte. Cuando el agua llega finalmente, el filo de corte ya se ha reblandecido. Por otro lado, el enfriamiento con agua evita que el componente se reblandezca “globalmente”.

El corte bajo el agua se puede realizar tanto por plasma como con oxicorte. Algunas ventajas del corte sumergido:

- ▶ Evita la pérdida de dureza de todo el componente
- ▶ Menor distorsión de la pieza cortada
- ▶ Las piezas se enfrían directamente después del corte
- ▶ No genera humo ni polvo
- ▶ Reducción del nivel de ruidos

Como el precalentamiento no se puede emplear para el corte sumergido, las únicas medidas disponibles para contrarrestar el riesgo de agrietamiento inducido por hidrógeno son el postcalentamiento y la reducción de la velocidad de corte. Cuando se cortan piezas pequeñas de chapa antidesgaste gruesa Hardox® con oxicorte, existe riesgo de reblandecimiento así como de agrietamiento del borde cortado. Esto se evita realizando el corte bajo el agua a bajas velocidades de corte o postcalentando las piezas cortadas. El postcalentamiento se puede realizar con un soplete o en un horno.

Figura 12: Corte sumergido.



# CONSEJOS PRÁCTICOS

## MANIPULACIÓN DE CHAPAS

Al almacenar Hardox® 550, Hardox® 600 y Hardox® Extreme, asegúrese de que las chapas de acero no quedan sujetas a curvarse por tres puntos. Se puede producir una curva de tres puntos si las chapas se apilan con madera entre las capas y la madera no se coloca correctamente. Asegúrese siempre de que la madera de cada capa se coloca encima de la madera de la capa situada debajo.



**Figura 13a:** Chapas apiladas correctamente.



**Figura 13b:** Chapas apiladas incorrectamente.

No devuelva nunca chapas al almacén si presentan esquinas afiladas. Estas esquinas refuerzan la tensión y pueden provocar un agrietamiento retardado de la chapa. Realice siempre un corte limpio para eliminar esquinas afiladas antes de volver a almacenar la chapa. Esto es válido para todos los métodos de corte, tanto térmicos como en frío, como el corte AWJ. Hardox® 550, Hardox® 600 y Hardox® Extreme son especialmente sensibles a esto.

# PRECALENTAMIENTO Y POSTCALENTAMIENTO

Una solución muy sencilla y económica para el precalentamiento es usar elementos calefactores eléctricos y mantas de aislamiento (lana de roca Rockwool o un producto aislante similar).

## Solución improvisada para precalentamiento



1. Coloque protección térmica para el suelo (si el suelo es sensible al calor).



2. Coloque los soportes de la chapa en la parte superior (en este caso, vigas en U)



3. Cúbrela con el aislante



4. Coloque las alfombrillas eléctricas



5. Coloque la chapa y coloque los sensores térmicos que registrarán la temperatura en el tiempo



6. Cubra todo con aislante

Otra solución económica y práctica es construir una caja de tratamiento térmico y utilizarla con calefacción eléctrica.



Esta solución podría utilizarse fácilmente para el precalentamiento, el postcalentamiento y el enfriamiento lento.

SSAB es una empresa nórdica siderúrgica con sede también en Estados Unidos. SSAB ofrece productos y servicios de valor añadido desarrollados en estrecha colaboración con sus clientes para crear un mundo más sólido, ligero y sostenible. SSAB proporciona empleo a personas en más de 50 países. SSAB cuenta con instalaciones de producción en Suecia, Finlandia y Estados Unidos. SSAB cotiza en bolsa, en el mercado Nasdaq de Estocolmo, y de manera secundaria en el mercado Nasdaq de Helsinki. [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

Explore el mundo de la chapa antidesgaste Hardox®



**SSAB**  
SE-613 80 Oxelösund  
Suecia

T: +46 155 25 40 00  
F: +46 155 25 40 73  
E: [contact@ssab.com](mailto:contact@ssab.com)

[hardox.es](http://hardox.es)

Hardox® es una marca registrada del grupo empresarial SSAB. Todos los derechos reservados. La información que se proporciona en este folleto es tan solo de carácter informativo. SSAB AB declina toda responsabilidad por la eficacia o idoneidad para una aplicación específica. Es responsabilidad del usuario determinar de forma independiente la idoneidad de todos los productos y/o aplicaciones, así como de probar y verificar los mismos. La información proporcionada por SSAB AB en este documento se proporciona 'tal cual, dónde está' y con todos los errores, y el usuario se responsabilizará de todos los riesgos asociados con dicha información.

Copyright © 2023 SSAB AB. Todos los derechos reservados.

**SSAB**