

Soluciones de mecanizado para aceros avanzados de alta resistencia

Folleto técnico





Índice

Introducción	5
Acerca de SSAB	6
<i>Consideraciones generales</i>	6
<i>Aceros avanzados de alta resistencia de SSAB y sus ventajas para la industria automotriz</i>	6
Aceros laminados y aceros para herramientas	8
Aceros avanzados de alta resistencia	8
<i>Aceros microaleados</i>	8
<i>Aceros de bainita</i>	8
<i>Aceros de fase dual</i>	8
<i>Aceros de fase compleja</i>	8
<i>Aceros para laminación</i>	8
<i>Aceros martensíticos</i>	8
<i>Gama de dimensiones disponible</i>	8
Aceros para herramientas	10
<i>Características para operaciones de conformado y corte</i>	10
<i>Metalurgia convencional</i>	11
<i>Metalurgia de refusión por electroslag (ESR)</i>	11
<i>Pulvimetalurgia</i>	11
Directrices para la selección de aceros para herramientas	12
Resumen	12
Operaciones con herramientas de conformado	14
<i>Consideraciones generales</i>	14
<i>Plegado</i>	14
<i>Laminado</i>	14
<i>Estampado</i>	14
<i>Rebordeado de agujeros</i>	14
<i>Análisis FEM de cargas y agarrotamiento de herramientas</i>	15
<i>Selección de acero para herramientas y tratamiento de superficie en aplicaciones de conformado</i>	16
Operaciones con herramientas de corte	18
<i>Consideraciones generales</i>	18
<i>Troquelado y punzonado</i>	18
<i>Corte y cizallamiento</i>	24
<i>Selección de acero para herramientas y tratamiento de superficie en aplicaciones de corte</i>	26
Ejemplos de aplicación	32
<i>Refuerzo de pilar B</i>	32
<i>Parachoques para vehículos de pasajeros</i>	33
<i>Soporte de gancho de remolque</i>	33
Lubricación	34
Operaciones con herramientas de conformado	34
Operaciones con herramientas de corte	34
<i>Calidades de Docol HR LA, sin revestimiento</i>	34
<i>Calidades de Docol DP/DL/LA y Roll, sin revestimiento</i>	34
<i>Calidades de Docol DP/CP/LA y Roll, galvanizado por inmersión en caliente</i>	34
<i>Calidades de Docol M, sin revestimiento y electrogalvanizado</i>	34
Economía del mecanizado	35
Asistencia técnica	37
Asesoramiento de expertos	37
Recursos avanzados para análisis	37
Cursos y seminarios	38
Guías	38
Chapas para ensayos	38
Información de productos	38



Introducción

El uso de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) puede ofrecer muchas ventajas a las empresas. Sin embargo, con el uso cada vez mayor de acero avanzado de alta resistencia en diseños de nuevos productos, aumentan también las exigencias para los aceros utilizados en operaciones de conformado y mecanización que se utilizan en las operaciones de moldeo y troquelado/punzonado. El objetivo de esta publicación es proporcionar una serie de directrices que permitan a los ingenieros de diseño y expertos en materiales encontrar la mejor solución de mecanizado para el conformado y el troquelado/punzonado de aceros avanzados de alta resistencia con los siguientes tipos de aceros:

- Aceros microaleados
- Aceros de bainita
- Aceros de fase dual
- Aceros de fase compleja
- Aceros para laminación
- Aceros martensíticos

Desde el punto de vista medioambiental, los aceros avanzados de alta resistencia pueden reducir de forma considerable el peso en la producción de piezas, permiten que se use una menor cantidad de materia prima y consumen menos energía. Al mismo tiempo, se necesita menos energía para transportar el acero y el propio acero es totalmente renovable.

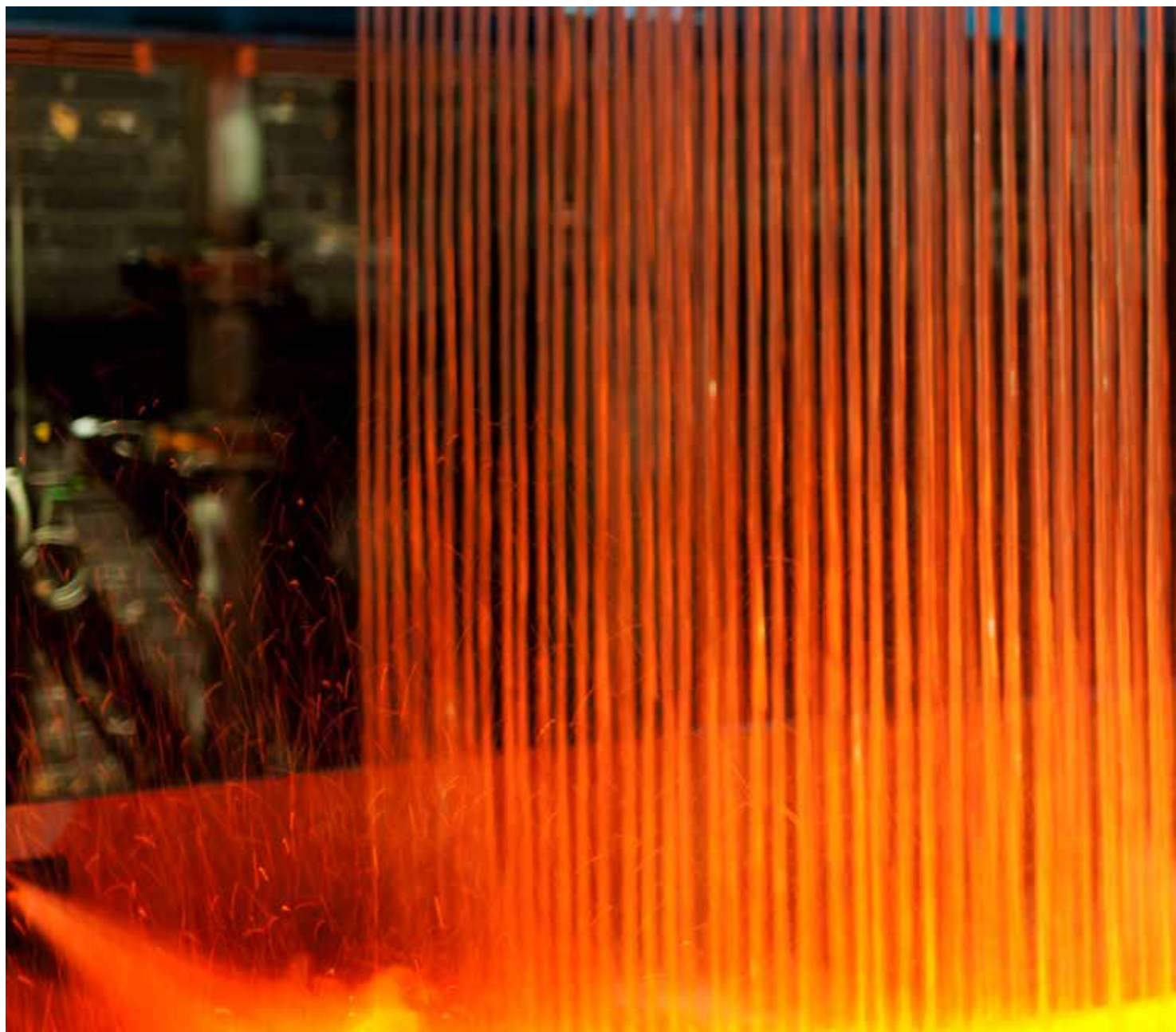
También hay aplicaciones donde el acero avanzado de alta resistencia hace posible eliminar los hornos de templeado del proceso de fabricación y, con ello, los riesgos medioambientales asociados.

En la industria de la automoción se pueden conseguir niveles de emisión más bajos al reducir el peso del vehículo. Por otro lado, la cada vez mayor demanda de seguridad en los coches hace necesario el uso de materiales de mayor resistencia en piezas de seguridad críticas del chasis del vehículo. Hay otros muchos productos industriales en los que se puede conseguir una reducción del peso y un aumento de la durabilidad utilizando acero avanzado de alta resistencia en los diseños.

El uso de acero avanzado de alta resistencia puede requerir una mayor fuerza para cortar y conformar las chapas de acero. Por lo tanto resulta obvia la necesidad de acero para mecanización con mayor dureza y ductilidad. La situación actual y los desarrollos futuros en acero avanzado de alta resistencia hacen necesario un desarrollo adicional de las propiedades del acero para mecanización que satisfaga dichos requisitos.

Las directrices aquí presentadas reflejan los últimos resultados y las buenas prácticas de trabajo desarrolladas en el momento de publicar este documento. La información está basada en amplias investigaciones y ensayos realizados durante un largo periodo de tiempo, en estrecha colaboración con muchos de nuestros clientes más experimentados.

El principal objetivo para SSAB es el de proporcionar información sólida que permita a los clientes seleccionar la mejor combinación de acero avanzado de alto límite elástico y acero para los herramientas adecuado a cada diseño de producto.



Acerca de SSAB

Consideraciones generales

SSAB es líder mundial en la producción de aceros de alta resistencia con valor añadido y ofrece productos desarrollados en estrecha colaboración con sus clientes para conseguir un mundo más resistente, ligero y sostenible. Las fábricas se encuentran en el Norte de Europa y EEUU. Ofrecen sus servicios a más de 50 países de todo el mundo.

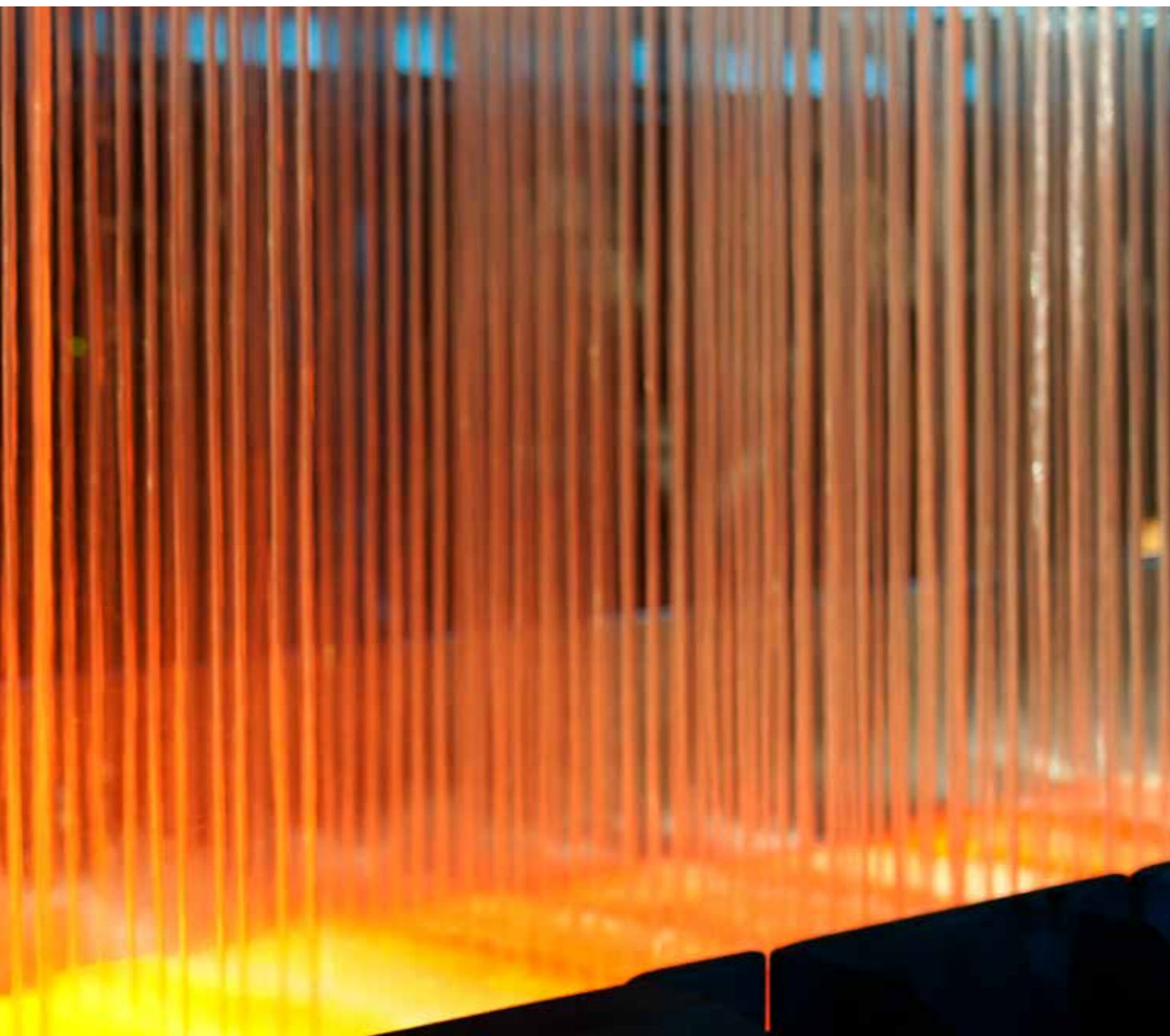
Las marcas de productos de SSAB, Strenx, Hardox, Docol, GreenCoat, ArmoX y Toolox, son muy conocidas y cuentan con el reconocimiento internacional por su calidad y servicios de valor añadido. Nos centramos en los clientes y en apoyarlos para desarrollar los productos más innovadores del mercado, desde el principio del desarrollo de la aplicación. Tenemos una actitud abierta, y somos directos y honrados, y al compartir nuestra amplia experiencia y conocimientos ofrecemos a nuestros clientes unos valores que son difíciles de encontrar en el entorno empresarial de la actualidad. Nuestros clientes incluyen fabricantes muy

conocidos en una amplia gama de exigentes sectores de fabricación, como la industria a la automoción, remolques, volquetes, grúas, elevadores, contenedores y maquinaria agrícola.

Aceros avanzados de alta resistencia de SSAB y sus beneficios para la industria del automóvil

Los coches están mejorando en términos de seguridad, confort y consumo de combustible. Esta tendencia está impulsada por las crecientes demandas en términos de seguridad y medioambiente. El uso de aceros avanzados de alta resistencia de SSAB resulta en construcciones más ligeras, una mayor protección frente a impactos y una mejora en la eficiencia.

SSAB apoya a sus clientes de la automoción desde el comienzo del proceso de desarrollo de nuevas aplicaciones específicas, reforzando sus fortalezas competitivas y la rentabilidad. Por ejemplo, se puede conseguir ahorros de pesos de hasta el



50% en componentes de seguridad cambiando de aceros suaves a aceros ultra resistentes de SSAB.

El desarrollo y mejora de los aceros avanzados de alta resistencia para nuevas aplicaciones, además de la creación de nuevos métodos de diseño, moldeo y de unión de los materiales son piezas clave en el programa de investigación y desarrollo de SSAB. Hemos realizado grandes inversiones en procesos de producción avanzados con el fin de garantizar la máxima calidad. Toda la producción de acero tiene prácticamente las mismas propiedades para garantizar la coherencia de las dimensiones, tolerancias y propiedades internas del acero. Este nivel de calidad no solo reduce el índice de rechazos sino que también garantiza la continuidad de la producción para los consumidores. Nuestra gama de productos incluye láminas finas de acero con un espesor que va desde los 0,4 mm a los 16 mm, con un ancho máximo de la lámina de 1600 mm.



Aceros laminados y aceros para herramientas

Aceros avanzados de alta resistencia

Los aceros avanzados de alto límite elástico de SSAB pueden obtenerse como productos laminados en caliente, laminados en frío, galvanizados en caliente y electrogalvanizados. Por ejemplo, estos aceros de alto límite elástico se utilizan en:

- Componentes de seguridad para automóviles
- Remolques
- Volquetes
- Asientos para automóviles
- Contenedores
- Grúas
- Trenes
- Aplicaciones tubulares para mobiliario, bicicletas, y cochecitos para niños

Hay varios parámetros que determinan el tipo de acero a utilizar dependiendo de la aplicación. Los parámetros más importantes son consecuencia de la forma geométrica del componente y del método de conformado y punzonado. Algunos de los aceros avanzados de alta resistencia de SSAB se muestran en la **Tabla 1**.

Se puede obtener más información sobre el uso y proceso de éstos tipos de acero en los catálogos técnicos de cada producto de SSAB o en la página web: www.ssab.com

Aceros microaleados

Los aceros microaleados para conformado en frío obtienen su alta resistencia gracias a la pequeña adición de elementos de aleación como niobio y titanio. La cifra de denominación de la calidad del acero indica el límite elástico mínimo garantizado. La diferencia entre el límite elástico y la tensión de rotura es pequeña. Estas calidades de acero ofrecen una capacidad de plegado, conformado en prensa y rebordado excelentes en relación con su límite elástico. Su capacidad de soldadura es también buena.

Aceros de ferrita-bainita

Los aceros de ferrita-bainita están disponibles como material laminado en caliente. Estos tipos de aceros se laminan termomecánicamente. Las cifras en la designación de acero especifican la mínima carga de rotura.

Aceros de fase dual

La microestructura del acero DP consiste en dos fases, ferrita y martensita. La ferrita es blanda y contribuye a la buena capacidad de conformado. La martensita es una fase dura que contribuye a obtener mejor resistencia. La resistencia aumenta conforme se incrementa la proporción de fase martensítica. La

cifra en la denominación de la calidad del acero indica la carga de rotura mínima garantizada. Las cifras en la designación de acero especifican la carga de rotura mínima. Los aceros de fase dual son fáciles de cortar y conformar y pueden soldarse mediante los métodos convencionales de soldadura.

Aceros de fase compleja

La microestructura de los aceros CP (fase compleja) contiene pequeñas cantidades de martensita, de austenita retenida y de perlita dentro de la matriz ferrita/bainita. Los aceros CP están caracterizados por un alto límite elástico, un endurecimiento por deformación moderado y una buena capacidad de plegado y abocardado. Las cifras en la designación de acero especifican la carga de rotura mínima. Los aceros de fase compleja están disponibles como calidades de aceros galvanizados en caliente.

Aceros para laminación

Los aceros para perfilado con rodillos están disponibles como productos laminados en frío y galvanizados en caliente. Este grupo de aceros se diseña sobre todo para las aplicaciones donde se usa conformación mediante rodillos. Los aceros de conformación por rodillos se caracterizan por un ratio alto de límite elástico (YS/TS), la ausencia total de microinclusiones y una microestructura con homogénea distribución de la dureza. Estas características reducen al mínimo el riesgo para la torsión y plegado del perfil, además de permitir perfilar la forma con radios estrechos.

Aceros martensíticos

Los aceros martensíticos tienen un contenido de 100% de martensita, y se caracterizan por tener un límite elástico y carga de rotura muy alta. Para material laminado en caliente, los números en la designación indican la tensión de rotura mínima y para el material laminado en frío, la tensión de rotura mínima.

Gama de dimensiones disponible

Espesor:	Docol	0,50–2,10 mm
	Docol-GI	0,50–3,00 mm
	Docol HR	2,00–12,00 mm
Anchura máx.:	Docol	1500 mm
	Docol-GI	1500 mm
	Docol HR	1600 mm

La limitación en ancho depende de la calidad y espesor del acero. Se puede solicitar espesores adicionales.



Tipo de acero	Calidad de acero	CR/HR	UC	EG	GI	GA	ZA
Aceros de baja aleación y alta resistencia	Docol 460LA	CR	x	x	x	x	x
	Docol 500LA	CR	x	x			
	Docol 800LA	CR	x	x			
	Docol HR460LA	HR	x	x			
	Docol HR500LA	HR	x	x			
	Docol HR550LA	HR	x	x	x		
	Docol HR600LA	HR	x	x			
	Docol HR650LA	HR	x	x			
	Docol HR700LA	HR	x	x	x		
Aceros de Fase Dual	Docol 500DP	CR	x	x			
	Docol 500DL	CR	x	x			
	Docol 590DP	CR	x	x	x	x	x
	Docol 600DP	CR	x	x			
	Docol 600DL	CR	x	x			
	Docol 780DP	CR	x	x	x	x	x
	Docol 800DP	CR	x	x			
	Docol 800DL	CR	x	x			
	Docol 800DPX	CR			x	x	x
	Docol 980DP	CR	x	x	x	x	x
	Docol 1000 DP	CR	x	x			
	Docol 1000DPX	CR			x	x	x
	Docol 1000LCE	CR	x	x	x		
Aceros de fase compleja y de ferrita-bainita	Docol 600CP	CR			x	x	x
	Docol 980CP	CR	x	x	x	x	x
	Docol 1180CP	CR	x	x	x		
	Docol Roll 800	CR	x	x			
	Docol Roll 1000	CR	x	x			
	Docol HR600FB	HR	x	x	x		
	Docol HR800CP	HR	x	x	x		
	Docol HR800HER-75	HR	x	x			
	Docol HR800HER-100	HR	x	x			
	Docol HR1000CP	HR	x	x			
Aceros martensíticos	Docol 900M	CR	x	x			
	Docol 1100M	CR	x	x			
	Docol 1200M	CR	x	x			
	Docol 1300M	CR	x	x			
	Docol 1400M	CR	x	x			
	Docol 1500M	CR	x	x			
	Docol 1700M	CR	x	x			
	Docol HR1200M	HR	x				
	Docol HR 1500 M	HR	x				

Tabla 1. En esta tabla se muestran solo algunos ejemplos de nuestros aceros de alta resistencia. Además, las calidades producidas conforme a los estándares de los OEM de la industria automotriz están ampliamente disponibles. SSAB también ofrece aceros al carbono y calidades inferiores de acero HSS.

Aceros para herramientas

Características para operaciones de conformado y corte

Un requisito típico para las herramientas utilizadas en aplicaciones de trabajo en frío es una alta dureza. La razón es que los materiales que deben ser conformados son habitualmente duros. Es necesario por tanto una herramienta con alta dureza a fin de prevenir la deformación plástica y / o un desgaste del herramienta.

Una consecuencia negativa del alto nivel de dureza es que el material de la herramienta se vuelve más frágil.

El acero para herramientas en aplicaciones de trabajo en frío requiere alta resistencia al desgaste, suficiente resistencia a la compresión y tenacidad / ductilidad. Para ser exactos:

- Alta resistencia al desgaste para incrementar la vida de la herramienta y reducir la necesidad de paradas de producción para mantenimiento.
- Suficiente resistencia a compresión, a fin de evitar la deformación plástica de superficies activas de la herramienta.
- Suficiente tenacidad / ductilidad para evitar roturas prematuras y melladuras en la herramienta.

La alta resistencia al desgaste no es tan solo una cuestión de dureza. Habitualmente, las calidades de acero para aplicaciones de trabajo en frío contienen también carburos duros, que aportan una contribución extra para la resistencia al desgaste. Estos carburos son componentes químicos de carbono y carburos utilizando elementos como el cromo, vanadio, molibdeno o tungsteno. Generalmente, cuanto más frecuentes, grandes y duros son los carburos, mejor resistencia al desgaste se obtiene en la herramienta. Sin embargo, existen consecuencias conflictivas como una alta dureza, que hace que el material sea más sensible

a las melladuras. Ello puede conducir a que los grandes carburos actúen como iniciadores de grietas en un proceso de fatiga. La mayoría de las roturas en las herramientas son consecuencia de la fatiga.

La rotura por fatiga ocurre cuando el material se expone a cargas alternas, y puede dividirse en la etapa de iniciación de grietas y en la etapa de propagación. La iniciación de grietas se inicia normalmente en las muescas, que actúan como concentradores de tensión. Cuanto mayor es la dureza, mayor es la concentración de tensiones. Es típico de un material con alta dureza que cuando se inicia una grieta, el tiempo hasta que ocurre una rotura total es muy corto.

En general, el problema con las aplicaciones de trabajo en frío, especialmente en operaciones de corte fino de materiales duros, es que se deben minimizar los defectos de iniciación de grietas. Esto se debe realizar manteniendo la resistencia al desgaste, lo que requiere una alta dureza y partículas duras en la matriz del acero.

Los defectos iniciadores de grietas, como entallas, no son debidos necesariamente a los carburos. Grandes inclusiones de escoria, defectos en la superficie de la herramienta o bordes afilados en combinación con una alta dureza pueden también actuar como iniciadores de grietas ante una carga de fatiga. Por esta razón la pureza en el proceso metalúrgico, el acabado de la superficie de la herramienta o el diseño de esta, puede tener una gran influencia en su rendimiento. En la **Tabla 2** se muestra la gama de acero para herramientas de productos de Uddeholm adecuadas para aplicaciones de acero avanzado de alta resistencia.

Calidad de acero de Uddeholm	Tipo de metalurgia	AISI/W.-Nr.	Composición química (peso %)						
			% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% W	% V
Sleipner	Convencional	-	0,90	0,90	0,50	7,80	2,50	-	0,50
Sverker 21	Convencional	D2/1,2379	1,55	0,30	0,40	11,30	0,80	-	0,80
Calmax	Convencional	-/1,2358	0,60	0,35	0,80	4,50	0,50	-	0,20
Unimax	Refusión por electroslag	-	0,50	0,20	0,50	5,00	2,30	-	0,50
Caldie		-	0,70	0,20	0,50	5,00	2,30	-	0,50
Vanadis 4 Extra SuperClean	Pulvimetalurgia (PM)	-	1,40	0,40	0,40	4,70	3,50	-	3,70
Vanadis 8 SuperClean	Pulvimetalurgia	-	2,30	0,40	0,40	4,80	3,60	-	8,00
Vancron SuperClean	Pulvimetalurgia	-	3,00 ¹⁾	0,50	0,40	4,50	3,20	3,70	8,50

1) %(C+N)

Tabla 2. Gama de productos de aceros para herramientas de Uddeholm adecuada para el acero avanzado de alta resistencia.

Metalurgia convencional

Al fabricar acero para herramientas de alta aleación mediante el método convencional, el uso de grandes lingotes significa que la colada de acero se solidificará de forma lenta. Ello resulta en un desarrollo de redes de carburos bastos. Estas redes de carburos causarían bandas de carburos bastos en el acero después del proceso de laminado o forjado. Estas bandas de carburos son positivas para la resistencia al desgaste, pero tienen una influencia negativa en la resistencia mecánica de la herramienta, especialmente ante carga por fatiga.

Para reducir la influencia negativa de las redes de carburos la composición química debe equilibrarse a fin de reducir o incluso evitar redes de carburos bastos, mientras que se debe compensar la pérdida de resistencia al desgaste mediante un incremento de la dureza en la matriz.

Una forma alternativa es desarrollar un proceso metalúrgico que aporte carburos pequeños y bien distribuidos que tienen un menor impacto negativo en la resistencia a la fatiga pero todavía siguen protegiendo a la herramienta del desgaste.

Uddeholm Tooling cuenta con dos procesos metalúrgicos para mejorar esta situación comparado con la metalurgia convencional. Estos son:

- Electro afinado de escoria (ESR)
- Pulvimetalurgia (PM)

Se describe a continuación, estos procesos metalúrgicos.

Metalurgia de refusión por electroslag (ESR)

La metalurgia por electro afinado de escoria es un proceso metalúrgico bien conocido por el cual, el lingote de fabricación convencional se refunde sucesivamente en un proceso mediante una pequeña colada. Esta colada más pequeña se solidifica de forma más rápida que una colada de grandes dimensiones, dejando menor tiempo para el crecimiento de carburos después de la solidificación. El proceso de refusión crea un acero con una mayor homogeneidad y carburos más pequeños. Este proceso incluye también un afinado de escoria, lo que mejora la pureza del acero.

Pulvimetalurgia

En el proceso pulvimetalúrgico se utiliza gas nitrógeno para atomizar el metal fundido en pequeñas gotas o gránulos. Cada una de estas pequeñas gotas se solidifica rápidamente y no hay prácticamente tiempo para el crecimiento de carburos. Estos gránulos de polvo se compactan en un lingote mediante presión isostática en caliente a alta presión y temperatura. Posteriormente, se lamina el lingote o se forja en barras de acero mediante métodos convencionales. La estructura resultante es la de un acero completamente homogéneo con pequeños carburos distribuidos de manera uniforme, que no serán iniciadores de grietas pero que proporcionarán al mismo tiempo resistencia al desgaste.

Las inclusiones grandes no metálicas pueden ser también iniciadores de grietas. Por éste motivo, el proceso pulvimetalúrgico ha mejorado su proceso en varias etapas con la finalidad de mejorar la pureza del acero. Hoy en día el acero pulvimetalúrgico de Uddeholm es ya de tercera generación, y es considerado como el acero pulvimetalúrgico para herramientas más puro que existe en el mercado.

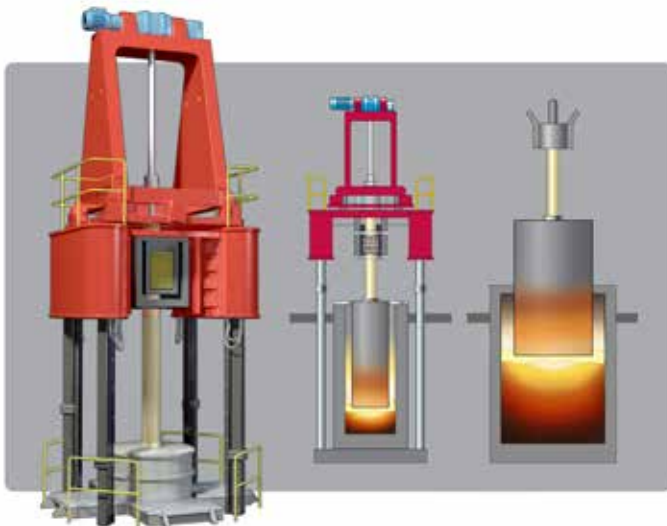


Figura 1. Metalurgia de refusión por electroslag.

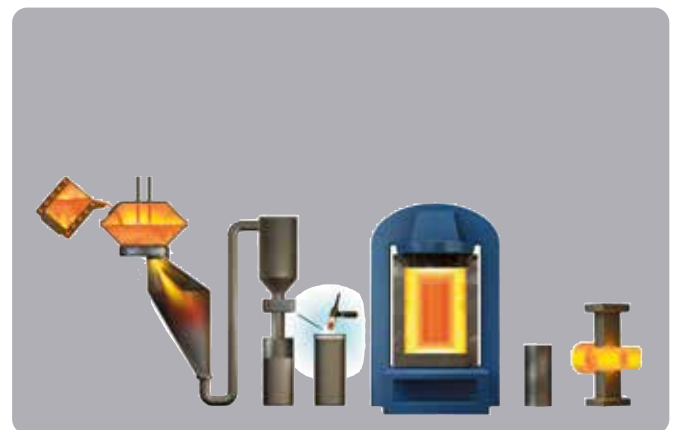


Figura 2. Pulvimetalurgia.

Guía de selección del acero para herramientas

Resumen

En operaciones de corte y conformado de piezas metálicas, así como en todas las operaciones industriales de fabricación, es importante que la producción funcione sin problemas. La cadena que se inicia desde el diseño de la herramienta hasta su mantenimiento incluye muchas etapas, tal y como se muestra en la **Figura 3**.



Figura 3.
Etapas del proceso desde el diseño hasta el mantenimiento de la herramienta.

Para lograr una buena productividad y economía en el mecanizado, es esencial seleccionar el acero para herramientas adecuado y que todos los pasos de la cadena se realicen correctamente.

Para seleccionar la calidad de acero adecuada para cada aplicación concreta es esencial identificar los mecanismos que pueden conducir a un fallo prematuro de la herramienta. En las operaciones de conformación y corte, existen cinco mecanismos principales de fallo:

- Deformación plástica, aparece cuando el nivel de tensiones excede el límite de elasticidad a compresión (dureza) del material de la herramienta.
- Desgaste abrasivo, relacionado con la operación, el material de trabajo y las fuerzas de fricción debidas al contacto entre la herramienta y el material de trabajo.
- Melladuras, que son el resultado de grandes tensiones de trabajo comparado con la resistencia a la fatiga del material de la herramienta.
- Desgaste por adhesión/agarrotamiento, como consecuencia de grandes fuerzas de fricción debido al contacto de deslizamiento y la naturaleza adhesiva del material de trabajo. El



mecanismo de adherencia está fuertemente relacionado con el desgaste adhesivo.

- Agrietamiento total, es el resultado de grandes tensiones de trabajo comparado con la tenacidad a la fractura del material de la herramienta.

La deformación plástica, las melladuras y la rotura total son fallos espontáneos y derivan en problemas severos y costosos en la producción. Si es posible, se debe evitar. El desgaste y el agrietamiento son problemas más predecibles y pueden ser, en cierta medida, controlados mediante un cuidado mantenimiento de la herramienta. Una consecuencia de ello es que puede ser una ventaja el permitir tener más desgaste en la herramienta antes que tener problemas de melladuras y roturas.

El límite elástico de la chapa de acero debe excederse durante el conformado y la resistencia a la cizalladura debe excederse durante la operación de corte. Por tanto, en las operaciones de corte y conformado de chapa de alto rendimiento, las fuerzas que se requieren para realizar la operación son mayores que las que se necesitan para conformar / cortar chapa más blanda del mismo espesor.

En consecuencia, los requisitos de resistencia al desgaste y resistencia mecánica del material de la herramienta son mayores. La operación de corte es más sensible puesto que requiere una combinación de alta resistencia al desgaste, alta resistencia contra las adherencias, alta resistencia a la compresión y alta re-

sistencia contra las melladuras y roturas. Por otra parte, la operación de conformado está más relacionada con alta resistencia al desgaste y adherencias y con la resistencia a la compresión. Además, se debe modificar la tolerancia de la herramienta. Puede aparecer ondas de choque y la formación de rebabas es distinta al troquelar/punzonar chapas con R_m 1,200–1,400 MPa. Consulta también la **Figura 3**. El conformado de aceros avanzados de alta resistencia también se traduce en una menor capacidad de conformado, un aumento de la recuperación elástica y un aumento de las tendencias al arrugamiento. En consecuencia, el entorno de mecanizado se vuelve más complejo y exigente con estos nuevos materiales de acero avanzado de alta resistencia.

Las operaciones de conformado y corte en chapas de calidades de acero de resistencia más alta pueden provocar un rápido deterioro de la superficie de la herramienta o su agrietamiento si se seleccionan aceros para herramientas inadecuados. Esto significa que la selección del acero para herramientas y los procesos de revestimiento para las operaciones de conformado y corte en el acero avanzado de alta resistencia no deben basarse en lo que se ha hecho en el pasado con materiales de chapa de acero al carbono más blando. En su lugar, se deben utilizar las últimas innovaciones técnicas para optimizar la economía de la producción.

En la **Tabla 3** se muestra una comparación relativa de la resistencia a distintos tipos de mecanismos de fallo de herramientas para la gama de productos de Uddeholm destinada a aplicaciones de aceros avanzados de alta resistencia.

Calidad de acero de Uddeholm	AISI	Dureza/ Resistencia a la deformación plástica	Resistencia al desgaste		Resistencia a principios de agrietamiento por fatiga	
			Desgaste abrasivo	Desgaste adhesivo	Desgaste abrasivo	Desgaste adhesivo
Calmax	-					
Caldie	-					
Sleipner	-					
Sverker 21	D2					
Unimax	-					
Vanadis 4 Extra*	-					
Vanadis 8*	-					
Vancron*	-					

Tabla 3. Comparación relativa de la resistencia a distintos tipos de daños en las herramientas en aplicaciones de trabajo en frío para aceros para herramientas para aceros avanzados de alta resistencia.

*Acero para herramientas Uddeholm PM SuperClean.

Operaciones con herramientas de conformado

Consideraciones generales

Los aceros avanzados de alta resistencia de SSAB tienen una buena capacidad de conformado y se pueden conformar del modo tradicional, a pesar de su alta resistencia. La menor capacidad de conformado en comparación con los aceros al carbono puede ser siempre compensada modificando el diseño del componente o bien el proceso de conformado. Mayores radios en la herramienta, que ayudan al material a fluir, en combinación con la forma optimizada de la pieza a estampar, son factores que pueden hacer que el conformado de la chapa de alto límite elástico sea más sencillo. En la **Figura 4** se puede observar un buen ejemplo de cómo se han adoptado estas consideraciones de diseño, capaz de estampar una pieza compleja en Docol 1200M, pese a que la conformabilidad de Docol 1200M es menor comparada con aceros suaves, ver **Figura 5**.



Figura 4. Soporte de baterías para vehículo-SUV estampado en Docol 1200M.



Figura 5. Profundidad de deformación máxima en el ensayo de estiramiento. Calidades de acero (de izquierda a derecha): CR5, Docol 600DP, Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M y Docol 1400M.

El efecto de recuperación elástica es mayor para los aceros de alta resistencia que para aceros al carbono. Existen diversos métodos para minimizar el efecto de retorno elástico, por ejemplo:

- Plegado excesivo
- Aumentar la fuerza del pisador
- Utilizar pasos de acuñación o calibrado
- Utilizar frenos
- Añadir nervaduras y pliegues para reforzar la pieza
- Utilizar el desarrollo correcto de la pieza

En la siguiente parte de la **sección Operaciones con herramientas de conformado** se analizan operaciones de conformado tales como plegado, laminado, estampación y rebordeado de agujero, así como algunos aspectos relacionados con las cargas y el agarrotamiento empleando el método de elementos finitos (FEM). También se proporciona recomendaciones para tratamientos superficiales y selección de aceros para herramientas.

Plegado

Al doblar acero suave, el radio interior resultante se determina principalmente por el ancho de la matriz y no por el radio de la cuchilla de plegado. Un acero de alta resistencia, por el contrario, sigue el radio de la cuchilla de plegado y el radio interior resultante es menos dependiente del ancho de la matriz. Consecuentemente, una mayor anchura de la matriz puede utilizarse con los aceros de alto límite elástico sin comprometer el radio interior requerido. Esto tiene una gran influencia en la fuerza de plegado y también en el desgaste de la herramienta, puesto que los dos se ven reducidos al aumentar la anchura de la matriz.

Al cambiar de chapa de acero suave a chapa de acero de alta resistencia, generalmente se reduce el espesor de la chapa. Por tanto, la fuerza de plegado se puede mantener constante, puesto que la reducción del espesor compensa con frecuencia la mayor resistencia del material.

Laminado

El perfilado es especialmente adecuado para los aceros de alta resistencia. Los ensayos demuestran que pueden obtenerse radios significativamente agudos utilizando rodillos de perfilado comparado con un plegado convencional.

Estampado

Las fuerzas de prensado aumentan con la resistencia del material de trabajo. Normalmente, un material de alta resistencia requiere también una mayor fuerza del soporte de la stampa a fin de prevenir la aparición de arrugas en el material. Una presión local alta en la superficie de la herramienta deriva en requisitos exigentes en el material de la herramienta y en las propiedades de la superficie de esta (comentado también en la sección **Resumen**).

Rebordeado de agujeros

La capacidad de punzonado/abocardado para los aceros de alta resistencia es menor que para otros materiales blandos. Por este motivo, es más importante optimizar el proceso tanto como sea posible, por ejemplo punzonando el agujero en dirección opuesta a la dirección del abocardado. La rebaba se localiza entonces en



Figura 6. Herramienta de estampación compleja.

la parte interior del taladro donde no está tan sujeto a tensiones. El realizar un preconformado antes del punzonado del agujero es otra forma de conseguir más altura en el abocardado.

Análisis FEM de cargas y agarrotamiento de herramientas

Las simulaciones numéricas utilizando el método de elementos finitos (FEM) pueden dar un apoyo valioso en la selección del acero para herramientas. Una pregunta importante en la selección de acero para herramientas es si el proceso de conformación de la chapa se puede realizar sin que aparezca adhesión, lo que habitualmente resulta el mecanismo dominante de fallo en la conformación de chapa. La principal razón para la adhesión es la presión de contacto demasiado elevada entre la matriz y la chapa. El método de los elementos finitos se puede utilizar para calcular la presión de contacto para una combinación dada de materiales de herramienta y chapa. En la **Figura 7a** se muestra un ejemplo de simulación FEM e ilustra la metodología para calcular la presión de contacto. A partir de este cálculo, obtenemos una idea del nivel de presión de la herramienta que debe soportar nuestro acero para herramientas y podemos basar nuestra selección de acero para herramientas en este resultado.

Elegir el acero correcto para herramientas y su tratamiento superficial, puede aumentar la presión límite de adhesión, permitiendo la conformación de aceros de mayor límite elástico y/o geometrías más exigentes. El acero para herramientas PM aleado al nitrógeno Uddeholm Vancron SuperClean tiene una resistencia más elevada a la adhesión que los aceros convencionales para herramientas. El límite de presión de contacto cuando se conforma Docol HR700LA y DOCOL 1000DP es aproximadamente 1600 MPa cuando se utiliza material Vancron SuperClean en la herramienta. Como regla general, se puede asumir que la presión límite para el agarrotamiento es aproximadamente 2,6 veces el límite elástico cuando se utiliza Vancron SuperClean como acero para herramientas, pero sólo 1,2 veces el límite elástico cuando se utiliza acero para herramientas convencional como por ejemplo AISI D2. Esto es válido para el conformado de aceros con resistencias hasta DOCOL 1000DP, ya que por encima de esta resistencia, la temperatura aumentará y la capa de lubricación puede que no sea capaz de soportar la presión. Con los conocimientos actuales, los límites para el uso recomendado de Uddeholm Vancron SuperClean se pueden resumir en la **Figura 7b**.

Otros factores importantes que tienen influencia en el límite de adhesión son: elección de la lubricación, rugosidad superficial de la herramienta y la velocidad de deslizamiento. Una razón para el efecto de los factores mencionados aquí es que todos influyen en la temperatura, la cual debería mantenerse lo más baja posible para evitar la adhesión.

El límite de presión se puede combinar con una simulación FEM para predecir si una aplicación, con una geometría concreta, producirá una superficie de contacto lo suficientemente baja como para utilizar con garantías un acero convencional para herramientas o si hay que utilizar un acero más avanzado como Vancron SuperClean. Sin embargo, una simulación que predice una presión lo suficientemente baja no es una garantía de éxito si

la preparación de la superficie de la matriz es deficiente. Por otro lado, si la presión de contacto prevista está justo por encima del límite, una lubricación mejorada, una mayor reducción de la rugosidad de la superficie o una velocidad de conformado reducida pueden ser suficientes para evitar el desgaste.

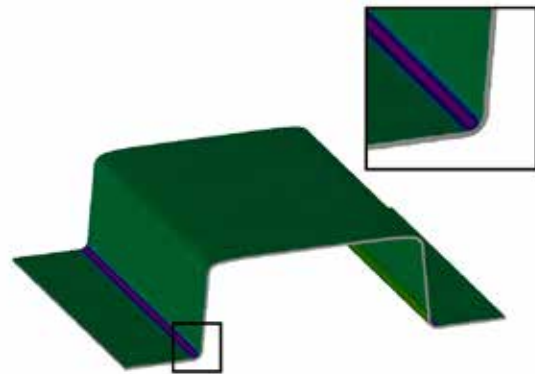


Figura 7a. Vista general de la presión de contacto calculada de una operación de embutición profunda de un perfil laminado en Docol 1000DP 1,5 mm.

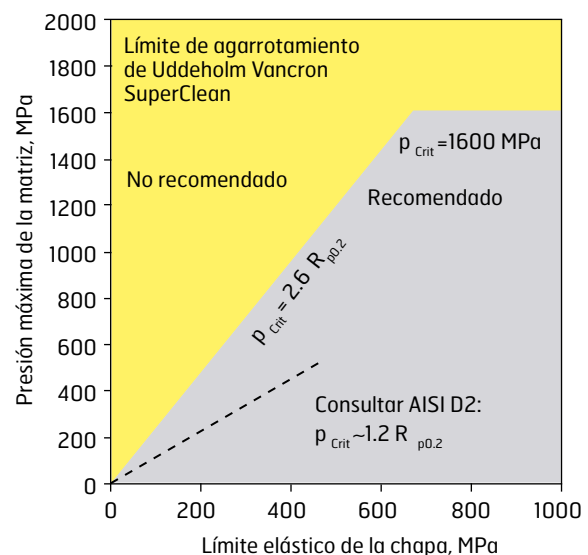


Figura 7b. Límites de guía para el uso de Uddeholm Vancron SuperClean sin recubrimiento para conformar aceros al carbono. Las recomendaciones se basan en ensayos de aplicaciones y simulaciones FEM. Se incluye, para comparación, los límites aproximados de agarrotamiento del acero para herramientas AISI D2 sin recubrimiento.

Selección de acero para herramientas y tratamiento de superficie en aplicaciones de conformado

En las aplicaciones de conformado, las adherencias, la deformación plástica y el desgaste adhesivo son los mecanismos de fallo más comunes. El conformado de acero avanzado de alta resistencia significa que se requiere más fuerza de estampación debido al incremento del límite de elasticidad.

Las herramientas de conformado con mejor resistencia a la adherencia van a ser necesarias en un futuro puesto que la tendencia se dirige hacia un mayor uso de aceros de alta resistencia, mayores velocidades de prensado, una utilización de matrices progresivas con menos etapas y la utilización de lubricantes más respetuosos con el medio ambiente (pero normalmente menos eficaces). Los tratamientos de superficie como revestimientos de PVD, CVD y TD en las herramientas de conformado son un remedio efectivo para prevenir el agarrotamiento.

La selección del acero para herramientas y el proceso de revestimiento utilizado para el conformado de aceros avanzados de alta resistencia depende principalmente de:

- La resistencia de la chapa de acero
- El espesor de la chapa de acero
- Si la chapa de acero está recubierta o no
- La complejidad de la operación de conformado
- El número de piezas a fabricar

En la actualidad, la experiencia en el conformado de aceros avanzados de alta resistencia es limitada. Sin embargo, algunos ensayos preliminares con Docol 600DP-1000DP de 2 mm han indicado lo siguiente:

• Niveles de dureza de las herramientas

La dureza de las herramientas debe estar por encima de los 58-59 HRC para contrarrestar el desgaste, el agarrotamiento y la deformación plástica.

• Acabado de superficie de la herramienta

Las superficies activas de la herramienta deben pulirse hasta obtener una baja rugosidad de superficie ($R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$).

• Aceros para herramientas convencionales sin recubrimiento

Estos aceros no cumplen los requisitos necesarios para herramientas de prensa para material de chapa sin recubrimiento. Sin embargo, pueden ser adecuados para operaciones de conformado más sencillas con aceros de espesores bajos cuya resistencia sea baja dentro del rango de los aceros avanzados.

• Aceros para herramientas convencionales nitruradas con plasma

Estos aceros no muestran una suficiente resistencia al agarrotamiento a largo plazo en series largas de fabricación debido a la delaminación de la capa nitrurada. Sin embargo, pueden ser aptos para operaciones simples de conformado con aceros de espesores bajos cuya resistencia sea baja dentro del rango de los aceros avanzados.

• Herramientas con recubrimiento de PVD

Los recubrimientos de PVD (como CrN y TiAlN) en combinación con un acero sustrato que cuente con dureza suficiente ($> 58 \text{ HRC}$) es una solución para evitar problemas de agarrotamiento.



• Herramientas con recubrimiento de CVD o TD

Aceros con un recubrimiento de CVD o TD correctamente preparados pueden evitar también problemas de agarrotamiento.

• Herramientas de conformado de Vancron SuperClean

Uddeholm Vancron SuperClean, un nuevo tipo de acero aleado al nitrógeno, acero PM de alto rendimiento, ha demostrado muy buenos resultados en aplicaciones industriales. La herramienta de conformado (con un acabado de superficie de $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$) fabricado con Uddeholm Vancron 40 SuperClean, habitualmente se comporta mucho mejor que las herramientas con recubrimiento.

En la **Tabla 4a** se muestra un resumen de los aceros para herramientas más adecuados para el conformado de aceros avanzados de alta resistencia. La información de la tabla está basada en la experiencia hasta la fecha, pero los ensayos y producción en serie siguen realizándose y la tabla se actualizará de forma regular. Los aceros para herramientas mencionados se pueden utilizar como matrices monobloque o en combinaciones de matriz base con insertos, dependiendo del tamaño de la herramienta y la severidad de la operación de conformado.

Como se ha mencionado anteriormente, existe una necesidad de recubrir la superficie de la herramienta para obtener un buen funcionamiento de la herramienta. Esto significa que los recubrimientos soportan el desgaste (excepto para Uddeholm Vancron SuperClean). Los aceros para herramientas actúan en este caso como sustrato de los recubrimientos. El principal requisito de los sustratos es soportar el recubrimiento frágil, esto es, el material sustrato debe tener suficiente resistencia a la compresión y dureza cuando la herramienta comienza a funcionar. Aún más, los cambios dimensionales después del proceso de recubrimiento deben ser insignificantes, o predecibles para cumplir las tolerancias deseadas de la herramienta. Finalmente, el material sustrato tiene

que soportar muchas cargas cíclicas a altas tensiones, por tanto se requiere un alto límite de resistencia a la fatiga.

Para dar una guía sobre la selección de aceros para herramientas según la longitud de serie de producción, en la **Tabla 4b** se muestra una clasificación relativa de las calidades de acero para herramientas actuales con y sin recubrimiento. En el caso

de ion nitrurado, uno de los factores es que la ductilidad se deteriora severamente. En la tabla se puede ver una comparación de la ductilidad después del nitrurado en las calidades actuales a una profundidad de 50µm. Como Uddeholm Vancron SuperClean se usa sin ningún tratamiento de superficie, muestra una clasificación muy superior en comparación al resto de calidades.

Resistencia de chapa R _m (MPa)	Calidad de acero Uddeholm/AISI/W.-Nr.	Tratamiento de superficie/recubrimiento		Dureza total (HRC)
		Tipo	Serie de Producción	
350-570	Calmax/-/1.2358 Unimax Sverker 21/D2/1.2379 Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	Nitrurado/PVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD No se necesita revestimiento, pero se puede aplicar	Serie medias Serie medias Serie medias Serie medias-largas Serie medias-largas Serie largas Serie largas Todo	> 58
>570-800	Calmax/-/1.2358 Unimax Sverker 21/D2/1.2379 Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	Duplex (nitrurado con plasma+PVD) PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD PVD/CVD No se necesita revestimiento, pero se puede aplicar	Todo Todo Todo Todo Todo Todo Todo Todo	> 60
>800-1400	Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	PVD/CVD/Duplex PVD/CVD/Duplex PVD/CVD/Duplex PVD/CVD/Duplex No se necesita revestimiento, pero se puede aplicar	Todo Todo Todo Todo Todo	> 60

Tabla 4a. Aceros para herramientas más adecuados para el conformado de aceros avanzados de alta resistencia.

Uddeholm	Sin recubrimiento					Con recubrimiento		Con nitrurado con plasma
	Resistencia al desgaste			Resistencia a:		Propiedades del material de sustrato:		
	Propiedades del material de sustrato:	Adhesivo	Adherencias	Melladura/Agrietamiento	Deformación plástica	Límite de fatiga	Estabilidad dimensional después del re-endurecimiento	Ductilidad después del nitrurado a una profundidad de 50 µm
Calmax	1	3	1	8	1	4	4	6
Unimax	1	4	1	10	1	5	7	7
Caldie	2	5	2	8	5	9	7	5
Sleipner	5	4	2	3	8	2	4	3
Sverker 21	6	2	1	1	5	1	1	1
Vanadis 4 Extra SuperClean*	8	8	3	8	10	10	9	5
Vanadis 8 SuperClean*	10	8	5	6	10	9	9	4
Vancron SuperClean*	6	10	10	6	9	9**	10**	10**

*) Uddeholm Vancron SuperClean sin recubrimiento superficial

**) Sin tratamiento de superficie

Tabla 4b. En la tabla se muestra una clasificación de rendimiento relativo para estas calidades, con y sin revestimiento. Escala relativa = 1-10, donde 10 es el mejor.

Operaciones con herramientas de corte

Consideraciones generales

Es muy difícil dar indicaciones concluyentes sobre la selección de un acero para herramientas para una situación de producción específica, puesto que las condiciones de producción pueden ser muy distintas aunque se trate de la misma pieza. La mejor forma es centrar la selección del acero para herramientas en la experiencia obtenida en otras series de producción utilizando el mismo equipo de producción, o similar.

En lo que respecta al acero avanzado de alta resistencia, hasta la fecha no se dispone de mucha experiencia previa. Por lo que se refiere al acero avanzado de alta resistencia, es importante no centrar la selección del acero en lo que se había utilizado anteriormente con aceros dulces, utilizando calidades antiguas como AISI A2 o D2. Recuerda que hay una nueva generación de aceros para herramientas que son mucho más apropiados cuando se punzona o se hace el corte fino.

En el corte fino y punzonado los principales mecanismos de fallos son desgaste, melladura y adherencia. Estos mecanismos de fallo están influenciados por:

- La resistencia del material de producción
- El espesor del material de producción
- Parámetros de diseño tales como radios agudos
- La geometría de la pieza a producir
- El número de piezas a fabricar

La herramienta debe tener la suficiente dureza para prevenir la deformación plástica en el canto cortante. Adicionalmente, se debe prestar especial atención a la calidad superficial de la herramienta para prevenir el fallo prematuro por melladura o fisuramiento, y también para prevenir la adherencia.

En la siguiente **sección Operaciones con herramientas de corte** se examinan las operaciones de corte tales como el corte fino, punzonado, corte y cizalladura. También se proporciona recomendaciones para tratamientos superficiales y selección de aceros para herramientas.

Troquelado y punzonado

Apariencia de un borde cortado

Los métodos de conformado utilizados habitualmente generan un borde cortado consistente en una zona achaflanada, una zona brillante, una zona de fractura y una de rebaba. La zona brillante es menor para los aceros de alta resistencia que para los aceros dulces. La altura de la rebaba se reduce al aumentar la resistencia a la tracción.

Un factor importante para conseguir un buen canto es la tolerancia de la matriz. Cómo seleccionar esta tolerancia se explica en la sección **Tolerancia de la matriz**.

Tolerancia de la matriz

La tolerancia de la matriz es la distancia radial entre el punzón y la matriz. Ver la **Figura 9**.

El borde se caracteriza a menudo mediante las cuatro secciones que se muestran en la **Figura 8**. Comparado con el troquelado/punzonado del acero al carbono, la elección de la tolerancia de la matriz tiene una mayor influencia en la vida útil de la herramienta. Sin embargo, la formación de rebabas es menor y no se ve afectada significativamente cambiando las tolerancias de la matriz. La zona achaflanada y zona de fractura aumentarán al incrementarse la tolerancia de la matriz, pero en menor forma que para el acero dulce. En la **Figura 10** se muestran las tolerancias recomendadas de la matriz para troquelado y punzonado.

En la **Figura 11**, se muestra un borde después del punzonado en Docol 1400M con 6% y 14% de tolerancia de la matriz.

En general es mejor utilizar una mayor tolerancia de matriz en el conformado de chapa de acero de alta resistencia. De todas formas para la chapa de acero de ultra alta resistencia una gran holgura puede ser una desventaja. Este punto se explicará más adelante.

Cuando se troquelean/punzonan aceros de hasta 1.000 MPa de tensión de rotura, una pequeña holgura aporta gran cantidad de problemas de agarrotamiento en la herramienta. Una holgura demasiado grande aporta menos desgaste en la herramienta pero genera más zona achaflanada en el objeto de trabajo, resultando en un borde de calidad inferior. Esto es por lo que la calidad del canto deseado en la pieza de trabajo afecta la elección de la holgura de la matriz. La relación entre el desgaste de la herramienta y la tolerancia de la matriz se muestra en la **Figura 12**.

Al conformar aceros de ultra alta resistencia, una holgura demasiado pequeña aporta también algunos problemas de adherencia en la herramienta, pero el mayor mecanismo de desgaste es el desgaste abrasivo. Debido a la resistencia del material, existe un límite en el tamaño de la holgura de la matriz. Una tolerancia excesiva genera grandes tensiones de plegado en el borde del punzón, lo que incrementa el riesgo de melladuras. Ver la **Figura 13**. Esto es especialmente importante en las calidades de acero con una diferencia pequeña entre el límite elástico y la carga de rotura, como los aceros martensíticos Docol M y M+EZ.

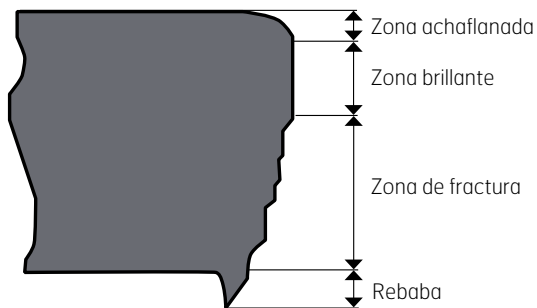


Figura 8. Apariencia de un borde cortado.

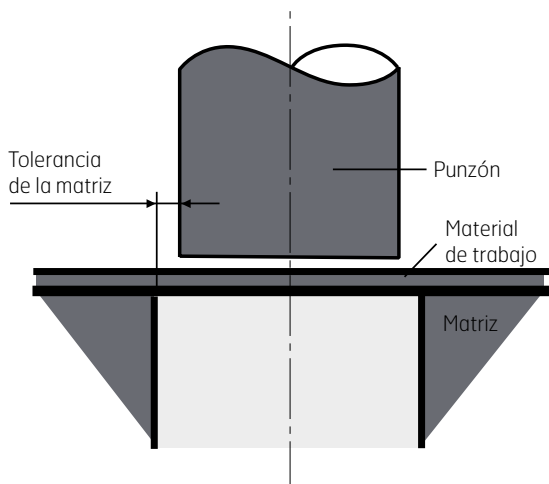


Figura 9. Definición de tolerancia de la matriz.

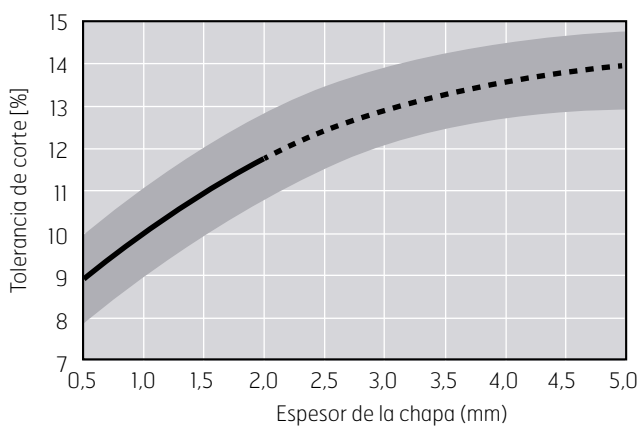


Figura 10. Tolerancias recomendadas de la matriz para troquelado/punzonado de aceros avanzados de alta resistencia.

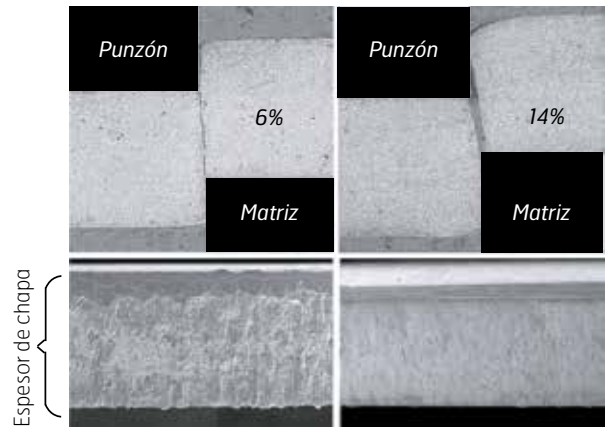


Figura 11. Borde cortado con tolerancia variable de la matriz.

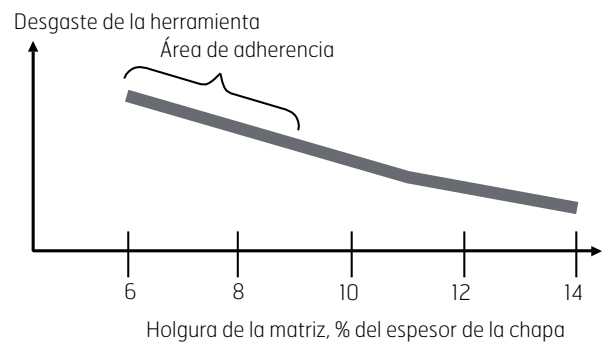


Figura 12. Relación entre el desgaste de la herramienta y la tolerancia de la matriz al troquelar en Docol 800 DP (espesor de la chapa = 1 mm).

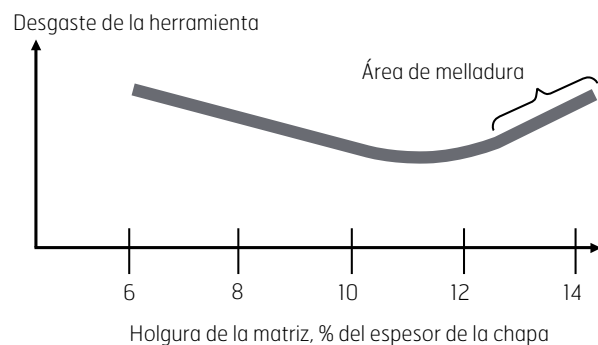
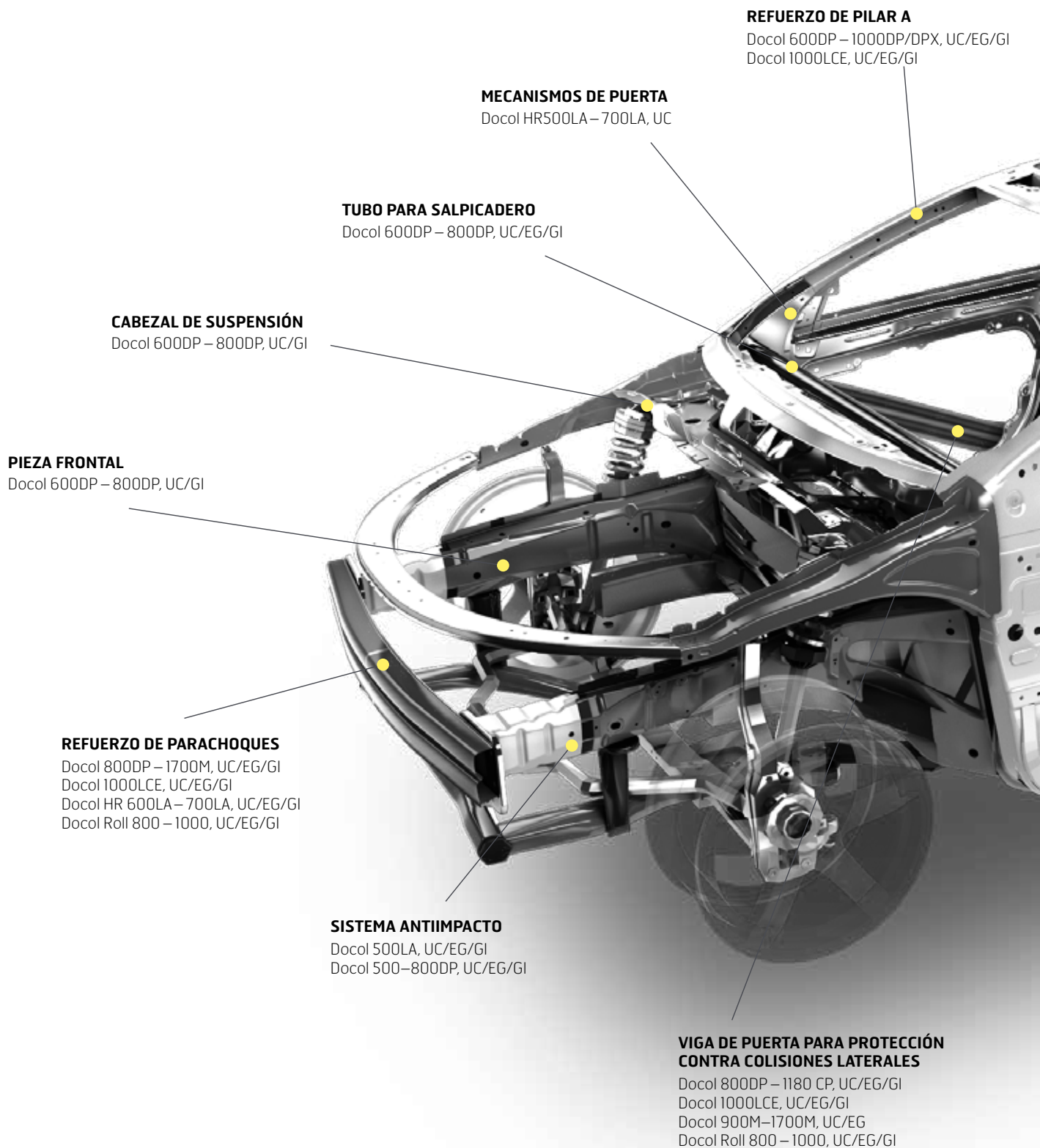


Figura 13. Relación entre el desgaste de la herramienta y la tolerancia de la matriz al troquelar en Docol 1400M con un espesor de chapa de 1 mm.

Las calidades más habituales de Uddeholm utilizadas para la fabricación de estas piezas para automóviles son Caldie, Sleipner, Vanadis 8 Super-Clean, Vanadis 4 Extra SuperClean y Vancron SuperClean. Se pueden utilizar otras calidades en función de factores como diseño, tipo de lámina de acero y espesor.



RIEL DE TECHO

Docol 600DP–1000DP/DPX, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI

ARCO DE TECHO

Docol 600DP–1180CP, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI
Docol 900M–1700M, UC/EG

REFUERZO DE PILAR C

Docol 600DP–1000DP/DPX, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI

REFUERZO DE PILAR B

Docol 600DP–1180CP, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI

TRAVESAÑO

Docol 600DP–1180CP, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI
Docol 900M–1700M, UC/EG

VIGA TRANSVERSAL DE ASIENTO

Docol 1500M–Docol 1700M, UC/EG

REFUERZO DE UMBRAL

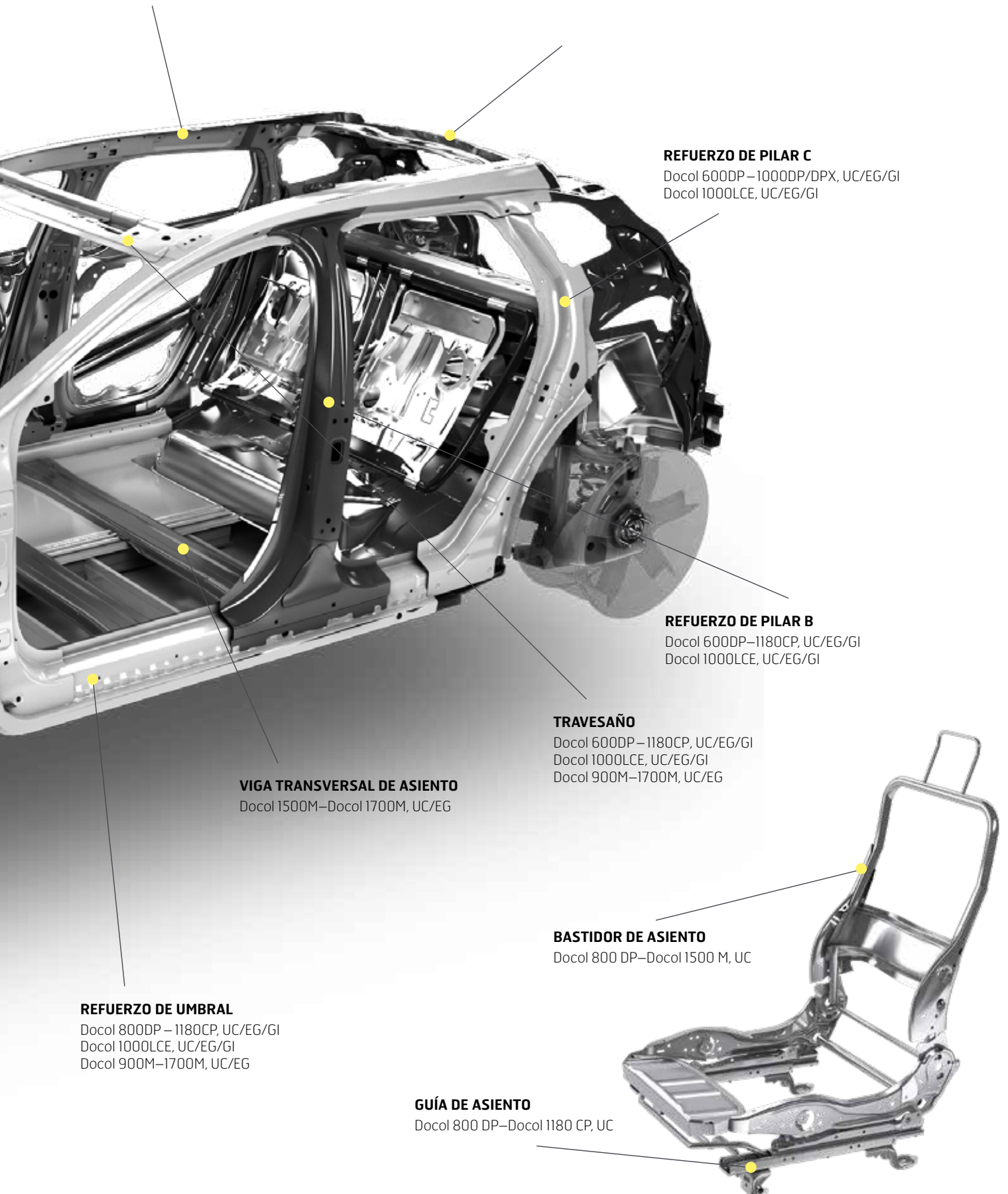
Docol 800DP–1180CP, UC/EG/GI
Docol 1000LCE, UC/EG/GI
Docol 900M–1700M, UC/EG

BASTIDOR DE ASIENTO

Docol 800 DP–Docol 1500 M, UC

GUÍA DE ASIENTO

Docol 800 DP–Docol 1180 CP, UC



Fuerza de troquelado y punzonado

La fuerza de troquelado/punzonado requerida es proporcional a la resistencia de la chapa de acero, el espesor de ésta y la longitud de la línea de punzonado o corte. En la **Figura 14** se muestra la fuerza de punzonado variable al punzonar un taladro de $\varnothing 5$ mm en una chapa de 1 mm de espesor con una holgura de la matriz del 10% en varios aceros avanzados de alta resistencia. La fuerza de punzonado/corte fino puede ser bastante alta al conformar las calidades de acero de ultra alta resistencia. Sin embargo, la reducción del espesor de la chapa de acero normalmente compensará el aumento de las fuerzas de corte o punzonado.

Al punzonar/cortar en las calidades totalmente martensíticas como Docol M, la fuerza es mayor y la ductilidad del material de trabajo es baja. Esto significa que se puede generar un retorno elástico o fuerza de recuperación. Esto se puede apreciar como una rápida amplitud de fuerza negativa, como se muestra en la **Figura 14**. La recuperación elástica genera tensiones en la herramienta que pueden conducir a grietas de fatiga después de cierto tiempo. Esto se muestra en la **Figura 15**. Para evitar problemas de producción deberán tenerse en cuenta los efectos de la fuerza de conformado en los anclajes y soportes de la herramienta, los radios agudos, así como el acabado superficial.

Al conformar calidades de chapa de acero de alta resistencia en el rango bajo resistencia, la ductilidad del material de trabajo es mayor lo cual reduce el problema de fatiga y rotura de la herramienta. Por esta razón debe centrarse la atención en las fuerzas generadas al punzonar/cortar aceros de alto límite elástico con la mayor resistencia, y considerar también cómo pueden reducirse las fuerzas. Se ha demostrado que la tolerancia de la herramienta tiene un efecto marginal en la fuerza de conformado. No obstante, la fuerza de conformado se reduce algo con un aumento de la holgura de la matriz. Normalmente, se puede conseguir una reducción de fuerza de troquelado/punzonado del 3 a 5% aumentando la tolerancia de la herramienta.

Reducción de la fuerza de troquelado/punzonado

Es importante utilizar los parámetros de punzonado y corte fino correctos. En la **sección Troquelado y punzonado** se explica cómo seleccionar la tolerancia de la matriz. A fin de evitar conformados simultáneos al punzonar distintos taladros en una operación, los punzones pueden ser de distintos largos. Esto reduce la fuerza requerida, ya que si no, puede ser considerable. El revestimiento del punzón no es una manera efectiva para reducir la fuerza necesaria de conformado. Por el contrario, la fuerza de troquelado/punzonado puede aumentar, tal como se muestra en la **Figura 18**. Un punzón revestido requiere una mayor fuerza de punzonado puesto que tiene una menor fricción entre la superficie exterior del punzón y la superficie de la chapa. La menor fricción hace que la iniciación de grietas en la chapa sea más difícil, lo que incrementa la fuerza de punzonado. El incremento de la fuerza facilita la aparición de grietas por fatiga en la herramienta. Cuando se inician las grietas, el revestimiento se desprende rápidamente. La forma más efectiva de reducir la fuerza de conformado es achaflanar la herramienta.

Preferiblemente se realiza de forma simétrica a fin de evitar cargas inclinadas en esta. El achaflanado sirve también para reducir el ruido. En la **Figura 16** y **Figura 17** se muestran diferentes formas de

achaflanar la herramienta. En la **Figura 18** se muestra cómo puede reducirse la fuerza de troquelado/punzonado utilizando punzones achaflanados simétricamente.

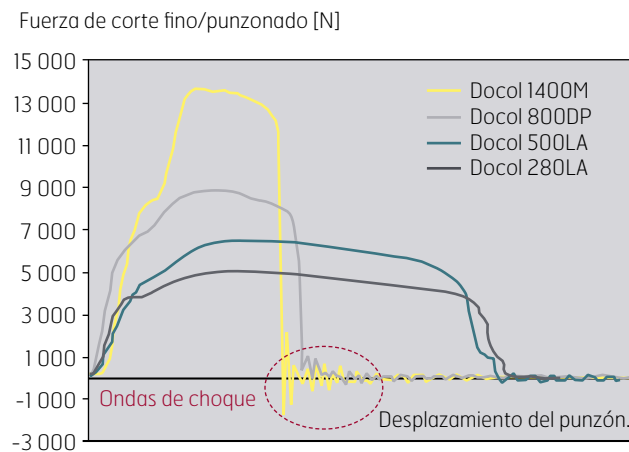


Figura 14. Fuerza de troquelado/punzonado para calidades de acero avanzado de alta resistencia.

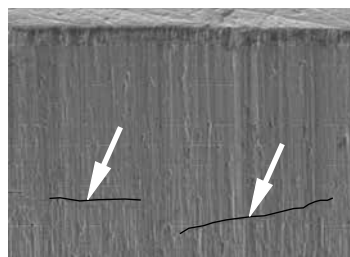


Figura 15. Propagación de grietas a causa de la fatiga.

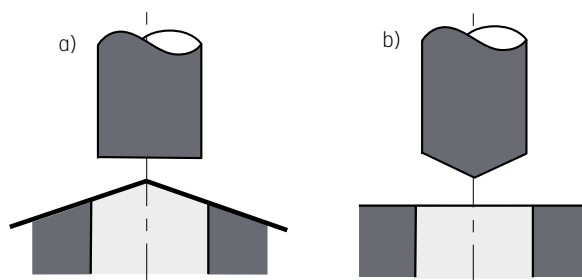


Figura 16. Herramientas achaflanadas para a) troquelado y b) punzonado.

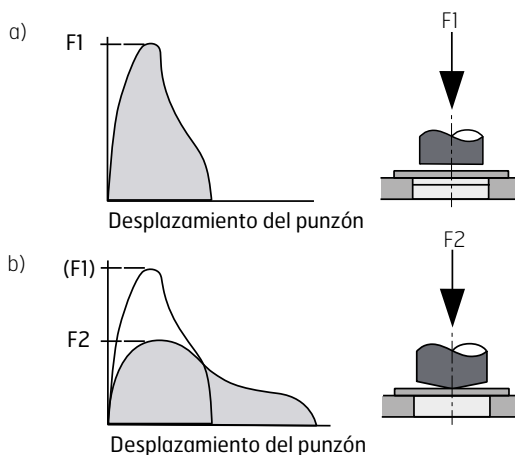


Figura 17. Fuerza de troquelado/punzonado en función del desplazamiento del punzón para a) punzón plano o b) punzón achaflanado.

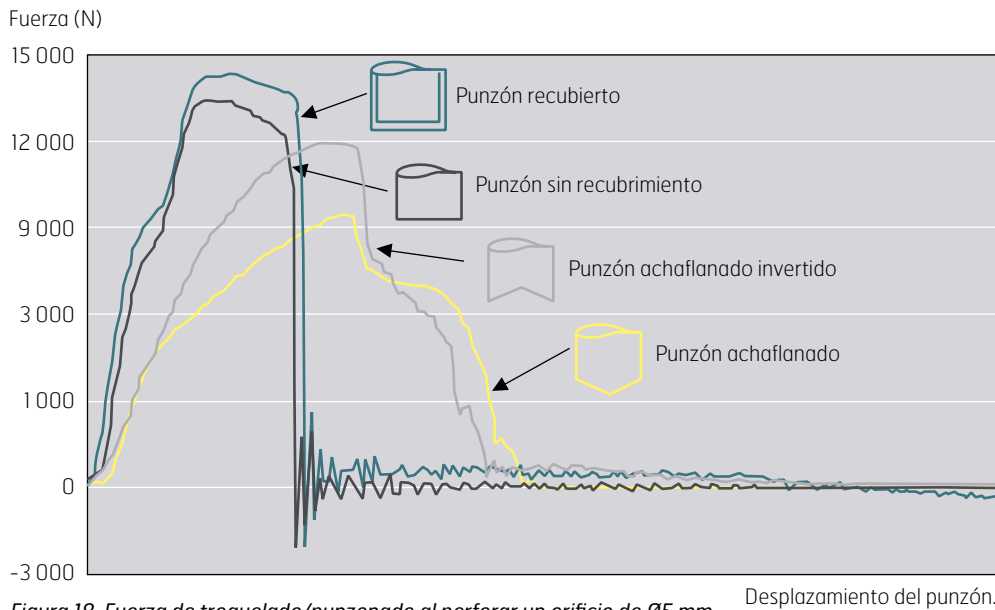


Figura 18. Fuerza de troquelado/punzonado al perforar un orificio de Ø5 mm en Docol 1400M de 1 mm de espesor con un 10% de tolerancia de matriz.

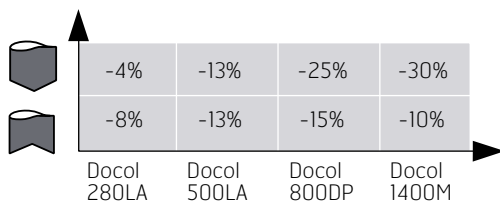


Figura 19. Reducción en porcentaje (%) de la fuerza de troquelado/punzonado para diferentes tipos de achaflanado del punzón (altura del chaflán 0,7 veces el espesor de la chapa).



Figura 20. Punzón achaflanado con zona central plana.

La fuerza de troquelado/punzonado se puede reducir en un 30% para Docol 1400M con un chaflán de 0,7 veces el espesor de la chapa. El tamaño del efecto de un punzón biselado depende del material de trabajo, como se muestra en la **Figura 19**. Para obtener un efecto reductor mayor al punzonar/perforar acero blando, el biselado debe aumentarse a aproximadamente 1,0-1,5 veces el espesor de la lámina. El chaflán no debe ser innecesariamente grande al troquelar/punzonar aceros avanzados de alta resistencia, solo lo suficientemente grande como para comenzar el corte antes de que toda la superficie del extremo del punzón entre en contacto con la superficie de la chapa. El uso de un chaflán innecesariamente grande aumentará el riesgo de deformación plástica de la punta del punzón.

Otra forma de reducir el riesgo de deformación plástica es utilizar un punzón achaflanado con una sección central plana, como se muestra en la **Figura 20**.

NOTA: Utilizar un punzón achaflanado no significa necesariamente que el desgaste de la herramienta sea menor. Las principales ventajas son la reducción de la fuerza y el ruido.

Corte y cizallamiento

Holgura de corte y ángulo de cizallamiento

En el cizallamiento, la holgura de corte es la distancia horizontal entre las cuchillas superior e inferior, y el ángulo de corte es el ángulo entre las cuchillas superior e inferior, ver **Figura 21**. El ángulo de corte se aplica normalmente a la cuchilla superior.

En general, se pueden utilizar holguras similares de corte a las que se aplican con aceros dulces. Las holguras de corte pueden ser algo más grandes usando cuchillas con un ángulo de corte comparado con las cuchillas paralelas. Las holguras de corte son normalmente más pequeñas comparadas con las de corte fino. Las tolerancias recomendadas de corte para aceros avanzados de alta resistencia se pueden ver en la **Figura 22**.

La selección del ángulo de corte se puede ver en la **Figura 23** para diferentes niveles de resistencia y espesores de chapa.

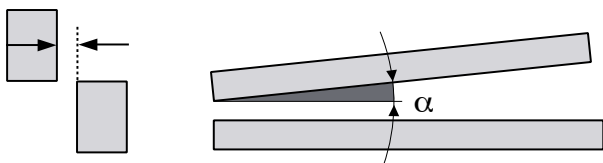


Figura 21. Holgura de corte y ángulo de cizallamiento, respectivamente.

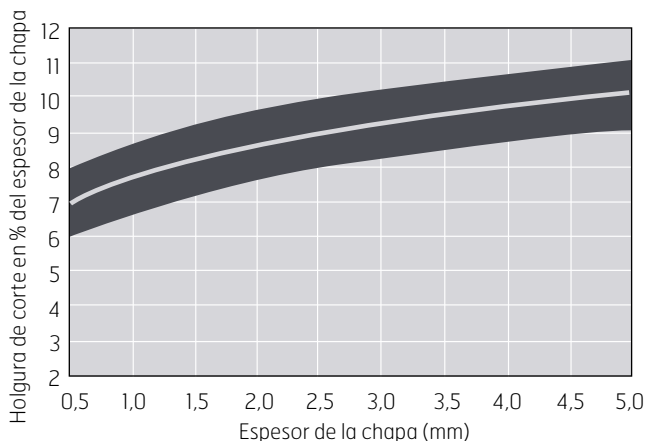


Figura 22. Holguras de corte recomendadas.

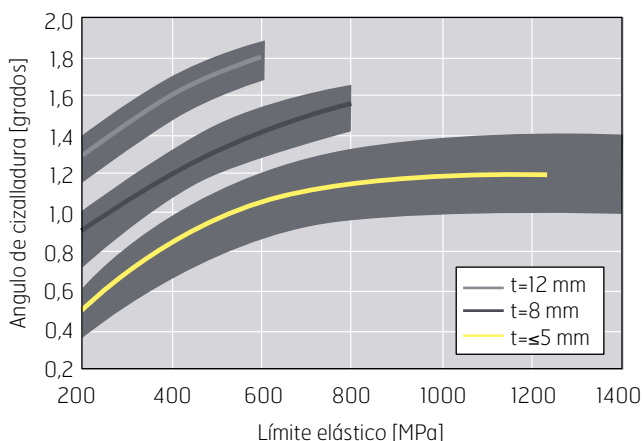


Figura 23. Ángulos de cizallamiento recomendados.

Apariencia del borde cortado de una chapa

La apariencia del borde cortado de una chapa es similar a cuando empleamos un troquel, vea la **sección Consideraciones generales**. La apariencia típica de borde cortado para tres calidades de acero se puede ver en la **Figura 24**.

Cuando se cambian los parámetros de corte a cizalladura la apariencia del borde cortado cambia. Una holgura de corte más grande con cuchillas paralelas da una mayor zona brillante. Por otro lado, una holgura mayor de corte cuando se utiliza un ángulo de corte da una zona brillante más pequeña. Cuando se utiliza un ángulo alto de cizallamiento en combinación con una holgura grande de corte, se pueden ver a veces marcas de desgarro o rotura en la zona de fractura, vea foto arriba a la derecha en **Figura 25**. Un ángulo de cizallamiento grande cuando se trabaja con calidad de acero Docol M puede resultar en un patrón ondulado en la zona de fractura, vea la **Figura 26**.

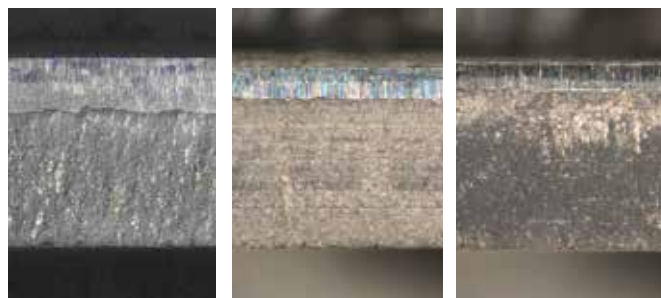


Figura 24. Apariencia del borde cortado de una chapa para Docol HR700LA, Docol 800DP-GI y Docol 1400M, respectivamente, con espesores de 2 mm, holgura de corte del 7% y ángulo de cizallamiento de 1°.

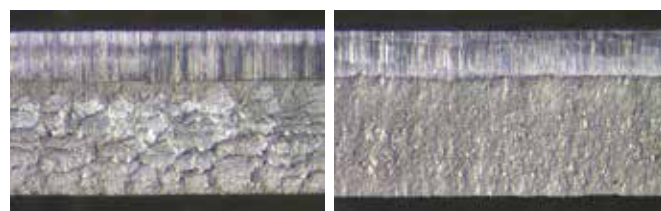


Figura 25. Apariencia del borde de una chapa para HR700LA, t=2 mm con diferentes condiciones de corte. La imagen de la izquierda indica que la holgura de corte y/o el ángulo de cizallamiento es demasiado grande. La imagen de la derecha indica que las condiciones de corte son correctas.

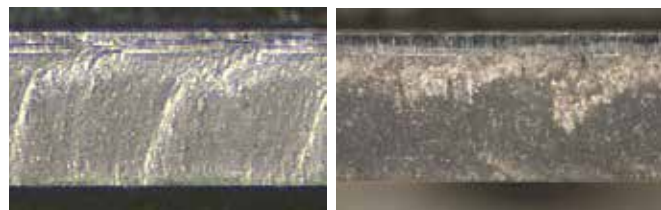


Figura 26. Apariencia del borde de una chapa para 1400M, t=2 mm con diferentes condiciones de corte. La imagen de la izquierda indica que la holgura de corte y/o el ángulo de cizallamiento es demasiado grande. La imagen de la derecha indica que las condiciones de corte son correctas.

Fuerza de cizallamiento

La fuerza de cizallamiento requerida es proporcional a la resistencia de la chapa de acero, el espesor de ésta y la longitud de la línea de conformado. La fuerza de cizallamiento puede ser bastante alta al conformar las calidades de acero de ultra alta resistencia. Para evitar altas fuerzas de cizallamiento se debe aplicar un ángulo de cizallamiento. En cuanto se usa un ángulo de cizallamiento, la diferencia entre aceros avanzados de alta resistencia y aceros suaves es mucho menor, ver la **Figura 27**. La tolerancia de corte tiene muy poca influencia en la fuerza total de cizalladura. La mayor reducción de fuerza es cuando se pasa de un cizallamiento paralelo a un ángulo de cizalladura de 1°. No hay ningún beneficio en utilizar ángulos de cizallamiento > 1.5°. La reducción en la fuerza total de cizallamiento es baja pero el esfuerzo en el borde de la herramienta será mayor e incrementará el riesgo de melladura del borde.

En un proceso de cizalladura de aceros avanzados de alta resistencia, a menudo la primera cuestión es:

– ¿Podré gestionar la transición del acero al carbono al acero avanzado de alta resistencia con el mismo equipo de producción que tengo?

Se requiere una formulación para la fuerza de cizalladura a fin de responder esta pregunta. Para éste propósito SSAB utiliza la siguiente fórmula:

$$F = \frac{K_{sk} \cdot t^2}{2 \tan \alpha}$$

En la que:

F = fuerza de cizallamiento

K_{sk} = resistencia al cizallamiento = $R_m \cdot \text{factor } e$

α = ángulo de cizallamiento

T = espesor de chapa

La resistencia al cizallamiento se calcula como el factor-e multiplicado por la resistencia a la tracción. El factor-e varía con la resistencia a la tracción del material. Para un acero suave, por ejemplo CR1, el factor-e es igual a 0.8, pero para un acero de alta resistencia el factor-e disminuye a 0.55 con un cizallamiento en paralelo. Con un ángulo de cizallamiento se puede disminuir a 0.3 para los aceros de mayor resistencia. En el diagrama de la **Figura 28** se muestra el factor-e como función de la resistencia a la tracción del material de trabajo con ambos cizallamientos, en paralelo y con ángulo. El factor-e se reduce significativamente para los aceros avanzados de alta resistencia cuando se utiliza un ángulo de cizallamiento.

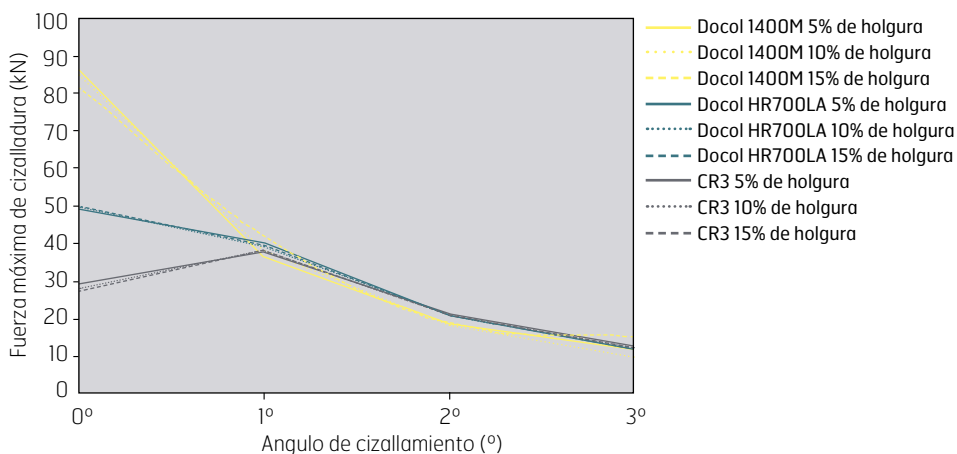


Figura 27. Fuerza de cizallamiento como función del ángulo de holgura para diferentes holguras de corte. $t=2$ mm.

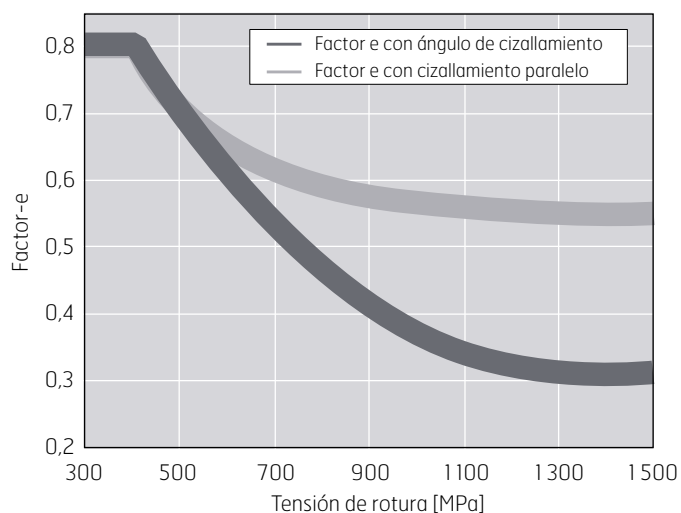


Figura 28. factor-e como función de la tensión de rotura del material de trabajo.

Ejemplo 1:

Chapa de acero al carbono con espesor de 8 mm.

Material de trabajo: SSAB Domex 220YP ($R_m = 350$ MPa)

Fuerza de cizallamiento: $0,8 \times 350 \times 64 / 2 \tan 0,9 = 570$ kN

Ejemplo 2:

Chapa de acero de extra alta resistencia con el mismo espesor = 8 mm

Material de trabajo: Docol HR700LA ($R_m = 800$ MPa)

Fuerza de cizallamiento: $0,47 \times 800 \times 64 / 2 \tan 1,5 = 459$ kN

Ejemplo 3:

Chapa de ultra alta resistencia con espesor de chapa reducido en un 10% $a = 7,2$ mm

Material de trabajo: Docol HR700LA ($R_m = 800$ MPa)

Fuerza de cizallamiento: $0,47 \times 800 \times 51,84 / 2 \tan 1,5 = 372$ kN

Los ejemplos muestran que la fuerza de cizallamiento disminuye al pasar de aceros al carbono a aceros de extra alta resistencia (usando un ángulo de cizallamiento igual al espesor de la chapa). Si se reduce el espesor de la chapa de extra alta resistencia (con una reducción moderada de un 10% en el ejemplo 3), la fuerza de cizallado se reduce en un 35% de su valor original.

Selección de acero para herramientas y tratamiento de superficie en aplicaciones de corte

Tratamiento de superficie

El aplicar o no un recubrimiento a una herramienta es una cuestión que a menudo surge durante el proceso de fabricación. Pero antes de aplicar un revestimiento, es importante identificar el tipo de desgaste. Para aceros avanzados de alta resistencia, el tipo de desgaste difiere dependiendo de la microestructura y el nivel de resistencia del acero. Para los aceros de fase dual, como Docol 800DP, el desgaste adhesivo es dominante y ciertamente un revestimiento reducirá los problemas de adherencia, tal y como se muestra en la **Figura 29**. Las chapas galvanizadas por inmersión en caliente tienen menos tendencia a desgastarse debido a algunas propiedades lubricantes de la capa de zinc.

Para Aceros micro aleados laminados en caliente el tipo de desgaste es tanto adhesivo como abrasivo. Si un acero laminado en caliente va a ser cizallado sin decapar, el desgaste que sufrirá la herramienta será considerablemente superior y más abrasivo. En cualquier caso, los recubrimientos reducirán el desgaste de las herramientas cuando cizallen.

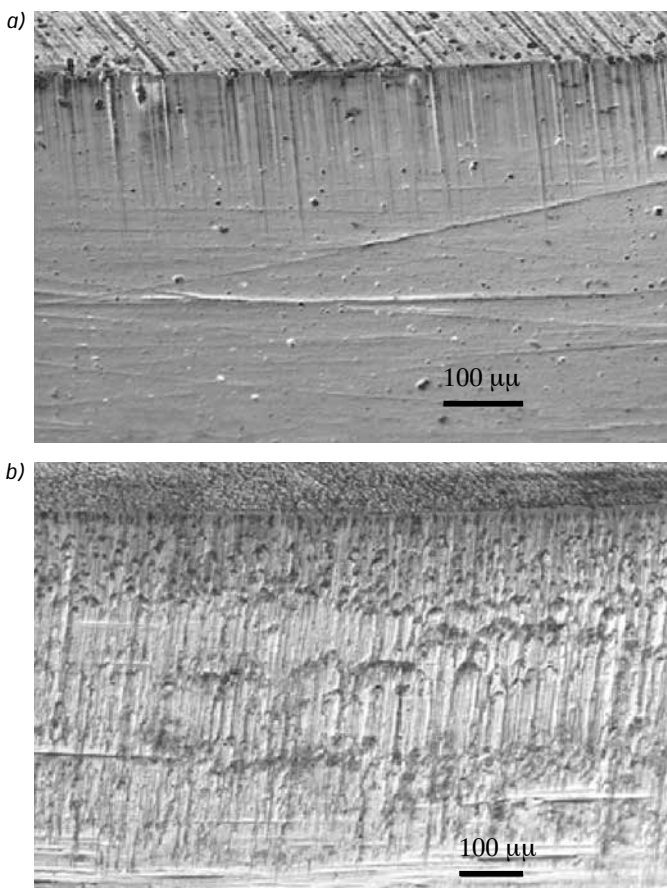


Figura 29. Un borde cortante recubierto con a) Recubrimiento PVD (TiAlN) y b) sin recubrimiento después de producir 200 000 piezas en Docol 800DP.

Para aceros martensíticos (Docol 1200 M y Docol 1400 M) la adherencia no será un mecanismo de desgaste dominante. El tipo de desgaste será principalmente abrasivo, con algunas grietas por fatiga visibles, tal y como se muestra en la **Figura 30**.

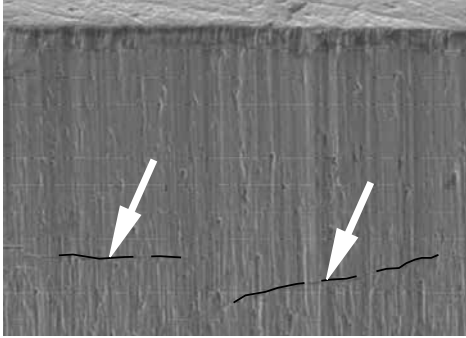


Figura 30. Desgaste típico en un borde sin recubrimiento después de producir 100 000 piezas en Docol 1400M.

Cuando se generan las grietas por fatiga, los revestimientos no van a mantenerse demasiado tiempo en la herramienta. Si se optimiza la preparación antes de aplicar el recubrimiento y se utiliza el recubrimiento más adecuado el resultado puede mejorarse y el recubrimiento puede permanecer incluso después de las 100 000 piezas, tal y como se muestra en la **Figura 31**. En cualquier caso, se debe evitar el nitrurado de los bordes del punzón debido a un alto riesgo de agrietamiento de dichos bordes.

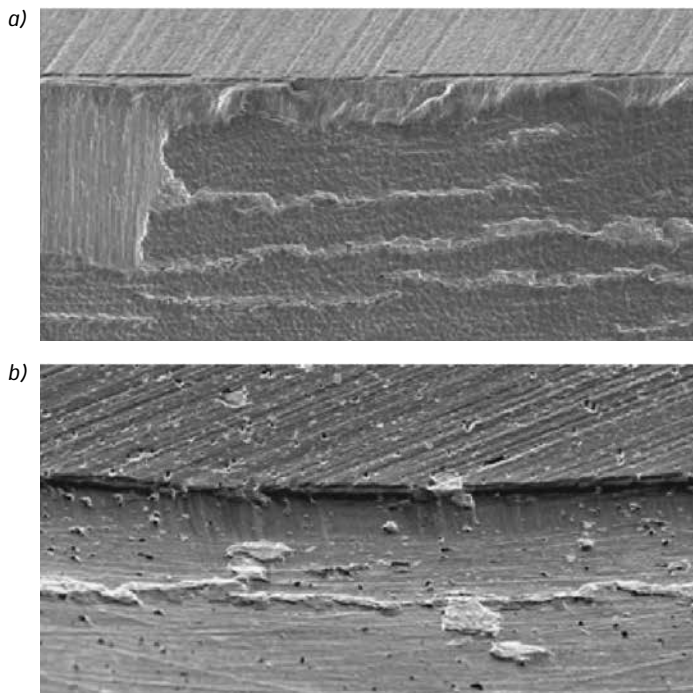


Figura 31. Apariencia del borde de una herramienta después de 100 000 piezas producidas en Docol 1400M. a) Muestra un recubrimiento de CVD TiCN que se ha descascarillado casi por completo. b) Muestra un recubrimiento de TiAlN multicapa con un rendimiento algo mejor.

Selección de acero para herramientas

Para los propósitos de selección del acero para herramientas es conveniente agrupar los aceros avanzados de alta resistencia del acero como sigue:

- Docol HR LA
- Docol DP/DL/LA y Roll
- Docol DP-GI/CP-GI/LA-GI y Roll-GI
- Docol M y Docol M-EG

Esto es porque los ensayos preliminares de punzonado/corte fino han revelado que cada uno de los grupos de acero se comporta de manera diferente, es decir cada grupo pone diferentes demandas en el material de la herramienta. Para simplificar el acceso a la información necesaria y reducir el riesgo de confusiones, la información relevante para un grupo específico se presenta independientemente de la información válida para los otros grupos, aunque la misma información se repita varias veces.

Calidades de Docol HR LA, sin revestimiento

Estos aceros se laminan en caliente, son microaleados y tienen un contenido de carbono relativamente alto. Están disponibles decapados o sin decapar, con rango de espesores de 2-12 mm (máximo 10 mm para Docol LA).

Las demandas en el acero de herramienta son:

- Alta resistencia al desgaste debido a un alto contenido en carbono, alta resistencia y espesor. La alta resistencia al desgaste es particularmente necesaria para el material no decapado, ya que la capa superficial es muy abrasiva.
- Alta resistencia a las melladuras, en parte debido a la relativa alta resistencia, pero principalmente debido al rango de espesores.
- Buena resistencia a la adherencia debido a la alta resistencia y rango de espesores.

Docol HR LA es el grupo con mayores demandas en el material de la herramienta porque el rango de espesores para estas calidades es, de lejos, el más amplio.

Las calidades apropiadas como pauta a la selección del acero de herramienta son:

- Uddeholm Calmax
- Uddeholm Caldie
- Uddeholm Sleipner
- Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean
- Uddeholm Vanadis 8 SuperClean
- Uddeholm Vancron SuperClean

Los perfiles de las propiedades de estos aceros para herramientas se presentan en la **Tabla 3**.

A continuación se muestra algunos aspectos generales a considerar para las calidades recomendadas del acero para herramientas. Para las calidades de acero Docol HR LA sin revestimiento:

- Se debe usar Uddeholm Caldie para contrarrestar la melladura.
- Uddeholm Sleipner se debe utilizar para series cortas o medias de producción de chapa fina en los rangos inferiores de espesor.
- Uddeholm Vanadis 8 SuperClean se puede utilizar para ciclos de producción largos cuando la alta resistencia al desgaste es el requisito más importante.
- Se debe utilizar Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean cuando se necesite una sólida combinación de resistencia al desgaste y al astillado, por ejemplo, para ciclos de producción largos con piezas más gruesas y de geometrías más complejas.
- Uddeholm Vancron SuperClean sin revestimiento se debe utilizar para series de producción largas para contrarrestar el agarrotamiento cuando se troquele/punzone chapa más fina y decapada.
- Las capas del recubrimiento tales como CVD o PVD se pueden utilizar para contrarrestar el desgaste y el agarrotamiento. Todas las calidades del acero de herramienta mencionadas arriba pueden estar revestidas, pero Uddeholm Vancron SuperClean normalmente se utiliza sin revestimiento.
- Uddeholm Calmax se puede revestir con CVD pero solo con revestimiento de PVD por debajo de 250 °C.
- No se recomienda el nitrurado ya que puede causar fácilmente la melladura del borde de la herramienta debido a la fragilidad superficial.
- El nivel de dureza utilizado depende del espesor de la lámina y de la geometría de la pieza. Generalmente estará en el rango de entre 56 y 64 HRC.

Calidades de Docol DP/DL/LA y Roll, sin recubrimiento

Los aceros DP/DL, del LA y Roll son aceros laminados en frío de fase dual con bajo contenido en carbono. Estas calidades están disponibles en espesores desde 0,5 mm hasta 2,1 mm. Estos aceros están disponibles en espesores a partir de 0.5 a 3.0 milímetros. Las demandas en el acero de herramienta son:

- Alta resistencia al desgaste por abrasión debido al alto nivel de resistencia mecánica.
- Alta resistencia a la melladura debido al alto nivel de resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la adherencia al alto nivel de resistencia mecánica y a la presencia de ferrita en la chapa.

Las calidades apropiadas y los niveles recomendados de dureza para los diversos niveles de resistencia de la chapa se presentan en la **Tabla 5**.

A continuación se muestra algunos aspectos generales a considerar para las calidades recomendadas del acero para herramientas.

- Se pueden usar revestimientos de CVD o PVD para todos los materiales de lámina con el fin de prevenir el desgaste y el agarrotamiento. Todas las calidades de aceros para herramientas mencionadas abajo se pueden revestir, pero Uddeholm Vancron SuperClean se usa generalmente sin revestimiento.
- Uddeholm Calmax se puede recubrir con CVD, pero solo con PVD por debajo de 250 °C.
- No se recomienda el nitrurado, ya que puede causar astillado fácilmente.
- El nivel de dureza utilizado depende del espesor de la lámina y de la geometría de la pieza. Generalmente estará en el rango de entre 56 y 64 HRC.

SSAB Calidades de la chapa de acero	Calidades de acero para herramientas de Uddeholm	Dureza de la herramienta (HRC)
Docol 500LA-UC Docol 500DP-UC Docol 500DL-UC	Calmax Caldie Sleipner Sverker 21 Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥56
Docol 600DP-UC Docol 600DL-UC	Calmax Caldie Sleipner Sverker 21 Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥58
Docol 800DP-UC Docol 800DL-UC Docol 1000DP-UC/EG Docol Roll 800-UC Docol Roll 1000-UC	Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥60

Tabla 5. Calidades recomendadas de aceros para herramientas para troquelado de calidades de Docol sin recubrimiento.

Para las calidades de chapas de acero Docol 500 LA/DP/DL y Docol 600 DP/DL:

- Se debe usar Uddeholm Caldie para contrarrestar la melladura.
- Se debe utilizar Uddeholm Sleipner y Uddeholm Sverker 21 para ciclos de producción cortos y medios.
- Se debe utilizar Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean cuando se necesite una sólida combinación de resistencia al desgaste y al astillado, por ejemplo, para ciclos de producción largos con piezas más gruesas y de geometrías más complejas.
- Se puede usar Uddeholm Vanadis 8 SuperClean en ciclos de producción largos para piezas de geometrías sencillas punzonadas/perforadas en un material de lámina más fina.
- Se debe utilizar Vancron SuperClean sin revestir en ciclos de producción largos para evitar el agarrotamiento.

Para las calidades de chapas de acero Docol 800 DP/DL/Roll y and Docol 1000DP/DP-EG/Roll/LCE:

- Se debe usar Uddeholm Caldie para contrarrestar las melladuras.
- Uddeholm Sleipner se debe utilizar para series de producción cortas o medias.
- Se debe utilizar Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean cuando se necesite una sólida combinación de resistencia al desgaste y al astillado, por ejemplo, para ciclos de producción largos con piezas más gruesas y de geometrías más complejas.
- Se puede usar Uddeholm Vanadis 8 SuperClean en ciclos de producción largos para piezas de geometrías sencillas punzonadas/perforadas en un material de lámina más fina.

Docol DP/CP/LA, galvanizado por inmersión en caliente

Las calidades de chapa de acero Docol DP/CP-GI son aceros de fase compleja/fase dual laminados en frío y galvanizados por inmersión en caliente. La calidad Docol LA-GI es un acero microaleado galvanizado por inmersión en caliente. Estas calidades están disponibles en espesores desde 0,5 mm hasta 3 mm.

Las demandas en el acero de herramienta son:

- Alta resistencia al desgaste por abrasión en las series largas de producción, aunque el desgaste es mucho menor que en las calidades no galvanizadas, ya que el recubrimiento de zinc actúa de lubricante.
- Alta resistencia a la melladura debido al alto nivel de resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la adherencia al alto nivel de resistencia mecánica y a la presencia de ferrita en la chapa.

El recubrimiento de zinc blando y pegajoso tiende a adherirse a la superficie de la herramienta y se debe limpiar periódicamente.

Las calidades apropiadas y los niveles recomendados de dureza para los diversos niveles de resistencia de la chapa se presentan en la **Tabla 6**.

SSAB Calidades de la chapa de acero	Calidades de acero para herramientas de Uddeholm	Dureza de la herramienta (HRC)
Docol 460LA-GI Docol 500LA-GI Docol 500DP-GI	Calmax Caldie Sleipner Sverker 21 Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥56
Docol 600DP-GI Docol 600CP-GI Docol 780CP-GI Docol 980CP-GI	Calmax Caldie Sleipner Sverker 21 Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥58
Docol 800DP-GI Docol 800DPX-GI Docol 980DP-GI Docol 1000DPX-GI	Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean Vancron SuperClean	≥60

Tabla 6. Calidades recomendadas de aceros para herramientas para troquelado de calidades de Docol galvanizado por inmersión en caliente.

A continuación se muestra algunos aspectos generales a considerar para las calidades recomendadas del acero para herramientas.

- Se puede usar revestimientos de CVD o PVD para todos los materiales de lámina con el fin de evitar el desgaste y la corrosión. Todas las calidades de aceros para herramientas mencionadas abajo se pueden revestir, pero Uddeholm Vancron SuperClean se usa generalmente sin revestimiento.
- Uddeholm Calmax se puede recubrir con CVD, pero solo con PVD por debajo de 250 °C.
- No se recomienda el nitrurado, ya que puede causar astillado fácilmente.

Para las calidades de chapa de acero galvanizado por inmersión en caliente 460LA, 500LA/DP, 600DP/CP y 780CP:

- Se debe utilizar Uddeholm Calmax y Uddeholm Caldie para prevenir el astillado.
- Se debe utilizar Uddeholm Sleipner y Uddeholm Sverker 21 para ciclos de producción cortos y medios.
- Se debe utilizar Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean cuando se necesite una sólida combinación de resistencia al desgaste y al astillado, por ejemplo, para ciclos de producción largos con piezas más gruesas y de geometrías más complejas.
- Se puede usar Uddeholm Vanadis 8 SuperClean en ciclos de producción largos para piezas de geometrías sencillas punzonadas/perforadas en un material de lámina más fina.
- Se debe utilizar Uddeholm Vancron SuperClean para ciclos de producción largos con el fin de evitar el astillado.

Para las calidades de chapa de acero galvanizado por inmersión en caliente 800/1000DPX, 800/980DP y 980CP:

- Se debe usar Uddeholm Caldie para contrarrestar las melladuras.
- Uddeholm Sleipner se debe utilizar para series de producción cortas o medias.
- Se debe utilizar Uddeholm Vanadis 4 Extra cuando se necesite una sólida combinación de resistencia al desgaste y al astillado, por ejemplo, para ciclos de producción largos con piezas más gruesas y de geometrías más complejas.

- Se puede usar Uddeholm Vanadis 8 SuperClean en ciclos de producción largos para piezas de geometrías sencillas punzonadas/perforadas en un material de lámina más fina.
- Se debe utilizar Uddeholm Vancron SuperClean para ciclos de producción largos con el fin de evitar el astillado.

Calidades de Docol M, sin revestimiento y electrogalvanizado

Docol M son aceros martensíticos laminados en frío con bajo contenido de carbono. Las calidades M-EG tienen un recubrimiento de zinc electrodepositado. Estas calidades de acero están disponibles en espesores a partir de 0.5 hasta 2.1 milímetros.

Las calidades apropiadas del acero para herramientas y los niveles recomendados de la dureza para los diversos niveles de resistencia de la chapa se dan en la **Tabla 7**.

A continuación se muestra algunos aspectos generales a considerar para las calidades recomendadas del acero para herramientas:

- Uddeholm Caldie debe ser utilizado para contrarrestar la melladura y adhesión.
- Uddeholm Sleipner se debe utilizar para series de producción cortas o medias.
- Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean se debe utilizar cuando se necesita una combinación fuerte de resistencia al desgaste y a la melladura, es decir para series largas de producción.
- Uddeholm Vanadis 8 SuperClean se puede utilizar para ciclos de producción largos cuando la alta resistencia al desgaste es el requisito más importante. Principalmente para geometrías de piezas simples que se troquelean/punzonan a partir de material de chapa más fina.
- Se puede utilizar recubrimiento, pero debido al mayor riesgo de deformación plástica, se recomiendan revestimientos dúplex. El nitrurado con plasma proporcionará un mejor soporte para el recubrimiento de PVD.
- No se recomienda el nitrurado, ya que puede causar astillado fácilmente.

SSAB Calidades de la chapa de acero	Calidades de acero para herramientas de Uddeholm	Dureza de la herramienta (HRC)
Docol 1200M – UC/EG Docol 1400M – UC/EG Docol 1500M – UC/EG	Caldie Sleipner Vanadis 4 Extra SuperClean Vanadis 8 SuperClean	≥ 60

Tabla 7. Calidades de aceros para herramientas para troquelado de calidades de acero Docol M.



Ejemplos de aplicación

Refuerzo de pilar B¹

Herramienta para refuerzo del pilar B con dos selecciones de acero para herramientas. Ambas elecciones han demostrado funcionar sin problemas.



Figura 32. Refuerzo de pilar B.

Operaciones de trabajo en frío	Corte fino y plegado
Material de trabajo:	Docol 800DP–UC
Espesor del material de trabajo:	2,0 mm
Cantidad de piezas fabricadas anualmente:	82 000
Material de herramienta en punzón izquierdo:	Uddeholm Sleipner
Material de herramienta en punzón derecho:	Uddeholm Sverker 21
Material de herramienta para matriz izquierda:	Uddeholm Sleipner
Material de herramienta para matriz derecha:	Uddeholm Sverker 21
Dureza de la matriz de corte fino izquierdo:	HRC 62
Dureza del punzón:	HRC 60
Material de herramienta en herramienta de conformado izquierda:	Uddeholm Vancron SuperClean
Material de herramienta en herramienta de conformado derecha:	Uddeholm Sleipner + CVD, TiC+TiN
Dureza de la matriz de conformado izquierda:	HRC 62
Dureza de la matriz de conformado derecha:	HRC 62
Rugosidad superficial de las herramientas de conformado:	Ra 0.1 μm
Lubricación	emulsión de aceite al 8%

Tabla 8

¹ Cortesía de Finnveden Metal Structures, Olofström, Suecia.



Parachoques para vehículos de pasajeros²

Mecanizado de parachoques para vehículos de pasajeros.

Operaciones de trabajo en frío	Corte fino y estampación
Material de trabajo:	Docol 1000DP–UC
Espesor del material de trabajo:	2,0 mm
Cantidad de piezas fabricadas anualmente:	300 000
Material de herramienta en herramienta de troquelado:	Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean
Dureza de la herramienta de troquelado:	HRC 60
Material de herramienta en herramienta de conformado:	Uddeholm Vancron SuperClean
Material de herramienta en herramienta de conformado derecha:	Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean + CVD, TiCN
Dureza de la herramienta de conformado:	HRC 60
Rugosidad superficial de las herramientas de conformado:	-
Lubricación	-

Tabla 9

² Cortesía de Essa Palau, Barcelona, España.



Figura 33. Parachoques para vehículos de pasajeros.



Figura 34. Soporte de gancho de remolque.

Soporte de gancho de remolque³

Herramienta para soporte de gancho de remolque.

Operaciones de trabajo en frío	Corte fino y plegado
Material de trabajo:	Docol 1400M–UC
Espesor del material de trabajo:	2 mm
Cantidad de piezas fabricadas anualmente:	82 000
Material de la punzón de corte fino:	Uddeholm Sleipner
Material de la matriz de corte fino:	Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean
Dureza de herramientas de troquelado:	HRC 60
Material del punzón de conformación:	Uddeholm Sleipner
Material de la matriz de conformación:	Uddeholm Vanadis 4 Extra SuperClean
Dureza del punzón de conformación:	HRC 58
Dureza de la matriz de conformado:	HRC 60
Rugosidad superficial de las herramientas de conformado:	-
Lubricación	Sin lubricación adicional

Tabla 10

³ Cortesía de Finnveden Metal Structures, Olofström, Suecia.

Lubricación

Operaciones con herramientas de conformado

En las operaciones de conformación la fricción entre las dos caras en movimiento relativo puede reducirse lubricando las superficies. El tipo de lubricación más común en la operación de prensado de chapa es una lubricación mixta, en la que el espesor de la capa lubricante permite el contacto entre las aristas de la herramienta y la superficie del material de trabajo. El lubricante se queda encerrado entre las irregularidades de la superficie y, junto con las aristas de la superficie, toma presión de contacto en el proceso de conformado. Esto supone más exigencias para la superficie del material de trabajo (para material laminado en frío, EN 10130- la superficie normal es válida), y en la capacidad de los lubricantes en neutralizar las superficies reactivas recién desarrolladas.

La viscosidad del lubricante tiene una gran influencia en el proceso de conformado de chapa. Los lubricantes de baja viscosidad (25-50 cSt) se utilizan para el conformado sencillo de chapa, pero para operaciones más complejas, debe utilizarse un lubricante con mayor viscosidad. Ver **Figura 35** para la influencia de la viscosidad del lubricante.

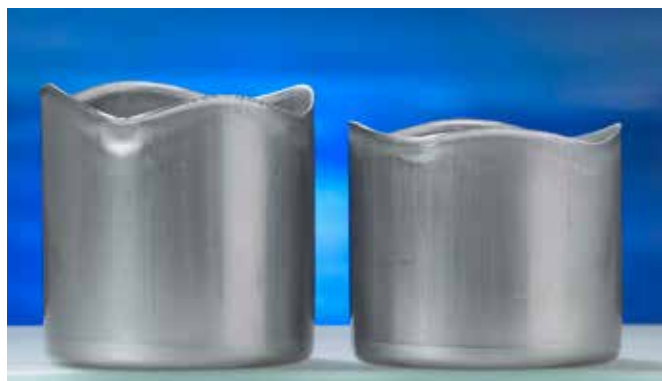


Figura 35. Influencia de la viscosidad del lubricante en embutición. Máxima profundidad utilizando lubricante con viscosidad 500 cSt (izquierda) y 40 cSt (derecha).

Operaciones con herramientas de corte

La importancia de utilizar lubricantes adicionales al realizar el corte fino/punzonado y el corte/cizalladura de aceros avanzados de alta resistencia depende de varios factores. El tipo de acero, el espesor de la chapa y su superficie tienen una influencia importante, así como la geometría. En general, la lubricación es más importante para la chapa de baja resistencia, material más grueso y formas más complicadas, como por ejemplo el punzonado en esquinas con radios agudos. Los lubricantes recomendados para conformar aceros de alta resistencia deben ser resistentes a la alta presión de contacto. La necesidad de lubricantes adicionales difiere dependiendo del tipo de acero según se indica a continuación.

Calidades de Docol HR LA, sin revestimiento

Para los aceros laminados en caliente el uso de lubricación adicional beneficiará la vida de la herramienta. En particular, para las chapas gruesas la lubricación puede, por ejemplo, reducir la fuerza de corte así como la fuerza de retracción debido a la baja fricción.

Docol DP/DL/LA, sin revestimiento

Es una buena práctica el utilizar lubricantes cuando se punzonan o se hace el corte fino de los aceros avanzados de alta resistencia de estos tipos. El contenido de ferrita de estos aceros introduce una cierta cantidad de adhesiones al punzón. Esto se puede reducir utilizando lubricantes adicionales.

Calidades de Docol DP/CP/LA, galvanizado por inmersión en caliente

La necesidad de lubricantes es menor cuando se punzona/corta el material galvanizado en caliente. La superficie galvanizada ofrece un cierto efecto lubricante. El revestimiento de zinc tiende a adherirse a la superficie de la herramienta después de un tiempo en producción y debe limpiarse periódicamente.

Calidades de Docol M, sin revestimiento y electrogalvanizado

Para aceros totalmente martensíticos como Docol M, la necesidad de lubricantes adicionales es pequeña. El aceitado del material da la lubricación adecuada para el punzonado/corte fino y el corte/cizalladura. Estas calidades de aceros no tienen tendencia a adherirse a la herramienta.

La necesidad de los lubricantes es menor cuando se punzonan/cortan aceros electro galvanizados como Docol M+ZE. La superficie galvanizada ofrece un cierto efecto lubricante. El revestimiento de zinc tiende a adherirse a la superficie de la herramienta después de un tiempo en producción y debe limpiarse periódicamente.

Economía del mecanizado

Es muy importante que una herramienta pueda producir la cantidad de piezas requeridas con un tiempo mínimo en paros de mantenimiento. Los paros de producción debidos a una rotura de la herramienta o a una necesidad de mantenimiento frecuente crean demoras de producción costosas y baja productividad en general. Puede haber algunas posibles zonas problemáticas en la herramienta.

La cadena que va desde el diseño de la herramienta hasta su mantenimiento debe permanecer intacta – cualquier eslabón débil puede generar ineficiencias. Una de los eslabones más importantes es el acero para la herramienta. El material debe tener las propiedades adecuadas para la aplicación a la que debe ser destinado y contar con una calidad alta y consistente a fin de contar con una herramienta fiable.

Los avanzados procesos de fabricación del acero como el proceso pulvimetalúrgico (PM), el proceso de pulverizado (SF), el proceso de electro afinado de escoria (ESR) y la metalurgia convencional de alta calidad, demuestran que se realizan esfuerzos adicionales en la producción del acero para herramientas, lo que resulta en aceros que pueden ser algo más caros que los aceros estándar. De todas formas, no debe olvidarse que el coste del acero para herramientas es tan solo una pequeña fracción del coste total de producción de éste – ¡es tan solo la punta del iceberg!

Si tenemos en cuenta los costes de producción, incluyendo los costes por paradas y mantenimiento, para un cierto lote de fabricación, la utilización de un acero para herramientas de alta calidad creará un ligero incremento del coste de la herramienta, pero normalmente aportará posteriormente un gran retorno de esta inversión. Esto se ilustra en la **Figura 37**.



Figura 36. El coste del acero para herramientas - solo es la punta del iceberg

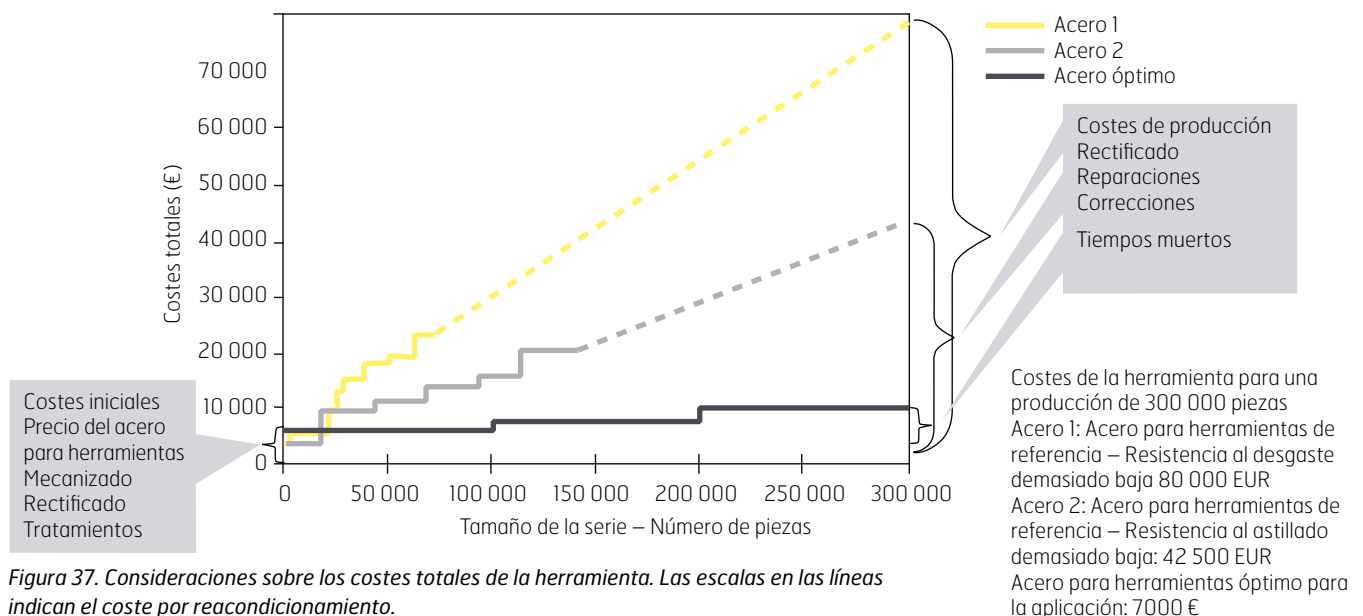
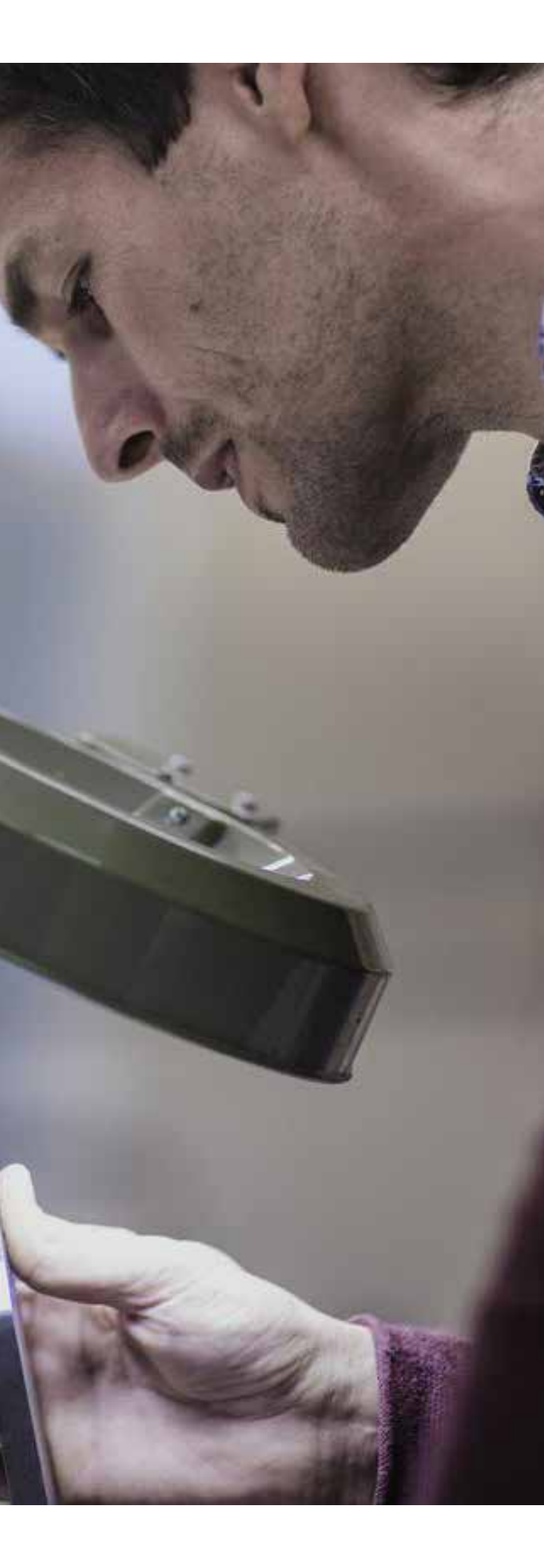


Figura 37. Consideraciones sobre los costes totales de la herramienta. Las escalas en las líneas indican el coste por reacondicionamiento.





Asistencia técnica

Asesoramiento de expertos

SSAB puede ayudarte a aprovechar al máximo las ventajas que tienen los aceros avanzados de alta resistencia.

Nuestros expertos cuentan con muchos años de experiencia seleccionando acero avanzado de alto límite elástico y acero para herramientas para aplicaciones de trabajo en frío.

Al cambiar a un acero avanzado de alta resistencia, es importante el integrar la selección del material, diseño y procesos de producción desde el inicio. Solo así es posible optimizar el producto y los procesos de producción tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Los expertos del Knowledge Service Center de SSAB cuentan con una larga experiencia y conocimientos en la selección del material y su proceso, así como una competencia líder en diseño, conformado y unión. Los expertos en Aplicaciones de Ingeniería son grandes conocedores en diseño, conformado, soldadura y protección de superficies. La asistencia instantánea también está disponible en Internet en www.ssab.com, proporcionando acceso completo a una base de datos completa con datos detallados de los productos, programas de productos descargables, gráficos y otra información que simplifica el diseño y la producción.

Los expertos en las oficinas de ventas locales pueden proporcionar asesoramiento y solucionar problemas realizando visitas locales directas.

Recursos avanzados para realización de análisis

Nuestras compañías cuentan con el equipo más avanzado para asistir rápidamente a los clientes en la selección de la calidad de chapa de acero, el adecuado diseño y el acero para herramientas junto con la solución de tratamiento térmico correcto.

En SSAB, se incluye además:

- **El método de elementos finitos (FEM)**

Este método puede utilizarse para simular todas las etapas del desarrollo de una pieza, como la selección del acero, forma de la estampa, método de trabajo, y forma geométrica final de la pieza. El FEM puede también utilizarse para calcular la capacidad de absorción de energía de una pieza en un accidente. Todas las variantes concebibles en el diseño de la herramienta, radios, diseño, espesor y calidad del acero se pueden probar en un entorno informatizado a fin de encontrar la solución óptima.

- **Equipos ARAMIS y ASAME**

Este equipamiento puede comprobar rápidamente que nuestros clientes han seleccionado la combinación correcta de acero y diseño. ARAMIS y ASAME miden la distribución de la tensión en piezas conformadas en prensa. Esta información se procesa mediante un potente programa de ordenador, y puede obtener resultados inmediatos de cómo los herramientas, los métodos de producción y el diseño han afectado al material. ARAMIS y ASAME pueden llevar a cabo análisis muy detallados de complicadas operaciones de conformado.

Cursos y seminarios

SSAB organiza regularmente cursos y seminarios sobre cómo utilizar las ventajas y oportunidades que aportan los aceros avanzados de alto resistencia:

- El curso sobre chapa de acero ofrece un conocimiento fundamental sobre producción de acero, y las propiedades y aplicaciones de varias calidades de acero.
- Seminarios que proporcionan un conocimiento más profundo sobre medidas, diseño, trabajo, conformado y soldadura del acero avanzado de alta resistencia, así como la selección de las soluciones en acero para herramientas incluyendo asesoramiento sobre el tratamiento térmico.
- Seminarios a medida para empresas individuales.

Manuales

En nuestros manuales se incluye información detallada de las muchas posibilidades que aportan los aceros avanzados de alto rendimiento y sobre los aceros para herramientas:

- Manual sobre la chapa de acero, proporciona la base para el diseño y aporta asesoramiento sobre ingeniería de producción.
- Manual sobre el conformado de la chapa de acero, que proporciona asesoramiento sobre troquelado y conformado.
- Manual sobre soldadura de la chapa de acero, proporciona conocimientos sobre métodos de unión.

Muestras / Material para pruebas

Siempre que quieras conocer cómo va a funcionar una nueva calidad de chapa de acero en tu equipo de producción o con un producto concreto, puedes solicitar muestras de chapa a nuestro Departamento de Chapa para Pruebas. Casi todas las calidades del acero Docol de alta resistencia producido por SSAB están disponibles con muy poca antelación en nuestras existencias de materiales de ensayo.

Información del producto

La información sobre toda la chapa de acero de SSAB y cómo debe usarse está disponible en nuestros catálogos de producto y catálogos técnicos.

SSAB cuenta con un gran número de oficinas de ventas y agentes en todo el mundo. Puedes obtener información sobre productos o asesoramiento por parte de nuestros expertos locales.

Toda la información y recomendaciones se pueden encontrar en www.ssab.com.

Suscríbete a Automotive Insights

Te ofrece artículos cuidadosamente seleccionados, noticias y mucho más. Regístrate en *docol.com*

SSAB es una empresa siderúrgica nórdica, que también cuenta con una sede 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 plantas de producción en Suecia, Finlandia y EE.UU. SSAB cotiza en bolsa, en el mercado Nasdaq de Estocolmo, y de manera secundaria en el mercado Nasdaq de Helsinki. www.ssab.com

334es-Docol® – Tooling solutions for advanced high strength steels-v8-2022. Conifetti.

Contacto:



+46 243 700 00



automotive@ssab.com



www.docol.com



Síguenos en LinkedIn

SSAB
SE-781 84 Borlänge, Suecia

www.ssab.com

SSAB