

PLEGADO Y MECANIZADO



CUBRIMOS SUS NECESIDADES DE DESGASTE

El acero resistente a la abrasión Raex® se ha diseñado para estructuras de acero expuestas a desgaste abrasivo. Las propiedades de resistencia al desgaste de Raex® alargan significativamente la vida útil de los equipos, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

Raex® amplía la vida útil de las estructuras de acero gracias a la reducción del peso en comparación con el acero al carbono blando. La ligereza de los componentes aumenta la capacidad de carga, lo que ahorra combustible y reduce las emisiones al necesitar menos camiones en servicio.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
1 MÉTODOS DE PLEGADO	4
2 PREPARACIÓN ANTES DEL PLEGADO	5
3 INSTRUCCIONES DE PLEGADO	6
3.1 Instrucciones de plegado para el taller	6
3.2 Fuerza de plegado	6
3.3 Radio de plegado mínimo	7
3.4 Separación de la chapa que se va a plegar	8
4 MECANIZACIÓN	9
4.1 Taladrado	9
4.2 Roscado de máquina	10
4.3 Serrado	11
4.4 Fresado y torneado	12
5 SEGURIDAD OCUPACIONAL	13

INTRODUCCIÓN

Raex® se produce con materias primas cuidadosamente seleccionadas en un proceso integral bien controlado de laminación del acero. El resultado es una calidad constante y excelentes cualidades de dureza, capacidad de plegado, calidad de la superficie y planicidad. Los aceros Raex® están disponibles como placas pesadas y chapas con longitudes cortadas a la medida con un intervalo de dureza de 300 – 500 HB. Es fácil trabajar con Raex® en el taller gracias a sus buenas propiedades para el corte, la soldadura y el plegado. También prolonga la vida útil de la maquinaria y permite crear diseños de productos ligeros que mejoran el consumo energético.

En el folleto se describen los principios de plegado libre y 'bottoming' (plegado tocando el fondo), además de facilitar recomendaciones prácticas para el plegado de Raex. Normalmente la fuerza de plegado y el nivel de recuperación elástica aumentan a medida que aumenta

la resistencia del acero. Para aprovechar las ventajas de la óptima capacidad de plegado de Raex, deben seguirse buenas prácticas de trabajo en el taller. Unas herramientas gastadas, una lubricación deficiente, daños en la superficie, rebabas en los bordes de corte, etc., pueden perjudicar la calidad de plegado. Las chapas almacenadas en un lugar frío deben dejarse calentar hasta alcanzar la temperatura ambiente antes del conformado en frío.

Además de las instrucciones de plegado, el folleto recopila información y recomendaciones sobre el mecanizado de Raex®, incluyendo los siguientes métodos:

- taladrado
- roscado
- serrado
- fresado y torneado.



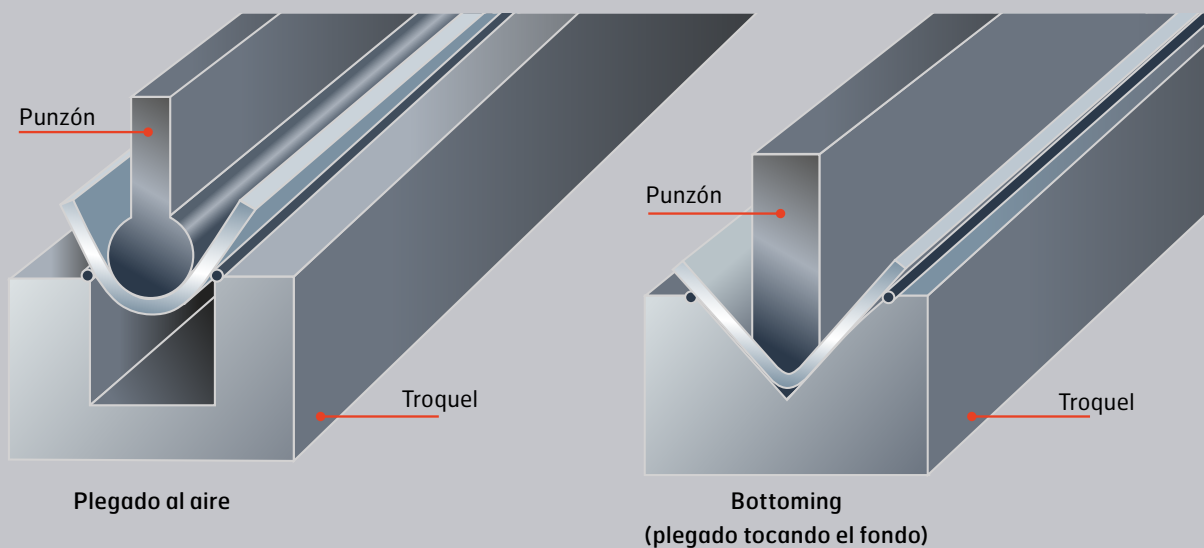
1 MÉTODOS DE PLEGADO

La chapa se pliega hasta el ángulo designado o el radio de plegado libre en una prensa plegadora entre el punzón y el troquel.

En el plegado al aire, la chapa se apoya en los bordes superiores de la separación del troquel durante toda la duración de la pasada. Se obtiene el radio de plegado deseado ajustando la longitud del impacto (Figura 1). La separación del troquel se puede ajustar.

En el 'bottoming' (plegado tocando el fondo), la longitud de la carrera es suficiente para que el punzón presione totalmente la placa contra el troquel. Se crea así en la chapa una forma correspondiente al punzón y el troquel (Figura 1). La separación del troquel (ranura en V) es fija y no se puede ajustar la anchura.

FIGURA 1. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS DE PLEGADO.



2 PREPARACIÓN ANTES DEL PLEGADO

- La temperatura de la chapa debe ser como mínimo de +20 °C.
- Antes de las operaciones de plegado, se recomienda guardar un día las chapas en un lugar frío y bajo resguardo .
- Si es necesario, se debe calentar con una llama la zona que se va a plegar.
- El precalentamiento entre +100 y +200 °C reduce la fuerza necesaria de plegado y mejora la capacidad de plegado en general.
- Identifique la dirección de laminado de la chapa.
- Los posibles defectos superficiales del lateral de tensión de la chapa deben amolarse.
- Elimine los defectos del borde cortado de una chapa cortada térmica o mecánicamente, al menos en la zona que se va a plegar.
- Un granallado excesivo puede tener un efecto negativo sobre la capacidad de plegado. Las recomendaciones para los productos de acero Raex® se basan en ensayos con superficies sin granallar.



3 INSTRUCCIONES DE PLEGADO

- Durante el plegado se deben seguir las instrucciones de seguridad.
- La necesidad de fuerza de plegado, el efecto de recuperación elástica y el radio admitido de plegado aumentan a medida que aumenta la resistencia del acero.
- El radio de plegado debería ser lo más grande posible.
- El plegado se debe realizar en una única pasada.
- Para optimizar los resultados del trabajo en taller, combine datos teóricos y empíricos.
- Los valores de plegado se definen sobre la base de la prueba de plegado, teniendo en cuenta el grado de recuperación elástica.
- El efecto de recuperación elástica de Raex® 400 es 8° – 25° y el de Raex® 500 15° – 35°, dependiendo de los parámetros de las herramientas de plegado. Los troqueles con separaciones más anchas dan lugar a una recuperación elástica mayor.
- Se recomienda realizar siempre ensayos de prueba.

3.1 INSTRUCCIONES DE PLEGADO PARA EL TALLER

En la práctica del plegado o el rebordeado, el diámetro del punzón se define en función de la calidad del acero, el espesor de la chapa y el radio de plegado. En la Tabla 1 se

indica el diámetro de punzón más pequeño (D) para Raex® 400, Raex® 450 y Raex® 500 sobre la base del espesor de la chapa (t).

3.2 FUERZA DE PLEGADO

La fuerza de plegado (P, en toneladas) necesaria del acero se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$P = \frac{b \cdot t^2 \cdot R_m}{(W - R_d - R_p) \cdot 9800}$$

P = fuerza de plegado, toneladas

t = espesor de chapa, mm

W = anchura del troquel, mm (Figura 2)

b = longitud de plegado, mm

R_m = carga de rotura, MPa (Tabla 2)

R_d = radio de entrada del troquel, mm (Figura 2)

R_p = radio de punzón, mm

FIGURA 2. SE RECOMIENDA UN PLEGADO TRANSVERSAL A LA DIRECCIÓN DEL LAMINADO.

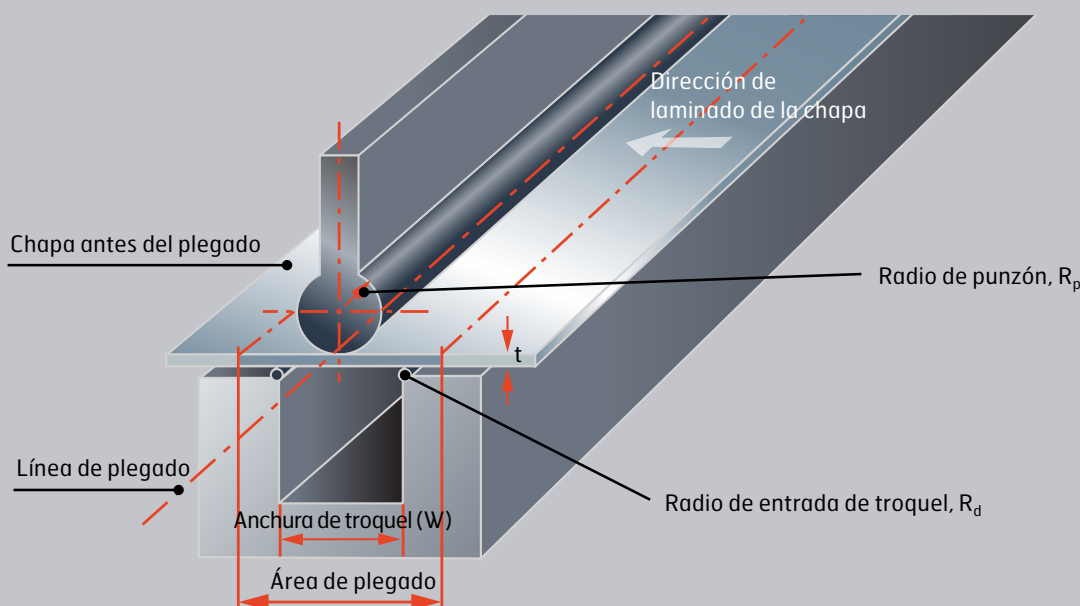


TABLA 1. ACEROS RAEX® RESISTENTES A LA ABRASIÓN. INSTRUCCIONES DE PLEGADO PARA EL TALLER.
 Selección del diámetro mínimo permisible de punzón para Raex®, según el espesor de chapa y el radio de plegado

Espesor de chapa	Raex® 400		Raex® 450				Raex® 500			
	Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado transversal	Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado longitudinal	Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado transversal		Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado longitudinal		Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado transversal		Diámetro de punzón más pequeño D (mm) en plegado longitudinal	
	Fleje/chapa	Fleje/chapa	Fleje	Chapa	Fleje	Chapa	Fleje	Chapa	Fleje	Chapa
2	12	16	12		16					
2,5	15	20	15		20		17,5		20	
3	18	24	18		24		21		24	
4	24	32	24		32		28		32	
5	30	40	30		40		35		40	
6	36	48	36	48	48	60	42	60	48	72
7	42	56	42	56	56	70	49	70	56	84
8	48	64	48	64	64	80		80		96
9	54	72		72		90		90		108
10	60	80		80		100		100		120
11	66	88		88		110		110		132
12	72	96		96		120		120		144
13	78	104		104		130		130		156
14	84	112		112		140		140		168
15	90	120		120		150		150		180
16	96	128		128		160		160		192
17	102	136		136		170		170		204
18	108	144		144		180		180		216
19	114	152		152		190		190		228
20	120	160		160		200		200		240

¹⁾ Dirección de plegado frente a dirección de laminación de la chapa.
 Al plegar en la ranura en V (90°), la relación recomendada de ancho de troquel y espesor es W/t ≈ 15.

La tensión de rotura típica de los aceros Raex® se indica en la tabla 2.

TABLA 2. ACEROS RAEX® RESISTENTES A LA ABRASIÓN. TENSIÓN DE ROTURA TÍPICA Y VALORES DE DUREZA.

Calidad Raex	Tensión de rotura R _m (MPa)	Dureza (HBW)
Raex® 300	1000	300
Raex® 400	1250	400
Raex® 450	1450	450
Raex® 500	1600	500



3.3 RADIO MÍNIMO DE PLEGADO

En la Tabla 3 se indican los radios mínimos de plegado de los aceros Raex® resistentes a la abrasión. En la práctica de los trabajos de ingeniería de plegado o rebordeado, se recomienda usar los radios interiores de plegado, que son mayores que los radios mínimos permisibles de plegado. Además de la chapa de acero, la calidad del plegado depende de las herramientas de plegado y la ejecución del trabajo. Un plegado correcto requiere que el procesador de los productos de acero disponga de una buena tecnología. Las herramientas desgastadas, una lubricación insuficiente, arañazos en la superficie del acero y las rebabas, ponen en peligro la calidad del procesamiento de conformado en frío.

TABLA 3. ACEROS RAEX® RESISTENTES A LA ABRASIÓN. RADIO MÍNIMO DE PLEGADO R, ÁNGULO DE PLEGADO ≤ 90 .

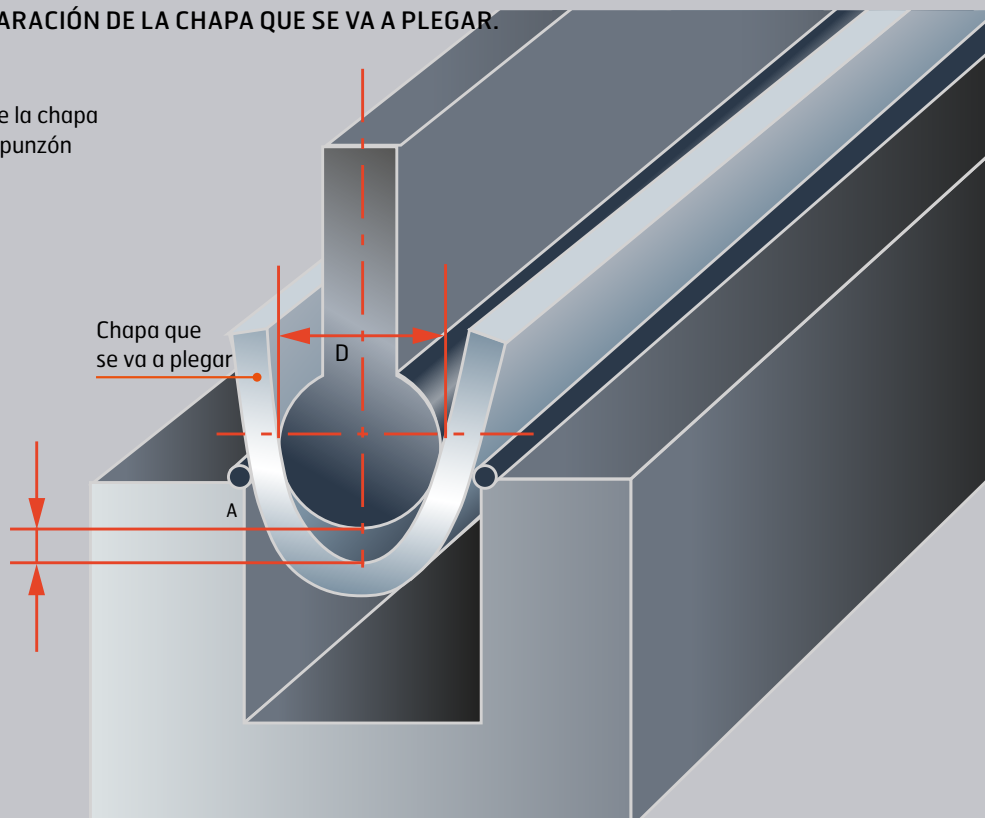
Calidad Raex	Forma del producto	Espesor (mm)	Mínimo R/t transversal	Mínimo R/t longitudinal	Anchura de apertura de troquel Mínimo W/t
Raex® 300	Chapa	2 – 8	3	3	12
Raex® 400	Chapa	2 – 8	3	4	12
	Chapa	6 – 20	3	4	14
Raex® 450	Chapa	2 – 8	3	4	12
	Chapa	6 – 20	4	5	14
Raex® 500	Chapa	2.5 – 7	3,5	4	14
	Chapa	6 – 20	5	6	14

3.4 SEPARACIÓN DE LA CHAPA QUE SE VA A PLEGAR

En la Figura 3 se muestra la separación (A) de la chapa que se va a plegar desde el círculo del diámetro del punzón (D). La separación es un factor bien conocido para los trabajos de ingeniería que emplean aceros de alta resistencia. Normalmente, la precisión del ángulo de plegado final es más importante que el radio de la pieza de trabajo. Si también se desea un radio exacto de plegado, primero debe realizarse una prueba de plegado. Como resultado del plegado de prueba, se elige un radio de punzón que permita obtener el ángulo final de plegado que se desea. En la práctica, el radio de punzón es ligeramente más grande que el radio de plegado indicativo del acero.

FIGURA 3. SEPARACIÓN DE LA CHAPA QUE SE VA A PLEGAR.

A = Separación de la chapa
D = Diámetro del punzón





4 MECANIZACIÓN

INSTRUCCIONES GENERALES PARA EL MECANIZADO:

- La máquina debe ser rígida y estar estable.
- Fije la pieza de trabajo lo más rígida y cerca posible de la zona que se desea cortar.
- Evite los portaherramientas largos y los husillos en voladizo.
- No se permiten vibraciones perjudiciales durante ninguna fase del mecanizado.
- Se debe prestar especial atención al comenzar una operación de corte.
- Elimine los bordes irregulares mediante el mecanizado de las chapas cortadas por calor en la zona en la que se va a realizar el primer corte.
- Use una velocidad de avance y profundidad de corte suficientes.
- Asegure un suministro abundante de fluido de corte.
- Reduzca la velocidad de corte en caso de corte seco.
- Al mecanizar aceros resistentes a la abrasión de forma frecuente, utilizar herramientas de metal duro conforme a las fichas de datos de los fabricantes.

4.1 TALADRADO

Los parámetros recomendados de taladrado para brocas de acero de alta velocidad (HSS) sin alear y brocas HSS al cobalto se indican en las Tablas 4, 5 y 6. Además, en la Tabla 6 se indican los parámetros recomendados de taladrado para la calidad del acero Raex® 500 con brocas de metal duro. Raex® 400 y Raex® 450 se pueden perforar con brocas HSS. Para el taladrado de Raex® 500 se recomiendan brocas de metal duro.

INSTRUCCIONES GENERALES PARA EL TALADRADO:

- La máquina de taladrado debe ser rígida y estable para minimizar las vibraciones.
- Fije la pieza de trabajo de forma segura y cercana a la zona que se va a mecanizar.
- Se recomiendan brocas de orificio corto.
- La vida útil de la herramienta de taladrado se puede alargar reduciendo la velocidad de avance.
- Asegure un suministro abundante de fluido de corte.

TABLA 4. RAEX® 400. PARÁMETROS RECOMENDADOS DE TALADRADO.

	Diámetro de la broca (mm)	Velocidad de avance (mm/rev)	Velocidad de avance (mm/minuto)	Velocidad de corte (m/minuto)	Velocidad de rotación (rpm)
Broca HSS sin revestimiento	5	0,10	60–80	9–12	600–800
	15	0,20	40–50	9–12	200–250
	25	0,25	30–40	9–12	110–150
Broca HSS al cobalto sin revestimiento	5	0,10	70–100	12–15	800–950
	15	0,20	50–70	12–15	250–320
	25	0,20	25–30	9–12	110–150

TABLA 5. RAEX® 450. PARÁMETROS RECOMENDADOS DE TALADRADO.

	Diámetro de la broca (mm)	Velocidad de avance (mm/rev)	Velocidad de avance (mm/minuto)	Velocidad de corte (m/minuto)	Velocidad de rotación (rpm)
Broca HSS sin revestimiento	5	0,08	40–50	8–10	500–650
	15	0,20	35–45	8–10	170–210
	25	0,25	25–35	8–10	100–130
Broca HSS al cobalto sin revestimiento	5	0,10	60–75	8–10	600–750
	15	0,20	35–45	8–10	170–210
	25	0,20	15–20	6–8	75–100

TABLA 6. RAEX® 500. PARÁMETROS RECOMENDADOS DE TALADRADO.

	Diámetro de la broca (mm)	Velocidad de avance (mm/rev)	Velocidad de avance (mm/minuto)	Velocidad de corte (m/minuto)	Velocidad de rotación (rpm)
Broca HSS sin revestimiento	5	0,10	25	4	250
	15	0,15	15	4	85
	25	0,15	8	4	50
Broca HSS al cobalto sin revestimiento	5	0,10	25–35	4–6	250–380
	15	0,15	15–20	4–6	80–130
Broca maciza de metal duro	16	0,15	120	40	800



4.2 4.2 ROSCADO DE MÁQUINA

Para el roscado, se recomiendan roscas HSS-E micro-aleadas o HHS aleadas con cobalto con cuatro bordes de corte. Para obtener los mejores resultados, usar aceite o pasta de corte. Cuando la resistencia de la junta no es fundamental, se recomienda usar orificios de rosca un 3–5 % mayores que los valores estándar. Un diámetro de orificio más grande aumentará considerablemente la vida útil de la herramienta. Durante el pase de roscado, asegurarse de que es posible eliminar las virutas sin dar la vuelta a la herramienta ni alternar el sentido de giro. Los orificios superficiales se deben roscar con las roscas apropiadas, ver la Tabla 7.

TABLA 7. RAEX. ROSCADO DE MÁQUINA, ROSCA HSS-E.

	Velocidad de corte (m/min)	Tamaño de rosca					
		M10 Velocidad del husillo (rpm)	M16 Velocidad del husillo (rpm)	M20 Velocidad del husillo (rpm)	M24 Velocidad del husillo (rpm)	M30 Velocidad del husillo (rpm)	M42 Velocidad del husillo (rpm)
Raex® 400	3,6	115	80	63	53	42	30
Raex® 500	1,6	50	40	32	25	21	15

4.3 SERRADO

Al elegir la máquina y la hoja de serrado, tenga en cuenta la alta dureza y resistencia de los aceros. Asegure un suministro abundante de fluido de corte. Con una sierra de cinta se obtienen los mejores resultados con un paso de diente asimétrico; ver la Tabla 8.

INSTRUCCIONES GENERALES PARA EL SERRADO CON SIERRA DE CINTA

- La hoja debe estar bien sujeta y tensa.
- Deben eliminarse, mediante mecanizado, las rebabas y la capa endurecida producida por el corte por llama de la zona en la que se va a comenzar el serrado.
- Evite las distancias largas de eliminación de virutas, por ejemplo fijando la pieza de trabajo rígidamente en una posición oblicua.
- Si la longitud de corte no se puede reducir, se puede utilizar una hoja con un paso de diente más ancho.
- Las presiones de los dientes deben ser razonablemente altas.
- Se puede eliminar el ruido de la hoja ajustando la velocidad de corte.
- Se recomienda comenzar siempre el serrado con una velocidad de avance manual. La velocidad de avance debe ajustarse para colocar la hoja con un contacto suficientemente estable.
- La dureza y la resistencia de la pieza de trabajo se deben tener siempre en cuenta a la hora de ajustar la velocidad de avance.
- Asegure un caudal abundante de fluido de corte para que la hoja permanezca húmeda durante el corte.
- Los daños en los dientes tienen lugar, entre otros, durante la fase de salida, cuando la hoja se puede atascar, mover irregularmente, sufrir sacudidas, etc.

TABLA 8. RAEX. DATOS DE CORTE PARA EL SERRADO.

	Velocidad de corte m/min Longitud de corte mm		
	100	200	300
Raex® 400	60	50	40
Raex® 500	40	35	30

4.4 FRESADO Y TORNEADO

La operación más común de fresado en los aceros resistentes a la abrasión es el desbastado. La fresadora debe ser rígida y de alta resistencia. Se deben usar herramientas revestidas con metal duro. Respecto a los datos de corte, el torneado es en general parecido al fresado; ver la tabla 9.

INSTRUCCIONES GENERALES PARA EL FRESADO:

- Asegure un suministro abundante de fluido de corte.
- Comience las operaciones de fresado con cuidado.
- Las rebabas y la capa endurecida - producida por el corte por llama de la zona en la que se va a comenzar el fresado - deben eliminarse mediante mecanizado.
- En el tren de desbaste, el primer corte debe ser lo suficientemente grande para evitar que el borde cortado se adhiera a la superficie endurecida con cascarilla de la pieza de trabajo.

TABLA 9. RAEX. DATOS DE CORTE PARA EL DESBASTE.

Tren de desbaste húmedo	Inserto indexable P40		
	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/diente)	Profundidad de corte (mm)
Raex® 400	75 – 90	0,1 – 0,2	2 – 5
Raex® 500	60 – 75	0,1 – 0,15	1 – 4

Si las condiciones son óptimas, será posible elevar los valores de corte hasta en un 50%.

Para el fresado en seco, se recomiendan unos valores un 20 – 30 % inferiores.



5 SEGURIDAD OCUPACIONAL

Se debe prestar especial atención al procesar y manipular aceros de ultra-alta resistencia. Si el radio de plegado, por ejemplo, es demasiado pequeño y se forma una grieta en el punto de plegado, la chapa podría salir despedida de la herramienta de plegado en la dirección del plegado. Los encargados de plegar la chapa deben tomar precauciones apropiadas para protegerse. No se debe permitir el acceso a personal no autorizado a la zona de trabajo.

Normalmente, el lugar más seguro es junto a la máquina de plegado. Se deben seguir escrupulosamente las instrucciones de manipulación del proveedor del acero y las instrucciones de seguridad de la fábrica o el taller. Los nuevos empleados deberán recibir una formación adecuada antes de trabajar con aceros de ultra-alta resistencia.

CONTACTO

SOLDADURA Y CORTE TÉRMICO



CUBRIMOS SUS NECESIDADES DE DESGASTE

El acero resistente a la abrasión, Raex®, está diseñado para estructuras de acero expuestas a desgaste abrasivo. Las propiedades de resistencia al desgaste de Raex® alargan significativamente la vida útil de los equipos, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

Raex® amplía la vida útil de las estructuras de acero gracias a la reducción del peso en comparación con el acero al carbono blando. La ligereza de los componentes aumenta la capacidad de carga, lo que ahorra combustible y reduce las emisiones al necesitar menos camiones en servicio.

INTRODUCCIÓN

Raex® es un acero resistente a la abrasión que presenta una dureza óptima y buenas propiedades para el trabajo en taller. La tecnología moderna de producción facilita obtener una calidad fiable y una protección económica contra los diferentes tipos de entornos de desgaste. Los aceros Raex® están disponibles como placas pesadas y chapas con longitudes cortadas a medida, con un intervalo de dureza de 300 – 500 HB. Es fácil trabajar con Raex® en el taller gracias a sus buenas propiedades para el corte, la soldadura y el plegado. También prolonga la vida útil de la maquinaria y permite crear diseños de productos ligeros que mejoran el consumo energético.

APLICACIONES PARA ACEROS RAEX® RESISTENTES A LA ABRASIÓN

- Trituradoras, cazos y segmentos de refuerzo
- Plataformas y estructuras base
- Maquinaria para manipulación de materiales y residuos, tanques y transportadores
- Silos, tolvas, cribas y hormigoneras
- Contenedores especiales
- Piezas de desgaste y hojas de cuchillas

La resistencia al desgaste de los aceros Raex® se basa en la aleación del acero y en el estado endurecido de la entrega. El alto contenido de aleación, la dureza y la resistencia tienen como consecuencia que la soldadura y el corte térmico de los aceros resistentes a la abrasión sean más complejos que el tratamiento del acero estructural normal.

La soldadura de los aceros resistentes a la abrasión tiene dos objetivos principales. En primer lugar, debe prevenirse por adelantado el agrietamiento en frío. Este requisito es especialmente importante al soldar chapas gruesas. En segundo lugar, las propiedades mecánicas de las uniones soldadas deben ser óptimas. Además de estos dos objetivos sobre el metal de base, las operaciones complejas de soldadura deben satisfacer necesidades específicas de trabajo, como el nivel de calidad. Entre las cosas que se deben evitar en el corte térmico están las grietas en el corte superficial y el ablandamiento excesivo de la zona de corte.

Este folleto técnico proporciona instrucciones prácticas de soldadura para las calidades Raex® 400, Raex® 450 y Raex® 500 y especifica las características especiales en relación con el corte térmico. Los factores clave de la soldadura son una temperatura de trabajo y un aporte térmico correctos, así como una preparación cuidadosa. Las superficies de ranuras que se van a soldar tienen que estar secas y limpias. El contenido de hidrógeno disuelto en el metal de soldadura debe mantenerse especialmente bajo ya que se trata de un acero de ultra-alta resistencia. El bajo contenido de hidrógeno se logra con los parámetros correctos de soldadura y mediante el uso de consumibles de soldadura apropiados. La ficha de datos proporciona recomendaciones acerca de los consumibles de soldadura para soldadura por arco protegido con gas, soldadura por arco metálico manual y soldadura por arco sumergido. Todas las fases de la soldadura y el corte térmico, desde el diseño hasta el acabado, deben realizarse con cuidado para lograr el mejor resultado posible.



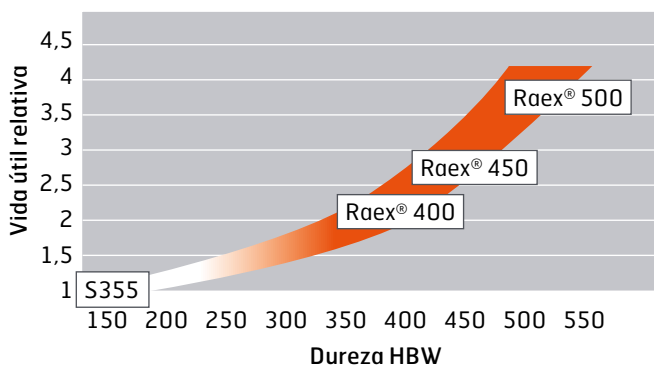
INTRODUCCIÓN	3
1 CALIDADES DE ACERO RESISTENTES A LA ABRASIÓN	4
2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN	5
2.1 Susceptibilidad al agrietamiento en frío	5
2.1.1 Localización de grietas en frío	5
2.1.2 Factores que provocan el agrietamiento en frío	5
2.1.2.1 Microestructura de una junta soldada	5
2.1.2.2 Contenido crítico de hidrógeno de una junta soldada	6
2.1.2.3 Resistencia y nivel de tensiones de una junta soldada	6
2.1.2.4 Efecto combinado de tres factores	6
2.2 Propiedades óptimas de una junta soldada	6
3 PARÁMETROS DE SOLDADURA Y EFECTO EN LAS PROPIEDADES DE UNA JUNTA SOLDADA	7
3.1 Parámetros de soldadura más importantes	7
3.2 Efecto de los parámetros de soldadura en las propiedades de una junta soldada	7
4 CONSUMIBLES DE SOLDADURA	8
4.1 Consumibles de soldadura de baja resistencia ('undermatching', blandos)	8
4.2 Consumibles de soldadura de acero inoxidable austenítico	8
5 PREVENCIÓN DEL AGRIETAMIENTO EN FRÍO	10
5.1 Control del endurecimiento de la microestructura de una junta soldada	10
5.2 Control del contenido de hidrógeno	10
5.3 Alivio de tensiones residuales en una junta soldada	10
5.4 Consejos prácticos para la soldadura	10
5.5 Soldadura a la temperatura de trabajo correcta	10
6 CÓMO OBTENER UNA COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PROPIEDADES EN LAS JUNTAS SOLDADAS	12
6.1 Parámetros recomendados de soldadura	12
6.2 Zona blanda en juntas soldadas	12
7 TRATAMIENTO TÉRMICO	13
8 COMPORTAMIENTO DEL ACERO DURANTE EL CORTE TÉRMICO	15
8.1 Procedimiento de corte térmico	16
8.2 Control de la dureza de la superficie mediante el aumento de la temperatura de trabajo	16
8.3 Prevención del ablandamiento durante el corte térmico	16
8.4 Consejos prácticos para el corte térmico	16
9 PROPIEDADES DEL CORTE CON LÁSER	18

1 CALIDADES DE ACERO RESISTENTES A LA ABRASIÓN

El acero resistente a la abrasión Raex® está diseñado para estructuras de acero expuestas a desgaste abrasivo. Las propiedades de resistencia al desgaste de Raex® alargan significativamente la vida útil de los equipos, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero. La gama incluye las calidades de acero Raex® 300, Raex® 400, Raex® 450 y Raex® 500. La dureza media de los aceros es 300/400/450/500 HBW, respectivamente; ver la Figura 1.

La resistencia del acero contra el desgaste abrasivo general mejora a medida que aumenta la dureza. En la Figura 1 se indica la vida útil relativa de los aceros Raex® 400, Raex® 450 y Raex® 500 en un ensayo de abrasión. No obstante, hay que recordar que el material de desgaste siempre depende de las circunstancias y varía en función de distintos factores.

FIGURA 1. RAEX® 400, RAEX® 450 Y RAEX® 500. ENSAYO DE ABRASIÓN.



La vida útil relativa aumenta a medida que sube la dureza del acero. La vida útil de un acero de construcción S355 estándar considera el valor de referencia con un valor igual a 1.

2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN

La alta resistencia y dureza de los aceros resistentes a la abrasión se obtiene mediante elementos de aleación y templado. Con una aleación adecuada es posible obtener una capacidad de endurecimiento correcta. Debido al alto contenido de aleación, la soldadura de aceros resistentes a la abrasión es más compleja que la soldadura del acero estructural normal. Al soldar aceros resistentes a la abrasión, se debe prestar atención a dos objetivos:

- Prevención del agrietamiento en frío en las juntas soldadas.
- Cómo obtener propiedades óptimas en una junta soldada.

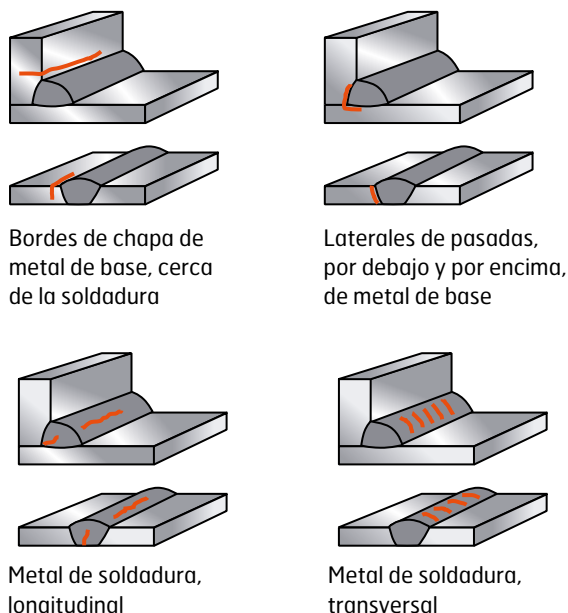
2.1 SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN FRÍO

El factor más común que perjudica la soldabilidad de los aceros resistentes a la abrasión es el agrietamiento en frío. Las grietas en frío se forman normalmente cuando la soldadura se enfría hasta +150 °C o menos, de ahí el nombre de 'agrietamiento en frío'. El agrietamiento en frío también se conoce como agrietamiento inducido por hidrógeno o agrietamiento retardado. El efecto perjudicial de agrietamiento que provoca el hidrógeno se manifiesta siempre varios días después de la soldadura. Al planificar un ensayo no destructivo de la estructura soldada se debe tener en cuenta el retardo con que aparecen las grietas en frío.

2.1.1 Localización de grietas en frío

En la Figura 2 se indican las zonas críticas donde aparece el agrietamiento en frío en el metal de soldadura, la línea de fusión y la zona afectada por el calor.

FIGURA 2. LUGARES SUSCEPTIBLES AL AGRIETAMIENTO EN FRÍO EN LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA RESISTENTES A LA ABRASIÓN.



2.1.2 Factores que provocan el agrietamiento en frío

El agrietamiento en frío es un efecto perjudicial combinado de tres factores simultáneos. Estos factores son, como se indica en la Figura 3; 1) la microestructura de la junta soldada, 2) el contenido de hidrógeno de la junta soldada, y 3) el nivel de tensiones en la junta soldada.

2.1.2.1 Microestructura de una junta soldada

La óptima resistencia al desgaste se basa en la microestructura martensítica del metal de base y el metal de soldadura, al igual que en la zona afectada por el calor de una junta soldada. Si la junta se enfría demasiado rápido, la martensita puede endurecerse y ver reducida su resistencia. Una microestructura de ese tipo es susceptible al agrietamiento. La capacidad de endurecimiento del acero y el metal de soldadura se representa con fórmulas de equivalente de carbono que se basan en elementos de aleación. Las fórmulas 'CEV' y 'CET' que se indican en este documento, se utilizan a menudo para los aceros resistentes a la abrasión. Para este CEV también se emplea la abreviación 'CE'.

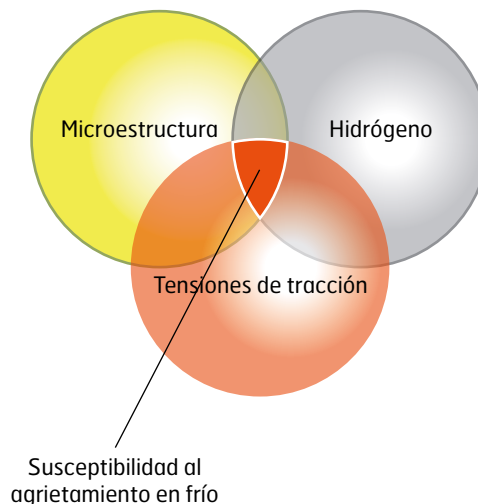
A continuación se indican las fórmulas de equivalencias de carbono utilizadas para representar la capacidad de endurecimiento del acero y del metal de soldadura.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Un aumento del equivalente de carbono o de la capacidad de endurecimiento resultará en una microestructura más dura.

FIGURA 3. LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN FRÍO DE UNA JUNTA SOLDADA ES EL EFECTO PERJUDICIAL COMBINADO DE TRES FACTORES.



2.1.2.2 Contenido crítico de hidrógeno de una junta soldada

El hidrógeno es un gas muy ligero que se disuelve en acero en forma de átomos y moléculas. Cuando se fabrica una chapa de acero, ya contiene pequeñas cantidades de hidrógeno. El proceso de fabricación de aceros Raex® permite que el contenido natural de hidrógeno de las chapas de acero se mantenga bajo. Por lo tanto, en la soldadura, el hidrógeno que induce al agrietamiento en frío de acero, trata de penetrar en la junta desde fuera.

El contenido crítico de hidrógeno no es una constante específica, ya que su valor se ve afectado especialmente por la microestructura del acero. Dependiendo de la temperatura y el estado del tratamiento, en la microestructura del acero resistente al desgaste están presentes las fases martensita, ferrita y austenita. En las microestructuras martensítica y ferrítica solo se disuelven cantidades muy pequeñas de hidrógeno, a diferencia de las microestructuras austeníticas que pueden soportar una cantidad considerablemente mayor.

Durante la soldadura, la mayoría del gas de hidrógeno se disuelve a altas temperaturas en aceros cuya microestructura es austenítica. Cuando se enfría la junta soldada, la microestructura del acero se convierte en martensítica o ferrítica. En estas microestructuras solo se disuelve una pequeña cantidad de hidrógeno y el espacio de seguridad, necesario para la ubicación física de los átomos de hidrógeno, es limitado. Por lo tanto, los átomos de hidrógeno que se ven atrapados en la microestructura de las juntas soldadas pueden provocar tensiones internas locales y formar grietas, lo que se conoce como agrietamiento en frío.

2.1.2.3 Resistencia y nivel de tensiones de una junta soldada

La soldadura y otros tipos de tratamientos de chapas producen tensiones en la junta. La resistencia y las tensiones residuales de una junta soldada vienen determinadas principalmente por la resistencia del metal de soldadura. Las tensiones residuales dependen de la resistencia del metal de relleno, de la rigidez de la estructura y del espesor de la chapa de acero. En el punto máximo, las tensiones de la junta soldada equivalen al límite elástico del acero. Las tensiones altas aumentan la susceptibilidad al agrietamiento en frío.

2.1.2.4 Efecto combinado de tres factores

La microestructura, el contenido de hidrógeno y las tensiones de tracción de una junta soldada son interdependientes para la aparición del agrietamiento en frío. Por ejemplo, si el nivel de tensiones de tracción de una junta aumenta con el mismo procedimiento de soldadura, incluso un contenido más bajo de hidrógeno inducirá el agrietamiento en frío. Del mismo modo, una mayor resistencia y una microestructura más frágil son propensos a la formación de grietas con contenidos más bajos de hidrógeno. En la lucha contra el agrietamiento en frío, debe predecirse el efecto combinado de estos tres factores, por lo que la soldadura deberá planificarse correspondientemente.

2.2 PROPIEDADES ÓPTIMAS DE UNA JUNTA SOLDADA

Las propiedades requeridas de los aceros resistentes a la abrasión no son tan amplias como las establecidas para los aceros estructurales. Esto mismo se aplica en el caso de las juntas soldadas y las estructuras fabricadas con aceros resistentes a la abrasión. A pesar de ello, cuando se planifica la soldadura de aceros resistentes a la abrasión, se debe evaluar la junta en relación con las propiedades indicadas en la Tabla 1.

Para el diseño de estructuras resistentes al desgaste, las soldaduras deben posicionarse, siempre que sea posible, en lugares que no se estén sujetos a las cargas más pesadas. Si para una junta soldada se requiere, por ejemplo, una resistencia especialmente alta al desgaste, se deben usar consumibles de soldadura de alta resistencia con elementos de aleación adecuados. En las estructuras que requieren unos valores determinados de resistencia a impactos para las juntas soldadas, es posible obtener valores equivalentes a los de los metales de base usando consumibles de soldadura resistentes y aplicando los parámetros de soldadura correctos.

Las propiedades que se indican en la Tabla 1 son interdependientes. Cuanto mayor sean la dureza y la resistencia, por ejemplo, menor será la resistencia a impactos. La aplicación de los parámetros de soldadura correctos y la temperatura recomendada de trabajo, garantizarán unas propiedades óptimas de la zona de soldadura. Normalmente no se facilitan valores específicos para las propiedades de las juntas soldadas de aceros resistentes a la abrasión, aparte de la dureza y, en algunos casos, la resistencia. Ninguna de estas propiedades se suele ensayar.

TABLA 1. COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PROPIEDADES EN JUNTAS SOLDADAS DE ACEROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN.

Combinación de propiedades
Dureza
Resistencia al desgaste
Resistencia
Tenacidad

3 PARÁMETROS DE SOLDADURA Y EFECTO EN LAS PROPIEDADES DE UNA JUNTA SOLDADA

Durante la soldadura, el acero es sometido a un agresivo efecto térmico. La temperatura de la junta sube rápidamente desde la temperatura de trabajo hasta la temperatura del acero líquido, superior a 1500 °C. El aporte térmico de la soldadura y la velocidad de enfriado de la junta, son las principales variables con las que se controla el procedimiento de la soldadura.

3.1 PARÁMETROS DE SOLDADURA MÁS IMPORTANTES

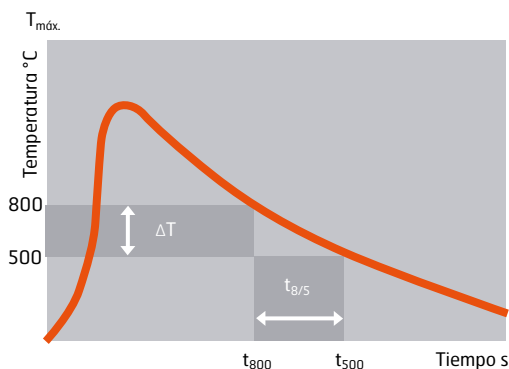
El calor utilizado en la soldadura viene indicado por los conceptos de aporte térmico (Q) y energía del arco (E). La relación entre el aporte térmico y la energía de la soldadura se representa mediante la eficacia térmica 'k', que es el coeficiente específico del procedimiento de soldadura. En su valor más alto, k = 1, la eficacia térmica es del 100% y toda la energía del arco se utiliza para el aporte térmico. Los parámetros y variables de soldadura más importantes se indican en la Figura 4. En la Tabla 2 se indica la eficacia térmica típica de los métodos utilizados para la soldadura de aceros resistentes a la abrasión.

3.2 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES DE UNA JUNTA SOLDADA

El aporte térmico y la velocidad de enfriamiento de una junta están directamente relacionados. Con un alto aporte térmico, la junta se enfría lentamente, mientras que con un aporte térmico bajo, esta se enfría rápidamente. El factor más importante para la microestructura de la zona afectada por el calor (HAZ) de una junta soldada es el tiempo de enfriamiento de + 800 °C a + 500 °C, es decir, $t_{8/5}$; ver la Figura 5. Los factores que afectan a la velocidad de enfriamiento de una junta soldada se indican en la Tabla 3.

En la Figura 6 se muestran los efectos de un aporte térmico más alto o más bajo en la soldadura de aceros resistentes a la abrasión. Un alto aporte térmico indica un tiempo prolongado $t_{8/5}$, mientras que un bajo aporte térmico indica un tiempo corto $t_{8/5}$.

FIGURA 5. TEMPERATURA DE UN PROCESO DE SOLDADURA FRENTE AL TIEMPO, EN FORMA DE DIAGRAMA.



$$\Delta T = 800^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$$

$t_{8/5}$ = tiempo de enfriamiento de +800 °C a +500 °C

En la soldadura con arco, se requiere un aporte térmico más alto para mejorar la eficacia de la soldadura. Un aporte térmico más alto en la soldadura de chapas finas resistentes a la abrasión, se ve limitado por su efecto negativo en la dureza del acero.

TABLA 2. EFICACIA TÉRMICA TÍPICA SEGÚN LOS DIFERENTES MÉTODOS DE SOLDADURA.

Método de soldadura	Eficacia térmica, k
Soldadura por arco con gas protector, métodos MAG	0,8
Soldadura por arco metálico manual	0,8
Soldadura por arco sumergido	1,0
Soldadura por arco de plasma y soldadura TIG	0,6

TABLA 3. FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DE UNA JUNTA SOLDADA.

Energía de la soldadura
Espesor/es de chapa
Forma de la junta
Tipo de preparación de la junta
Temperatura de trabajo
Secuencia de soldadura

FIGURA 4. APOORTE TÉRMICO Y ENERGÍA EN LA SOLDADURA, Y OTRAS VARIABLES DE SOLDADURA.

$$Q = \frac{k \times 60 \times U \times I}{1000 \times v}$$

$$E = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times v}$$

$$Q = k \times E$$

Q = aporte térmico, es decir, la cantidad de calor transferida durante el proceso de soldadura a la soldadura por unidad de longitud (kJ/mm)

E = energía del arco, es decir, energía transmitida por el proceso de soldadura por unidad de longitud (kJ/mm)

k = eficacia térmica, es decir, la relación entre el aporte térmico (Q) y la energía del arco (E)

U = tensión (V)

I = intensidad (A)

V = velocidad de soldadura (mm/min)

FIGURA 6. ACEROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN. EFECTOS DEL APOORTE TÉRMICO EN LA SOLDABILIDAD



4 CONSUMIBLES DE SOLDADURA

Los consumibles de soldadura ferríticos de baja resistencia ('undermatching', blandos) se usan para la soldadura de aceros estructurales ordinarios S355. Estos son con mucha diferencia los consumibles más utilizados para los aceros resistentes a la abrasión y se recomiendan para todas las clases de dureza.

Los consumibles austeníticos de baja resistencia ('undermatching', blandos) se concibieron originalmente para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos. Por ello, representan una apuesta segura, especialmente para los aceros resistentes a la abrasión más duros y las chapas gruesas, así como para soldaduras de reparación.

4.1 CONSUMIBLES DE SOLDADURA DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS)

Para la soldadura de aceros resistentes a la abrasión, el contenido de hidrógeno de los consumibles ferríticos influye enormemente en la susceptibilidad al agrietamiento en frío. Por lo tanto, los consumibles ferríticos deben tener un contenido de hidrógeno bajo: contenido de hidrógeno $HD \leq 5 \text{ ml/100 g}$ (clase de contenido de hidrógeno H5).

Un consumible de soldadura se define como de baja resistencia ('undermatching', blando) si el metal de soldadura puro que produce es básicamente más blando que el acero. El límite elástico del metal de soldadura puro producido por un metal de relleno de baja resis-

tencia ('undermatching', blandos) es de aproximadamente 500 MPa y su resistencia es buena. Para la soldadura de aceros resistentes a la abrasión, se recomienda un metal de relleno, con bajo contenido de hidrógeno y baja resistencia ('undermatching', blando) debido al gran número de ventajas que ofrece; ver la Tabla 4.

TABLA 4. VENTAJAS DE CONSUMIBLES DE SOLDADURA DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS) EN COMPARACIÓN CON CONSUMIBLES DE ALTA RESISTENCIA.

Ventajas
Propiedades de soldadura óptimas
Gama muy amplia y buena disponibilidad
Precio y uso económicos
Menos tensiones en la soldadura
Tolerancia a tensiones óptima si los consumibles son resistentes y dúctiles
Equivalente de carbono más bajo y, correspondientemente, menor capacidad de endurecimiento
Menor susceptibilidad al agrietamiento en frío
Mejor tolerancia al hidrógeno que un consumible de soldadura de resistencia más alta
Menos necesidad de aumentar la temperatura de trabajo que con consumibles de soldadura de alta resistencia

Los consumibles ferríticos de baja resistencia ('undermatching', blandos) recomendados para los procedimientos habituales de soldadura se indican en las Tablas 5a y 5b.

TABLA 5a. RAEX® 400/450/500. CONSUMIBLES DE SOLDADURA FERRÍTICOS DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS) CLASIFICACIÓN EN.

Marcas equivalentes o casi equivalentes (Esab). El límite elástico máx. del metal de soldadura puro es aproximadamente de 500 MPa. La 'X' de la norma puede representar una o varias marcas de especificación.

Soldadura con electrodo sólido MAG (metal de soldadura)	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo con núcleo metálico	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo de núcleo fundente de rutilo	Soldadura por arco sumergido: Electrodo + fundente	Soldadura por arco metálico manual
EN ISO 14341: G 46 X OK Autrod 12.64 (G 46 3 M G4SiI, G 42 2 C G4SiI) OK AristoRod 12.63 (G 46 4 M G4SiI, G 42 2 C G4SiI)	EN ISO 17632: T 46 X PZ6102 (T 46 4 M M 2 H5)	EN ISO 17632: T 46 X OK Tubrod 15.14 (T 46 2 P M 2 H5, T 46 2 P C 2 H5)	EN ISO 14171 S 46X OK Autrod 12.32+ OK Flux 10.71 (S 46 4 AB S3Si)	EN ISO 2560: E 46 X OK 55.00 (E 46 5 B 32 H5)
EN ISO 14341: G 42 X OK Autrod 12.51 (G 42 3 M G3SiI, G 38 2 C G3SiI)	EN ISO 16834: T 42 X OK Tubrod 14.12 (T 42 2 M M 1 H10, T 42 2 M C 1 H10)		EN 756 S 38 X OK Autrod 12.22+ OK Flux 10.71 (S 38 4 AB S2Si)	EN ISO 2560: E 42 X OK 48.00 (E 42 4 B 42 H5)

TABLA 5b. RAEX® 400/450/500. CONSUMIBLES DE SOLDADURA FERRÍTICOS DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS) CLASIFICACIÓN AWS.

Marcas equivalentes o casi equivalentes (Esab). El límite elástico máx. del metal de soldadura puro es aproximadamente de 500 MPa. La 'X' de la norma puede representar una o varias marcas de especificación.

Soldadura con electrodo sólido MAG	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo con núcleo metálico	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo de núcleo fundente de rutilo	Soldadura por arco sumergido: Electrodo + fundente	Soldadura por arco metálico manual
AWS A5.18 ER70S-X	AWS A5.18 E70C-X	AWS A5.20 E71T-X	AWS A5.17 F7X	AWS A5.1 E7018X
OK Autrod 12.51 (ER70S-6)	OK Tubrod 14.12 (E70C-6M, E70C-6C)	OK Tubrod 15.14 (E71T-1, E71T-1M)	OK Autrod 12.22+ OK Flux 10.71 (F7A5-EM12K)	OK 48.00 (E7018)
OK AristoRod 12.63 (ER70S-6)	PZ6102 (E70C-6M H4)			OK 55.00 (E7018-1)

TABLA 6. VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS CONSUMIBLES DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO PARA LA SOLDADURA DE ACEROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN.

Propiedades de soldadura óptimas
Gama muy amplia y buena disponibilidad
Precio elevado
Tensiones bajas en la soldadura
Consumible para la soldadura muy tenaz y dúctil
La microestructura austenítica disuelve el hidrógeno sin susceptibilidad al agrietamiento en frío.
Normalmente no es necesario aumentar la temperatura de trabajo
Soporta bien las tensiones de la soldadura

TABLA 7a. RAEX® 400/450/500. CONSUMIBLES DE SOLDADURA AUSTENÍTICOS DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS), EJEMPLOS. CLASIFICACIÓN EN.

Marcas equivalentes o casi equivalentes (Esab). Clase de resistencia máxima del metal de soldadura puro de aproximadamente 500 MPa. La 'X' de la norma puede representar una o varias marcas de especificación.

Soldadura con electrodo sólido MIG	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MIG: Electrodo con núcleo metálico	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo de núcleo fundente de rutilo	Soldadura por arco sumergido: Electrodo + fundente	Soldadura por arco metálico manual
EN 12072: G 18 8 Mn	EN 12073: T 18 8 Mn X	EN 12073: T 18 8 Mn X EN 14700: T Fe 10	EN 12072: S 18 8 Mn	EN 1600: E 18 8 MnX
OK Autrod 16.95 (G 18 8 Mn)	OK Tubrod 15.34 (T 18 8 Mn M M 2)	OK Tubrodur 14.71 (T Fe 10)	OK Autrod 16.97 (S 18 8 Mn) + OK Flux 10.93	OK 67.45 (E 18 8 Mn B 4 2)

TABLA 7b. RAEX® 400/450/500. CONSUMIBLES DE SOLDADURA AUSTENÍTICOS DE BAJA RESISTENCIA ('UNDERMATCHING', BLANDOS), EJEMPLOS. CLASIFICACIÓN AWS.

Marcas equivalentes o casi equivalentes (Esab). Clase de resistencia máxima del metal de soldadura puro de aproximadamente 500 MPa. La 'X' de la norma puede representar una o varias marcas de especificación.

Soldadura con electrodo sólido MIG	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo con núcleo metálico	Soldadura con electrodo de núcleo fundente MAG: Electrodo de núcleo fundente de rutilo	Soldadura por arco sumergido: Electrodo + fundente	Soldadura por arco metálico manual
AWS 5.9 ER307	AWS 5.9 EC307	AWS 5.22 EC307T-x	AWS 5.9 ER307	AWS 5.4 E307-X
OK Autrod 16.95 (ER307)	OK Tubrod 15.34	OK Tubrodur 14.71	OK Autrod 16.97+ OK Flux 10.93	OK 67.45

5 PREVENCIÓN DEL AGRIETAMIENTO EN FRÍO

Para prevenir el agrietamiento en frío, es de vital importancia mantener en un nivel bajo el hidrógeno que entra en la junta soldada. Para mantenerse por debajo del contenido crítico de hidrógeno, es necesario utilizar métodos y consumibles de soldadura con bajo contenido de hidrógeno. Además, deben seguirse las instrucciones de soldadura de Raex®. Una temperatura de trabajo y aporte térmico correctos, para lograr una velocidad de enfriamiento adecuada, constituyen los factores clave de la soldadura. Además, es necesario que la temperatura sea suficientemente alta entre soldaduras. La necesidad de evitar el agrietamiento en frío se acentúa al aumentar la dureza del acero y el espesor de la chapa. Si la chapa se almacena en frío, debe calentarse bien, al menos a temperatura ambiente (+ 20 °C), antes de la soldadura o de otros tratamientos de la chapa.

5.1 CONTROL DEL ENDURECIMIENTO DE LA MICROESTRUCTURA DE UNA JUNTA SOLDADA

Una microestructura martensítica implica una resistencia al desgaste óptima. Si la junta se enfría demasiado rápido después de la soldadura, la martensita se puede endurecer demasiado y su ductilidad ser demasiado baja de forma perjudicial en el metal de soldadura y/o en la zona afectada por el calor de la soldadura. El agrietamiento en frío se previene limitando el endurecimiento de la microestructura con unos parámetros de soldadura correctos. La capacidad de endurecimiento del acero y los consumibles de soldadura se debe a su valor equivalente de carbono.

5.2 CONTROL DEL CONTENIDO DE HIDRÓGENO

Para prevenir el agrietamiento en frío es muy importante mantener un nivel bajo de hidrógeno en el consumible y la zona afectada por el calor. Se recomienda utilizar un método de soldadura y consumibles con bajo contenido de hidrógeno para conseguir un contenido de hidrógeno máximo de 5 ml/100 g. Con los consumibles correctos, es posible obtener un nivel bajo de hidrógeno, por ejemplo, con soldadura por arco con gas protector (MAG) con electrodo sólido y electrodo de núcleo fundente, soldadura por arco sumergido y soldadura por arco metálico manual con electrodos con revestimiento básico. Las instrucciones de los fabricantes relativas a la elección, uso y almacenamiento de consumibles deben seguirse.

La entrada de hidrógeno en la junta soldada aumentará dependiendo de la humedad en la superficie de la ranura, así como de la suciedad y contaminantes tales como grasa o pintura. Para minimizar el agrietamiento en frío, la parte superior de las ranuras debe estar totalmente seca y el metal debe limpiarse antes y durante la soldadura.

5.3 ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES EN UNA JUNTA SOLDADA

El agrietamiento en frío se puede prevenir de manera efectiva aliviando las tensiones residuales. La forma más sencilla de eliminar las tensiones residuales en las juntas soldadas de aceros Raex® es utilizando consumibles de baja resistencia ('undermatching', blandos) austeníticos o ferríticos. Las tensiones también se pueden aliviar con algunas técnicas de soldadura. Al soldar chapas finas, especialmente, debe optimizarse el tamaño de la soldadura y evitar hacer unas soldaduras innecesariamente largas. La temperatura debe mantenerse uniforme en las diferentes partes de la estructura durante todo el proceso de soldadura. Si es necesario, durante los trabajos de soldadura o soldadura por puntos, la estructura que se va a soldar debe apoyarse o sujetarse de forma segura.

5.4 CONSEJOS PRÁCTICOS PARA LA SOLDADURA

En la Tabla 8 se presenta maneras para aliviar las tensiones residuales y mejorar la resistencia de la estructura soldada.

5.5 SOLDADURA A LA TEMPERATURA DE TRABAJO CORRECTA

Una temperatura de trabajo correcta y un aporte térmico suficiente ralentizan el enfriamiento de la junta soldada a la velocidad adecuada. Gracias a estas medidas no se producirá el agrietamiento en frío.

La temperatura de trabajo correcta se determina sobre la base de los siguientes factores:

- Calidad del acero y valor del equivalente de carbono.
- Espesor combinado de chapa.
- Aporte térmico.
- Contenido de hidrógeno de los consumibles de soldadura.
- Valor del equivalente de carbono de los consumibles de soldadura.
- Nivel de resistencia de los consumibles de soldadura.
- Tipo de consumibles de soldadura (ferríticos / austeníticos).

La necesidad de subir la temperatura de trabajo aumenta con el equivalente de carbono, la dureza y el espesor de la chapa del acero. Los valores equivalentes de carbono típicos de los aceros Raex® se indican en las respectivas fichas de datos para cada espesor de chapa. En los certificados de los materiales se facilitan los valores equivalentes de carbono para chapas, que se puedan usar para preparar un plan detallado de soldadura.

Las temperaturas de trabajo recomendadas para Raex® 400, Raex® 450 y Raex® 500 se indican en la Figura 7. Las recomendaciones se basan en la norma EN 1011-2. Las temperaturas de trabajo se aplican a consumibles ferríticos de baja resistencia (‘undermatching’, blandos) con contenido de hidrógeno 5 ml/100 g o inferior. La temperatura de trabajo generalmente se consigue con el precalentamiento. En las soldaduras de pasadas múltiples, la energía aportada a la junta, en la pasada anterior, puede ser suficiente para mantener la temperatura de trabajo correcta antes de la siguiente pasada, por lo que durante el trabajo no será necesario mantenerla caliente con medios externos. En la soldadura de pasadas múltiples, las recomendaciones de temperatura de trabajo señalan la temperatura mínima entre soldaduras. La temperatura entre soldaduras no puede ser inferior a la temperatura de trabajo recomendada ni superior a +220 °C. Cuanto más pequeño sea el contenido de hidrógeno generado por el método de soldadura, menor será la necesidad de aumentar la temperatura de trabajo. Si es necesario usar consumibles HD>5 ml/100 g, la temperatura de trabajo

debe ser superior a los valores indicados de la tabla. La necesidad de elevar la temperatura de trabajo disminuirá al aumentar el aporte térmico.

El aumento de la temperatura de trabajo es especialmente importante en la soldadura por puntos y en la soldadura de reparación, ya que las soldaduras pequeñas y locales se enfrían rápidamente y se endurecen muy rápidamente. Se debe evitar iniciar y detener las pasadas de soldadura en las esquinas de una estructura. La experiencia en la soldadura de aceros endurecidos demuestra las evidentes ventajas del precalentamiento. Incluso un precalentamiento moderado a temperaturas inferiores a +100 °C influye positivamente en la soldabilidad, también para espesores de chapa que no requieren precalentamiento conforme a las instrucciones. Para la soldadura de estructuras complejas y de gran tamaño, así como en condiciones especialmente difíciles, se debe alcanzar una temperatura de trabajo superior a la indicada en la tabla, aunque por debajo de +220 °C. No se deben alcanzar temperaturas de trabajo o entre soldaduras superiores a la indicada, ya que reducen la dureza de la soldadura.

TABLA 8. FORMAS PRÁCTICAS PARA ELIMINAR LAS TENSIONES RESIDUALES.

Aliviar las tensiones residuales durante la fase de planificación.
Minimizar las diferencias de rigidez en las diversas partes de la estructura.
Optimizar el tamaño de la soldadura.
Predecir y controlar las deformaciones.
Utilizar pretensado en la soldadura de grandes estructuras.
Dejar pequeñas separaciones en las construcciones que se van a soldar.
Realizar un uso adecuado de la ranuras de penetración completa de ambas caras al soldar chapas gruesas.
Rectificar los bordes y las esquinas de las estructuras de acero soldadas hasta que queden lisas.
Terminar la soldadura de estructuras que influyan en la fatiga rectificando las conexiones entre las soldaduras y el metal de base.

FIGURA 7. TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO RECOMENDADA (°C) PARA SOLDADURA.

Calidad del acero	Espesor de chapa, mm										
	10 20 30 40 50 60 70 80										
Raex® 400	+20		+75		+100	+125		+150		+175	
Raex® 450	+20	+75	+100	+125	+150	+175				+200	
Raex® 500	+20	+100	+125	+150	+175			+200			

6 CÓMO OBTENER LA COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PROPIEDADES EN LAS JUNTAS SOLDADAS

La resistencia, la dureza y la resistencia al desgaste son las características requeridas para juntas de acero resistente a la abrasión. Dependiendo de condiciones de uso y la utilización, es posible que existan otros requisitos como la resistencia a impactos y otras propiedades específicas. Aparte de la dureza, no hay otros requisitos generales en cuanto a valores. La aplicación de los parámetros de soldadura correctos y la temperatura recomendada de trabajo, garantizarán unas propiedades óptimas de la zona de soldadura.

6.1 PARÁMETROS RECOMENDADOS DE SOLDADURA

Los parámetros recomendados de soldadura se determinan con la variable $t_{8/5}$. Para lograr propiedades óptimas en una junta soldada se requiere que el aporte térmico seleccionado corresponda con el tiempo de enfriamiento $t_{8/5} = 10-20$ segundos. En el trabajo práctico de soldadura, el tiempo de enfriamiento de 10 segundos corresponde al valor mínimo del aporte térmico, mientras que el tiempo de enfriamiento de 20 segundos corresponde al valor máximo de aporte térmico. Un valor demasiado bajo de $t_{8/5}$ (enfriamiento rápido) aumenta el endurecimiento de la zona afectada por el calor y la susceptibilidad al agrietamiento en frío. Un valor demasiado alto de $t_{8/5}$ (enfriamiento lento) disminuye la dureza y la resistencia a impactos de la junta.

En la Figura 8a se indican los valores máximo y mínimo del aporte térmico recomendados para aceros Raex®. Las temperaturas de trabajo que se indican en la Figura 7 se han tenido en cuenta para determinar los límites de aporte térmico. Los valores mínimos de aporte térmico que se indican en la Figura 8, pueden reducirse aumentando la temperatura de trabajo. Esto podría ser necesario, por ejemplo, en la soldadura por puntos y en la soldadura de recuperación o en los cordones de raíz.

6.2 ZONA BLANDA EN JUNTAS SOLDADAS

La alta resistencia y dureza de los aceros resistentes a la abrasión se obtiene mediante elementos de aleación y endurecimiento. En la soldadura por fusión, la temperatura de la junta se eleva hasta 1500 °C o más. Por lo tanto, durante la soldadura de aceros resistentes a la abrasión se forman zonas blandas en la junta. Siempre se produce un

ablandamiento en la zona afectada por el calor. Además, el metal de soldadura generalmente sigue siendo más blando que el metal base duro. En la Figura 9 se muestra un perfil típico de dureza de las juntas soldadas en acero Raex®.

Comentarios sobre el perfil de dureza:

- La dureza de las juntas soldadas en aceros Raex® normalmente es menor que la del metal base.
- El perfil de dureza del acero Raex®, cortado térmicamente desde el borde cortado hacia el metal base, sigue el perfil de dureza de la zona afectada por el calor, con dos excepciones: la dureza máxima del borde cortado es algo mayor y la zona blanda de la chapa cortada es más estrecha que la de una junta soldada.
- La dureza de la zona afectada por el calor de un acero normal S355 es normalmente superior a la dureza del metal base y lo mismo es aplicable a los bordes cortados térmicamente.

Perfil de dureza de las juntas soldadas en acero Raex.

- La dureza del metal base depende del aporte térmico y de los elementos de aleación de los consumibles de soldadura.
- En la zona afectada por el calor, cerca de la línea de fusión, la dureza es igual a la del metal base.
- El ablandamiento de la zona afectada por el calor se acentúa cuando el aporte térmico aumenta, es decir, cuando se alarga el tiempo de enfriamiento ($t_{8/5}$).

La tendencia al ablandamiento causado por la soldadura debe tenerse en cuenta especialmente con calidades más duras y con pequeños espesores. Para evitar el ablandamiento, las chapas finas se deben soldar a temperatura ambiente +20 °C y no se permite el precalentamiento. El ablandamiento se previene limitando el aporte térmico y controlando la temperatura máxima de trabajo máxima/entre soldaduras.

En las aplicaciones de acero resistente a la abrasión, una zona blanda normalmente no acorta la vida útil del equipo o la estructura. No obstante, en las aplicaciones que requieren resistencia estructural, en el diseño debe tenerse en cuenta la zona blanda. En estas estructuras, las juntas soldadas no deben situarse en los puntos con más tensiones.

FIGURA 8a. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 400 (SOLDADURA A TOPE).

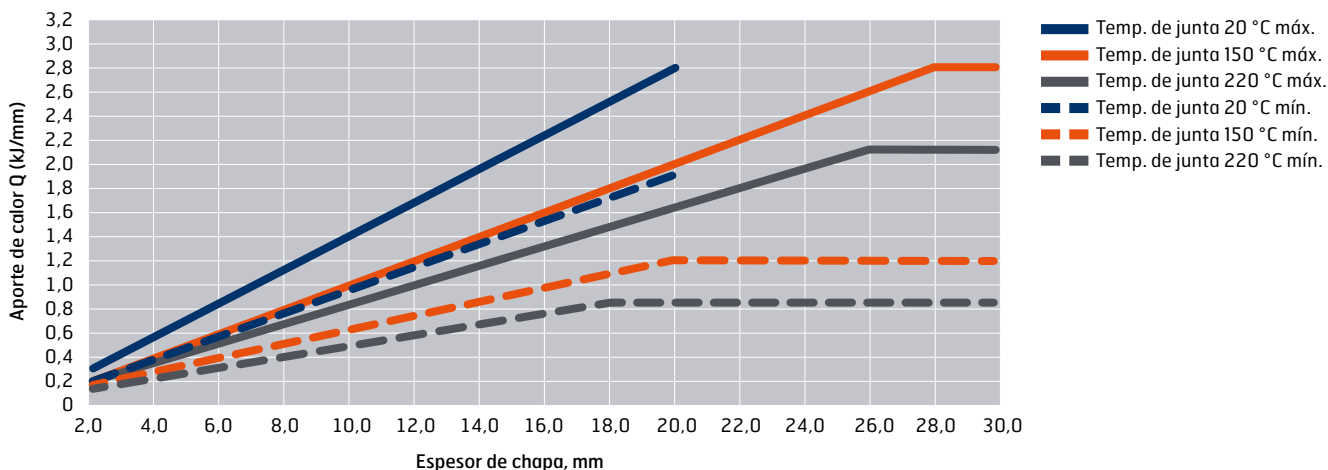


FIGURA 8b. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 450 (SOLDADURA A TOPE).

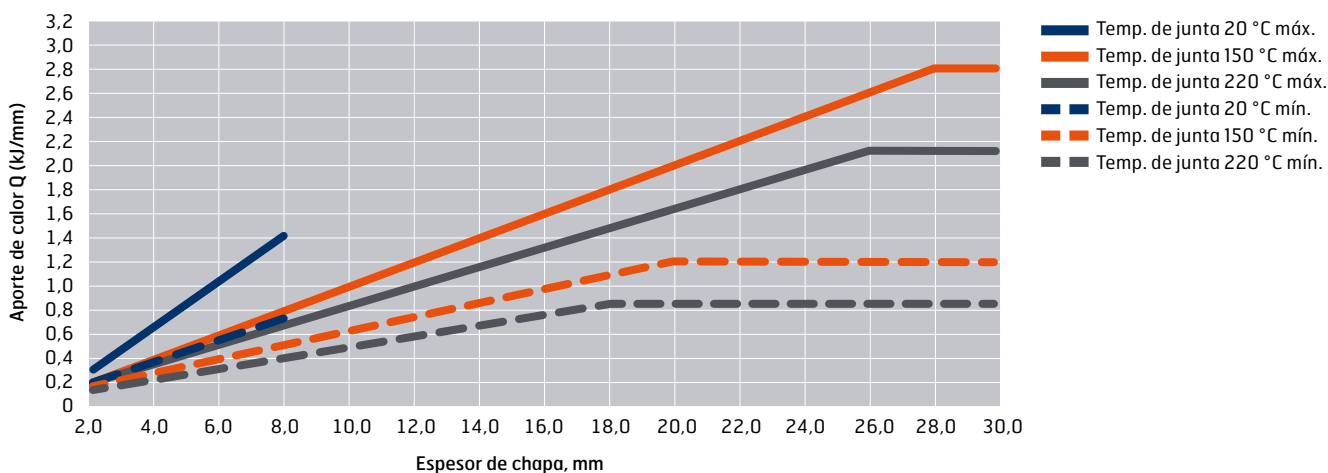


FIGURA 8c. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 500 (SOLDADURA A TOPE).

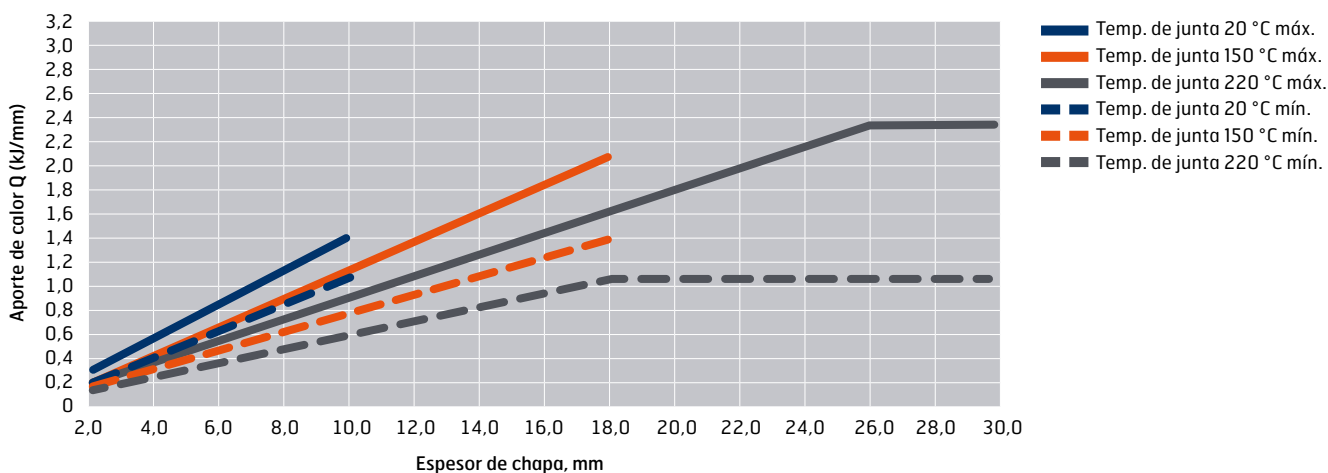


FIGURA 8d. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 400 (SOLDADURA EN FILETE).

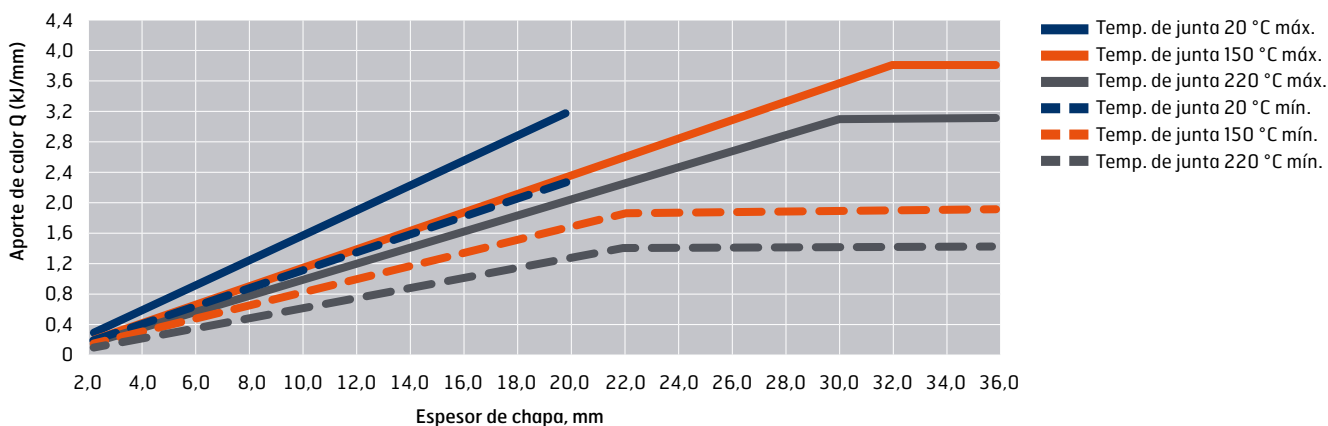


FIGURA 8e. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 450 (SOLDADURA EN FILETE).

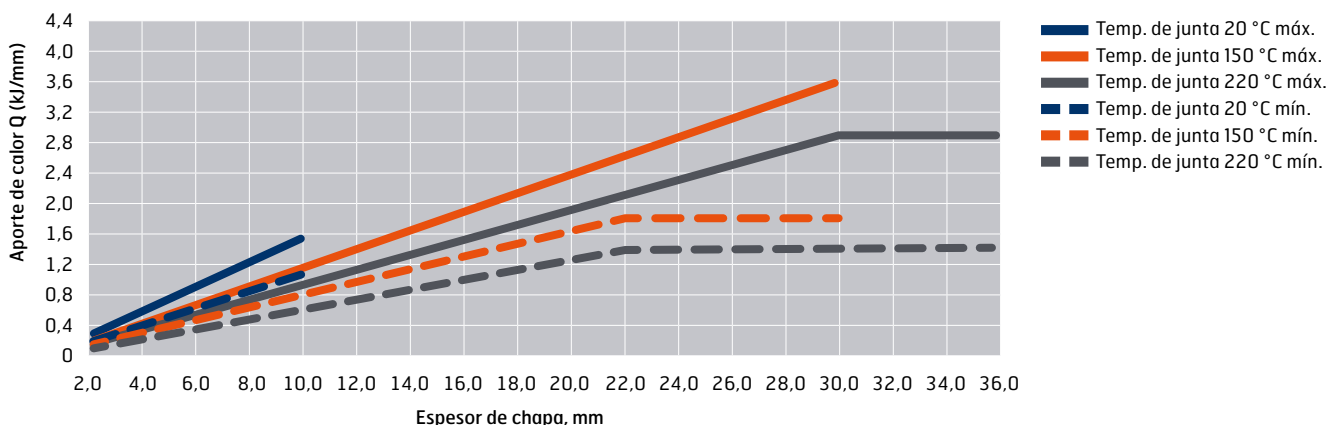


FIGURA 8f. APOORTE DE CALOR MÍNIMO Y MÁXIMO PARA RAEX® 500 (SOLDADURA EN FILETE).

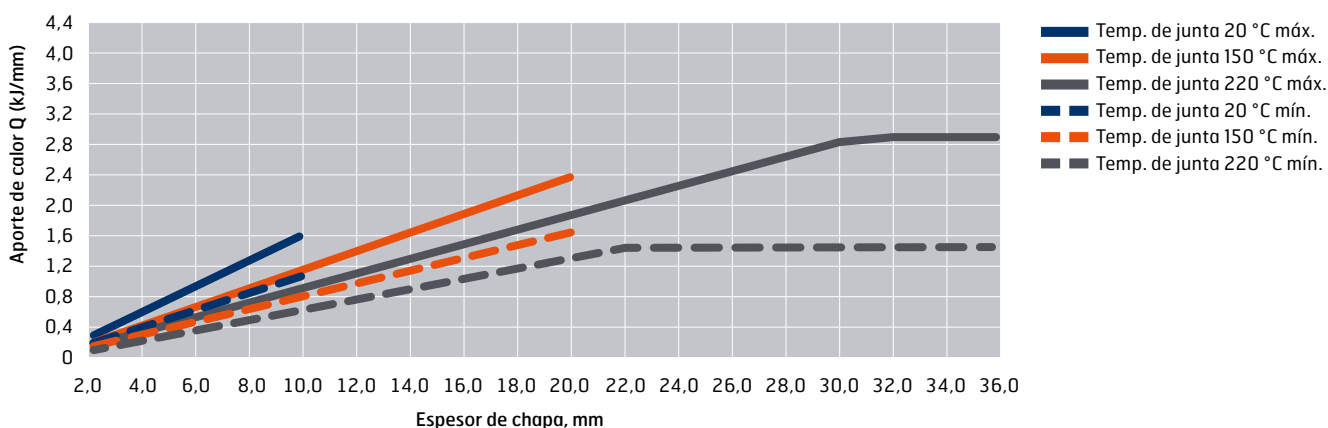
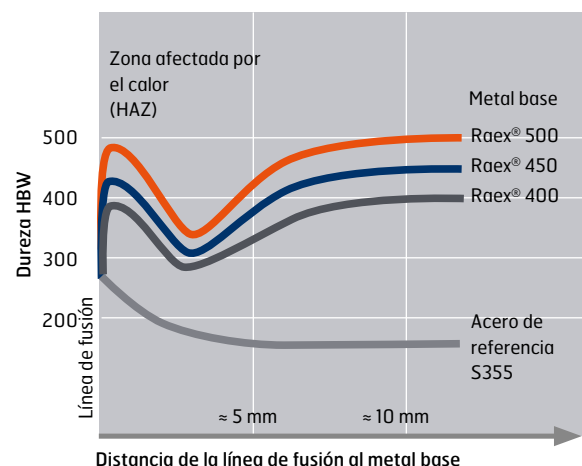


FIGURA 9. UN PERFIL TÍPICO DE DUREZA DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR DE UNA JUNTA SOLDADA AL USAR LOS TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO RECOMENDADOS $T_{8/5}$.



$$Q = \frac{k \times 60 \times U \times I}{1000 \times v}$$

Q = aporte térmico (kJ/mm)
 k = eficacia térmica
 $k = 0,8$ para MAG, FCAW y MMA
 $k = 1,0$ para SAW
 U = tensión (V), I = intensidad (A)
 v = velocidad de soldadura (mm/min)

Comparación con un perfil de dureza correspondiente de un acero de construcción estándar S355.

El contenido de este folleto es únicamente un resumen de las recomendaciones generales. SSAB AB no asume ninguna responsabilidad por la idoneidad para una aplicación específica. Por tanto, el usuario será el responsable de realizar las adaptaciones necesarias a las condiciones en cada caso concreto.

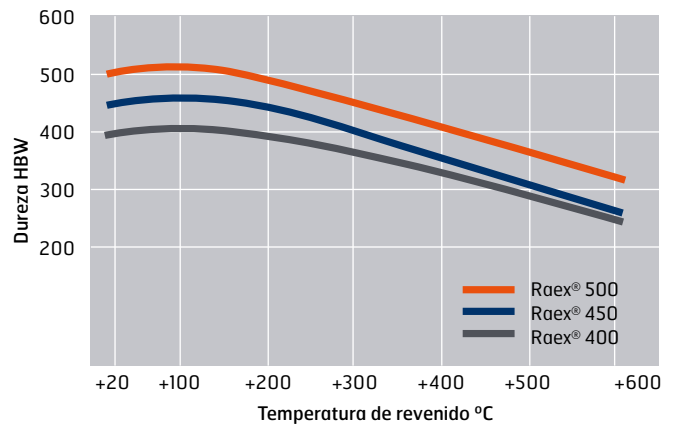
7 TRATAMIENTO TÉRMICO

Los aceros resistentes a la abrasión no se han diseñado para ser tratados térmicamente. El tratamiento térmico a altas temperaturas disminuye sus propiedades de dureza, resistencia y resistencia al desgaste. En la Figura 10 se muestra el cambio de dureza de los aceros Raex® después del revenido a distintas temperaturas. Como se muestra en la figura, parte de la dureza generada obtenido durante el proceso de endurecimiento ha desaparecido con el revenido.

Un tratamiento térmico a temperaturas superiores a 250 °C reduce la dureza. Por lo tanto, no es posible reducir las tensiones residuales de los aceros Raex® sin reducir su dureza. No se recomiendan tratamientos térmicos posteriores (PWHT).

En algunas aplicaciones, el acero endurecido se reviene o sus tensiones se reducen después de la soldadura o después de otras operaciones de tratamiento en taller. En este caso, se aceptan las propiedades mecánicas obtenidas mediante dicho tratamiento térmico. La resistencia del acero endurecido se puede mejorar con el revenido —razón que quizá motiva la decisión de aplicar un tratamiento térmico. El alivio de las tensiones puede reducir las tensiones creadas en una chapa de acero durante la fabricación en taller.

FIGURA 10. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO SOBRE LA DUREZA.



Los valores de dureza se han medido a temperatura ambiente después del revenido a temperaturas elevadas. El tiempo de mantenimiento fue de 2 horas, después los aceros se enfriaron al aire, a temperatura ambiente.

8 COMPORTAMIENTO DEL ACERO DURANTE EL CORTE TÉRMICO

Las chapas gruesas y los objetos grandes normalmente se cortan mediante métodos térmicos. Durante el corte térmico la superficie del acero se somete a tratamiento térmico local a una profundidad de pocos milímetros desde el borde cortado, incluidos los cambios en la microestructura. Debido a estos cambios, se forma una capa dura y una capa blanda en el borde cortado.

8.1 PROCEDIMIENTO DE CORTE TÉRMICO

La superficie del acero cortado térmicamente experimenta un calentamiento temporal que casi alcanza el punto de fusión del acero. Tras el corte, se enfría rápidamente, a menos que se controle la velocidad de enfriado. En el corte térmico, la superficie del acero sufre de cambios microestructurales similares a la zona afectada por el calor. La superficie más exterior de la pieza cortada se endurece. La superficie endurecida es susceptible al agrietamiento en frío. Bajo la superficie endurecida, se ha formado una zona blanda, ver la Figura 11. La zona blanda se ha recocido. La anchura de ambas zonas depende del método y los parámetros de corte.

8.2 CONTROL DE LA DUREZA DE LA SUPERFICIE MEDIANTE EL AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO

En el corte térmico, se recomienda controlar la dureza de la superficie tratada térmicamente para garantizar que la superficie permanece intacta. Una dureza máxima, suficientemente baja, evita que se formen grietas en el borde cortado. A menudo se utiliza el precalentamiento para controlar el endurecimiento. Las temperaturas de trabajo recomendadas para el corte térmico se indican en la Figura 12.

El precalentamiento por encima de la temperatura ambiente se puede evitar si la velocidad de corte se ajusta para que sea suficientemente lenta y tras elegir correctamente las boquillas de corte y otros equipos. Para identificar el mejor método de corte, recomendamos consultar con nuestro servicio técnico de clientes o con el fabricante del equipo de corte.

8.3 PREVENCIÓN DEL ABLANDAMIENTO DURANTE EL CORTE TÉRMICO

La energía de corte de las secciones de acero grandes se transfiere libremente a la chapa próxima, lo que acelera el enfriamiento de la zona de corte y limita el ancho de la zona suave. Sin embargo, en el oxicorte de chapas de

30 mm o menos de espesor, la distancia entre las líneas de corte debe ser al menos de 200 mm para evitar el ablandamiento de toda la chapa. Para controlar ablandamiento es posible aplicar el orden de corte.

La reducción del tamaño de la sección y el espesor de la chapa aumentan el ablandamiento. Con secciones pequeñas, la energía térmica generada por el método de corte y el precalentamiento posible, se acumula en la sección de corte y ralentiza el proceso de enfriamiento. De todos los métodos de corte térmico, los que provocan menos ablandamiento son el corte por láser y el corte por plasma de espesores adecuados. La zona blanda del acero cortado por láser o plasma es más estrecha que la correspondiente al acero cortado por oxicorte (Figura 13). Un oxicorte y corte por plasma sumergido eficientes permiten controlar el ablandamiento de la sección de corte y, por lo tanto, son adecuado para cortar secciones de todos los tamaños. Para controlar el ablandamiento, se recomienda usar métodos de corte en frío como, por ejemplo, el corte no térmico por chorro de agua o el corte por chorro de agua abrasivo.

8.4 CONSEJOS PRÁCTICOS PARA EL CORTE TÉRMICO

El efecto de las temperaturas bajo cero se debe tener en cuenta en las propiedades de tratamiento de las chapas. Las chapas que se hayan almacenado en un entorno de bajas temperaturas deberán llevarse a un entorno interior con suficiente antelación antes del oxicorte y la soldadura. En la Figura 13 se indica el tiempo necesario para el calentamiento, cuando se una chapa de acero se lleva a un entorno interior desde un entorno a temperaturas bajo cero. Las mediciones se realizaron en el norte de Finlandia en febrero con chapas de tres espesores diferentes.

La prueba de la Figura 13 ofreció los siguientes resultados de calentamiento desde -20 °C hasta +17 °C

- 8 horas aprox. para chapas de 12 mm
- 12 horas aprox. para chapas de 21 mm
- 17 horas aprox. para chapas de 40 mm

La superficie y el centro de la chapa se calientan a la misma velocidad. Las chapas gruesas y grandes apiladas unas sobre otras se calentarán más lentamente. Como regla general básica, una chapa fría (ancho de 2 m, largo de 6 m) almacenada en exteriores a temperaturas bajo cero se calienta a temperatura ambiente en aproximadamente 24 horas.

Consejos prácticos:

- Antes del corte, las chapas frías se deben dejar calentar correctamente hasta alcanzar la temperatura ambiente (+20 °C).
- Las chapas almacenadas en un lugar frío deben llevarse al taller el día anterior al procesamiento.
- Las chapas frías deben guardarse en estructuras de almacenamiento de madera.
- Una chapa fría de 40 mm (-20 °C) se calienta a temperatura ambiente (+ 20 °C) en unas 24 horas.
- Al cortar chapas gruesas, debe usarse una elevada temperatura de trabajo tal y como se indica en la Figura 12.
- Para la eliminación de virutas de una sección cortada térmicamente, la superficie endurecida y los bordes afilados deben amolarse.

FIGURA 11. CHAPA DE ACERO RESISTENTE A LA ABRASIÓN, 6 mm. PERFIL TÍPICO DE DUREZA DE UNA SUPERFICIE CORTADA TÉRMICAMENTE ILUSTRADA DESDE EL BORDE CORTADO HACIA EL ACERO BASE.

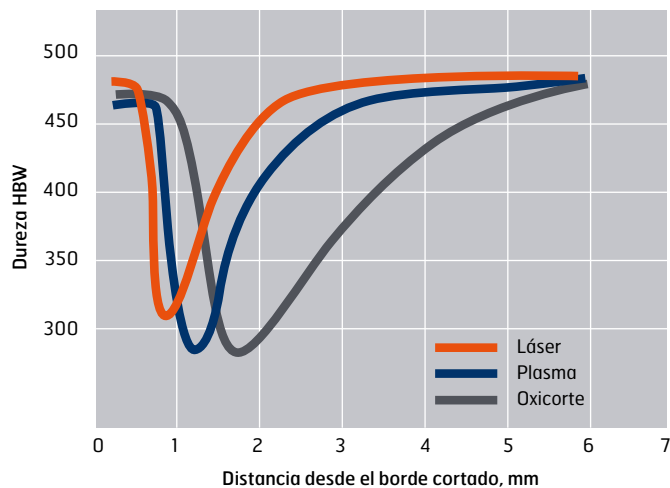
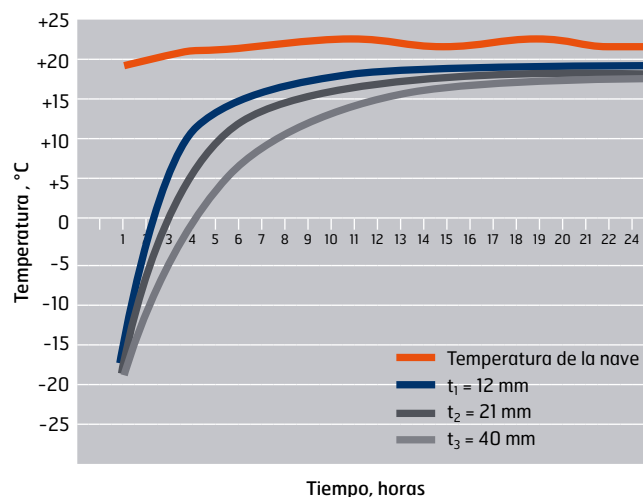


FIGURA 12. TEMPERATURAS DE TRABAJO RECOMENDADAS (°C) PARA EL OXICORTE.

Calidad del acero	Espesor de chapa, mm							
	1020304050607080							
Raex® 400	+20			+100	+125	+150		
Raex® 450	+20			+125		+150		
Raex® 500	+20	+125	+150	+175				

FIGURA 13. EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DE CHAPAS DE ACERO FRÍAS (-20 °C) EN UNA NAVE A UNA TEMPERATURA DE ENTRE +20 °C Y +22 °C.



Tamaños de chapa 12 x 1000 x 2000, 21 x 1000 x 1600 y 40 x 1000 x 2000 mm.

9 PROPIEDADES DE CORTE CON LÁSER

Las propiedades de corte con láser dependen del estado y la potencia de la máquina, aunque también de la composición química y la calidad de superficie de la chapa de acero. Para los aceros Raex® se recomienda el corte por láser en superficies con escamas de laminación para obtener unos bordes cortados con la mejor calidad posible.

Las propiedades de corte con láser son muy buenas para espesores de hasta 20 mm en distintas condiciones de entrega. Las superficies con escamas de laminación y granalladas pueden cortarse con láser de fibra y CO₂ utilizando los parámetros y velocidades de corte predeter-

minados de los proveedores de la máquina de corte láser. Para corte de superficies recubiertas de imprimación, la velocidad de corte debe reducirse o bien, evaporar el recubrimiento de imprimación antes de cortar la chapa. Recomendamos evaporar el recubrimiento de imprimación antes del corte para poder obtener la misma calidad de bordes cortados que con las superficies de escamas de laminado o granalladas. Desde abajo, es posible ver las diferentes calidades de los bordes cortados con láser de CO₂ con distintas condiciones de entrega.

FIGURA 14. CALIDAD DE BORDES CORTADOS CON DISTINTAS CONDICIONES DE ENTREGA.

Estado de la superficie	10 mm	15 mm	20 mm
Escamas de laminación			
Granallado			
Pintado e imprimado			

CONTACTO