

# TECHSUPPORT N° 16

## Corte térmico de Hardox® e Strenx®

### Corte de Hardox® e Strenx®

A chapa antidesgaste Hardox® e o aço de alto desempenho Strenx® são aços extremamente limpos. Isso, juntamente com seu baixo teor de liga, os tornam muito fáceis de cortar. O Hardox® e o Strenx® podem ser cortados por todos os métodos de corte térmico, incluindo corte oxicom bustível, corte plasma e corte laser. Naturalmente, também é possível usar processos de corte a frio.

As recomendações do Tech Support N° 16 dizem respeito principalmente aos processos de corte térmico e são divididas em três subcapítulos: corte oxicom bustível, corte plasma e corte laser.

Os métodos de corte a frio, cisalhamento e perfuração, são limitados aos graus Hardox® menos duros (400 e 450) e a todos os graus Strenx® em espessuras moderadas. O corte a jato de água abrasivo (AWJ) é um método de corte a frio que permite cortar todos os graus de Hardox® e Strenx® independentemente da espessura.



**FIGURA 1.** A partir do canto superior esquerdo, corte oxicom bustível, corte plasma, corte laser e corte a AWJ.

O corte térmico dos aços Hardox® e Strenx® é tão simples quanto o corte de aço carbono comum. Quanto ao processo de corte em si, pode ser mais simples cortar Hardox® e Strenx® do que o aço carbono devido à limpeza do aço. No entanto, ao cortar chapas grossas de Hardox®, é necessária alguma atenção devido ao risco de trincas nas bordas de corte. Como o Strenx® e o Hardox® pertencem à família de aços temperados e revenidos (QT), eles respondem ao corte térmico de maneira diferente do aço carbono. Os aços temperados e revenidos são suscetíveis ao amaciamento devido ao corte térmico e alguns aços QT são suscetíveis a trincas nas bordas de corte. Seguindo as recomendações e diretrizes fornecidas abaixo, os aços Hardox® e Strenx® podem ser cortados termicamente com equipamentos convencionais. Mais informações podem ser encontradas no Manual de soldagem publicado pela SSAB.

## Trincas nas bordas de corte

Trinca nas bordas de corte é um fenômeno similar à trinca por hidrogênio em soldagem (também conhecido como trinca a frio) e ocorre quando são usados métodos de corte térmico. O efeito “atrasado” das trincas a frio faz com que a trinca fique visível horas ou semanas após o corte. O risco de trincas aumenta com a dureza do aço e a espessura da chapa. A forma de reduzir o risco de trincas nas bordas de corte é descrito abaixo.

As trincas nas bordas de corte estão intimamente relacionadas ao teor de hidrogênio e às tensões residuais na chapa de aço. Portanto, é interessante reduzir o teor de hidrogênio e as tensões residuais, o que pode ser feito de diferentes maneiras:

1. Pré-aquecimento da chapa;
2. Pós-aquecimento;
3. Redução da velocidade de corte;
4. Combinação de pré-aquecimento, pós-aquecimento e redução da velocidade de corte, juntamente com um processo de resfriamento prolongado da ZTA (zona termicamente afetada).

### Pré-aquecimento

Um método de evitar a trinca por hidrogênio ao cortar é pré-aquecer o material e cortá-lo enquanto ele ainda estiver aquecido. O pré-aquecimento pode ser usado, de preferência, antes do corte oxicomustível e do corte plasma usando oxigênio como gás do plasma.

Em relação a todo tipo de corte laser e corte plasma com nitrogênio, o pré-aquecimento não é recomendado devido a seu efeito negativo na qualidade da borda de corte.

Dependendo da situação, parte da chapa ou a chapa inteira pode ser aquecida. O modo de fazer isso pode envolver:

- Forno de aquecimento;
- Maçaricos de pré-aquecimento;
- Mantas elétricas.

O aquecimento em fornos é a melhor maneira de pré-aquecer, pois resulta em temperatura uniforme de toda a chapa. Os maçaricos de pré-aquecimento também podem ser aplicados ao pré-aquecimento de chapas de Hardox® e Strenx® (ver **figura 3**). É importante que os maçaricos estejam em movimento para que a temperatura da chapa não ultrapasse a temperatura máxima de pré-aquecimento. Além disso, a temperatura de pré-aquecimento é medida no lado oposto àquele onde o pré-aquecimento é aplicado.

A manta elétrica é um método lento de pré-aquecimento. Portanto, para pré-aquecer a 150-200 °C, uma boa prática é pré-aquecer durante a noite e iniciar a operação de corte na manhã seguinte.

### Pós-aquecimento

O pós-aquecimento é um método confiável para evitar trincas nas bordas de corte. Isso pode ser feito em forno ou com maçaricos. O método mais fácil é usar maçaricos, que são amplamente difundidos na indústria, já que os fornos não são tão comuns. É importante que o processo de pós-aquecimento ocorra o mais rápido possível após o corte da peça. O tempo máximo é de 30 minutos entre o início do corte e o início do procedimento de pós-aquecimento. É importante não aquecer demais o material.

Usando fornos, a temperatura não deve ultrapassar a temperatura máxima permitida listada na **tabela 2** e a chapa deve permanecer no forno até atingir essa temperatura. Dependendo da espessura da chapa, o tempo irá variar, mas como regra geral, o tempo de pós-aquecimento deve ser de, pelo menos, 5 minutos para cada mm de espessura da chapa (ou seja, 50 minutos para uma chapa de 10 mm de espessura).

Usando maçaricos, **figura 4**, é importante não sobreaquecer. A temperatura da borda de corte não deve ultrapassar 700 °C. Normalmente, o tratamento de pós-aquecimento com maçaricos é feito manualmente e, nesse caso, é importante saber controlar a temperatura. Isso é feito observando a cor da borda de corte logo atrás do maçarico, que deve

apenas começar a brilhar (vermelho muito escuro). Se a cor for de um bordô brilhante ou laranja escuro, a temperatura está muito alta, o pós-aquecimento não será bem-sucedido e precisará ser refeito. Se o pós-aquecimento for feito sob luz forte (sob o sol), será mais difícil determinar a temperatura; portanto, se possível, execute-o em ambientes fechados.

### Redução da velocidade de corte

Quando a velocidade de corte é reduzida, o material aquece em torno da frente de corte e a zona termicamente afetada pelo calor é maior. Isso afeta as tensões residuais de tal forma que o risco de trincas nas bordas de corte é reduzido. Lembre-se que reduzir a velocidade de corte não é tão confiável quanto o pré-aquecimento ou o pós-aquecimento e deve ser usada apenas como substituta se, por exemplo, a oficina não possuir equipamentos adequados de pré/pós-aquecimento.

Se o método da redução da velocidade de corte for utilizado, é importante que a velocidade de corte não ultrapasse aquela listada neste documento; caso contrário, o risco das trincas não será reduzido.

### Resfriamento lento

Independentemente de ser ou não usado pré-aquecimento das peças cortadas, uma taxa de resfriamento

lento reduzirá o risco de trincas nas bordas de corte. É possível obter resfriamento lento se as peças forem empilhadas enquanto ainda estiverem quentes devido ao processo de corte e cobertas com uma manta isolante/térmica. Deixe as peças esfriarem lentamente até a temperatura ambiente.

### Concentradores de tensão

Quinas vivas atuarão como concentradores de tensão e, visto que a trinca por hidrogênio está intimamente relacionada às tensões residuais, estas quinas aumentarão o risco de trincas nas bordas de corte. Isso é válido para todos os métodos de corte térmicos ou a frio, como o corte a AWJ. Se as seguintes ações forem consideradas, o risco de trincas diminuirá:

1. Se possível, evite ângulos de corte agudos/formas pontiagudas nas peças.
2. Se possível, use geometrias/forma de corte suave.
3. Faça uma sequência de corte de entrada e saída em círculos.
4. Se a operação de corte precisar ser interrompida (por exemplo, ao final de um turno de trabalho), faça um corte "limpo" removendo qualquer concentrador de tensão na chapa (removendo qualquer canto vivo já na peça).

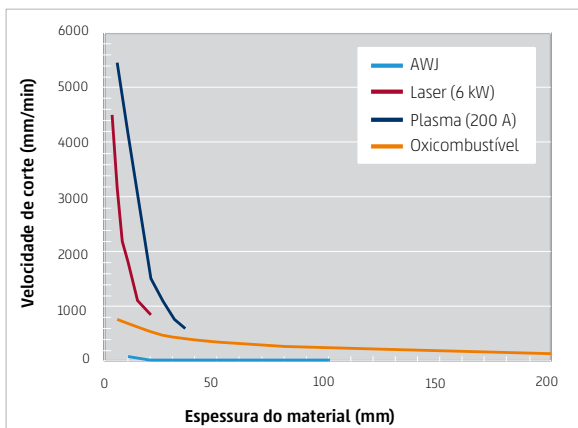


FIGURA 2. Velocidade de corte em função da espessura do material para diferentes processos de corte



FIGURA 3. Bicos de pré-aquecimento.



FIGURA 4. Pós-aquecimento manual.

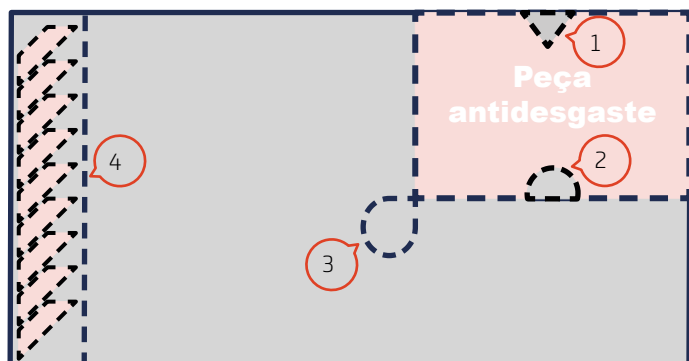


FIGURA 5. Evite quinas vivas voltadas para dentro.

## Corte oxicom bustível

Os aços Hardox® e Strenx® são facilmente cortados pelo processo de corte oxicom bustível. O corte oxicom bustível praticamente não tem limitações quando se trata de espessura do material, sendo possível cortar materiais com até 1000 mm de espessura. Embora seja possível cortar materiais relativamente finos, a espessura principal para este tipo de corte é acima de 20 mm. As características gerais para corte oxicom bustível podem ser vistas na **tabela 1**. Um mal-entendido comum é que você precisa de pressão de oxigênio de corte mais alta para cortar aços duros. Visto que o corte oxicom bustível é um processo térmico, a dureza do aço não influencia o desempenho do corte. Tanto o Hardox® quanto o Strenx® têm um conceito de baixa liga que, juntamente com a limpeza do aço, facilita o corte.

### Hardox®

#### Pré-aquecimento

As recomendações de pré-aquecimento para o corte oxicom bustível podem ser encontradas na **tabela 2**.

#### Pós-aquecimento

Como mencionado na seção anterior, é preferível usar pós-aquecimento para minimizar o risco de trincas nas bordas. No caso de tratamento por pós-aquecimento em forno, use as temperaturas (máximas) fornecidas na **tabela 2**. Deixe a chapa/peça permanecer no forno até atingir a temperatura exata (**tabela 2**).

Se o pós-aquecimento for feito com maçarico, cuide para que a temperatura não ultrapasse os 700 °C. Na prática, isso significa que a borda de corte logo atrás do maçarico deve começar a brilhar com uma cor vermelha muito escura (vermelho sangue ou bordô muito escuro; veja a **figura 6**).

Também é importante que o tratamento por pós-aquecimento ocorra o mais rápido possível após o término da operação de corte. No máximo, 30 minutos entre o início da operação de corte e o início da operação de pós-aquecimento.

#### Redução da velocidade de corte

Quando a velocidade de corte é reduzida, o material aquece em torno da frente de corte e a zona térmica afetada pelo calor é maior. Isso afeta as tensões residuais de tal forma que o risco de trincas nas bordas de corte é reduzido. Mas lembre-se de que a redução

da velocidade de corte não é tão confiável quanto o pré-aquecimento ou o pós-aquecimento e deve ser usada apenas como substituta se, por exemplo, a oficina não possuir equipamentos adequados de pré/pós-aquecimento.

Se a redução da velocidade de corte for a única medida disponível para combater o risco de trincas no corte, ela não deve ultrapassar os valores máximos listados na **tabela 3**. Não use um bico muito grande (ou seja, use bico de 25-50 mm em vez de bico de 50-100 mm para uma chapa de 50 mm de espessura).

Para obter boa qualidade na borda de corte, a pressão de oxigênio de corte precisa ser reduzida. Até que ponto a pressão de corte precisa ser reduzida depende do tipo e do tamanho do bico. Sempre faça um corte de teste no qual a pressão de oxigênio de corte é ajustada até obter boa qualidade da borda de corte.

Certifique-se de que a chapa esteja o mais quente possível antes do corte. Durante o inverno, armazene as chapas dentro da oficina por algum tempo antes do corte.

### Strenx®

A maioria dos graus dos aços Strenx® em espessuras moderadas tem resistência suficientemente alta à trinca por hidrogênio, de modo que é desnecessário tomar medidas adicionais, como pré-aquecimento. Contudo, ao cortar Strenx® 700-960 em espessuras acima de 80 mm e Strenx® 1100 em espessuras acima de 30 mm, o risco de trincas nas bordas de corte aumenta. O risco de trincas nas bordas de corte pode ser reduzido pelo pré-aquecimento da chapa, uso de pós-aquecimento ou aplicação de corte lento.

A temperatura adequada de pré-aquecimento para Strenx® 700-960 é de 150 °C. Para Strenx® 1100, é um pouco abaixo de 150 °C. Se for aplicado pré-aquecimento, as temperaturas não devem ultrapassar as mencionadas na **tabela 4**.

Quanto ao tratamento por pós-aquecimento de Strenx®, consulte o tratamento por pós-aquecimento de Hardox®, acima.

No caso de corte lento de Strenx® 700-960, use os mesmos parâmetros do Hardox® HiTuf; para Strenx® 1100, use os mesmos parâmetros do Hardox® 450.

Método de corte	Largura do kerf	ZTA	Tolerâncias de dim.
Corte oxicom bustível	2-5 mm	4-10 mm	± 2,0 mm

**TABELA 1.** Características gerais para corte oxicom bustível.

Material	Temp. máx. de pré-aquecimento (°C)
Strenx® 700	300
Strenx® 900	300
Strenx® 960	300
Strenx® 1100	150
Strenx® 1300	150

**TABELA 4.** Temperaturas máximas recomendadas de pré-aquecimento.



**FIGURA 6.** Cor da borda de corte atrás do maçarico de pós-aquecimento.

Grau	Espessura da chapa	Temp. mín. de pré-aquecimento (°C)	Temp. máx. de pré-aquecimento (°C)
Hardox® HiTemp	5-51 mm	Sem pré-aquecimento	500
Hardox® HiTuf	<90 mm ≥90 mm	Sem pré-aquecimento 100	300
Hardox® 400	<45 mm 45-59,9 mm 60-80 mm >80 mm	Sem pré-aquecimento 100 150 175	225
Hardox® 450	<40 mm 40-49,9 mm 50-69,9 mm ≥70 mm	Sem pré-aquecimento 100 150 175	225
Hardox® 500	<25 mm 25-49,9 mm 50-59,9 mm ≥60 mm	Sem pré-aquecimento 100 150 175	225
Hardox® 550	<20 mm 20-51 mm >51 mm	Sem pré-aquecimento 150 170	200
Hardox® 600	<12 mm 12-65 mm	Sem pré-aquecimento 175	180
Hardox® Extreme*	8-19 mm	100	100

**TABELA 2.** Temperaturas de pré-aquecimento para corte oxicom bustível dos graus de Hardox®.

\*A SSAB recomenda o corte a AWJ. Se estiver disponível apenas o corte oxicom bustível, siga as recomendações na tabela 2.

A **TABELA 3** mostra a velocidade máxima de corte (mm/min) para corte oxicom bustível sem pré-aquecimento. O corte lento não é, por si só, um método suficiente para combater as trincas de corte no Hardox® Extreme. Se o único método disponível for o corte oxicom bustível, use pré-aquecimento juntamente com pós-aquecimento por maçarico.

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

\*Apenas o pré-aquecimento é aplicável. \*\*A SSAB recomenda o corte a AWJ.

## Corte plasma

Os aços Hardox® e Strenx® são facilmente cortados pelo processo de corte plasma. O corte plasma possui uma limitação no que diz respeito à espessura do material: a espessura principal a ser cortada deve ser inferior a 50 mm (dependendo da máquina de corte plasma). As características gerais para corte plasma podem ser vistas na **tabela 5**.

A **Figura 7** mostra a velocidade de corte em função da espessura do material e da potência disponível para este tipo de corte.

### Hardox® e Strenx®

Não há diferença na aplicação do corte plasma nos aços Hardox® e Strenx® em comparação com o aço carbono convencional, ou seja, podem ser usados os mesmos parâmetros de processo. O pré-aquecimento ou o pós-aquecimento para aumentar a difusão de hidrogênio da ZTA não são necessários durante o corte plasma da maioria

dos graus de Hardox® e Strenx®. O Hardox® 600 e o Hardox® Extreme devem ser pré-aquecidos ou pós-aquecidos para evitar trincas nas bordas de corte (veja as recomendações para corte oxicom bustível).

Método de corte	Largura do kerf	ZTA	Tolerâncias de dim.
Corte plasma	2-6,5 mm	2-5 mm	±1,0 mm

TABELA 5. Características gerais para corte plasma.

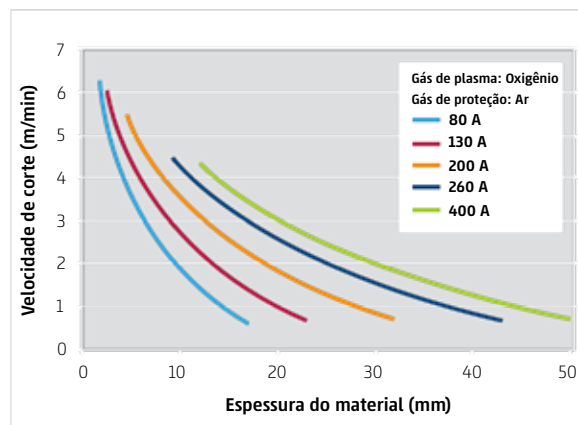


FIGURA 7. Mostra velocidades de corte gerais para diferentes fontes de energia de plasma.

## Corte laser

É fácil fazer o corte laser de Hardox® e Strenx® usando os parâmetros normais de processamento para a espessura de material fornecida. A espessura máxima é de aproximadamente 25 mm, dependendo do equipamento de corte laser. O mais comum é cortar em espessuras inferiores a 15 mm. As características gerais para corte laser podem ser vistas na **tabela 6**.

O corte laser é mais rápido do que o corte oxicom bustível e fornece maior qualidade de borda de corte do que o corte plasma. A **Figura 8** mostra a velocidade de corte em função da espessura do material e da potência do laser.

Devido às espessuras relativamente finas e ao pequeno aporte térmico, não é necessário pré-aquecimento para aumentar a difusão de hidrogênio da ZTA durante o corte laser dos aços Hardox® e Strenx®. Em vez disso, o pré-aquecimento prejudica a qualidade da borda de corte.

### Hardox® e Strenx®

Não há diferença na aplicação do corte laser dos aços Hardox® e Strenx® em comparação com o aço carbono, ou seja, podem ser usados os mesmos parâmetros de processo. O primer reduz a velocidade de corte, mas isso pode ser resolvido vaporizando-o primeiro e depois cortando o contorno à velocidade máxima.

Método de corte	Largura do kerf	ZTA	Tolerâncias de dim.
Corte laser	<1 mm	0,2-2 mm	±0,2 mm

TABELA 6. Características gerais para corte laser.

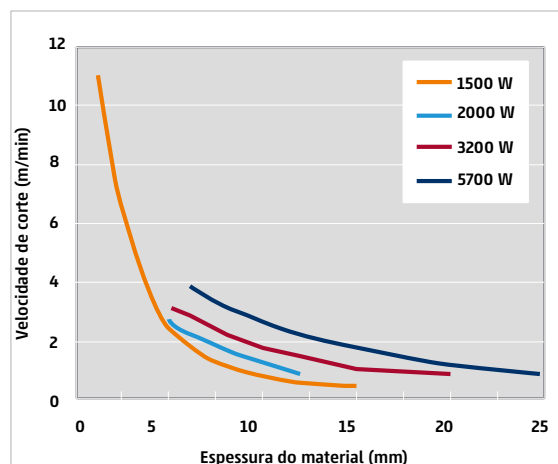


FIGURA 8. Velocidades de corte laser.

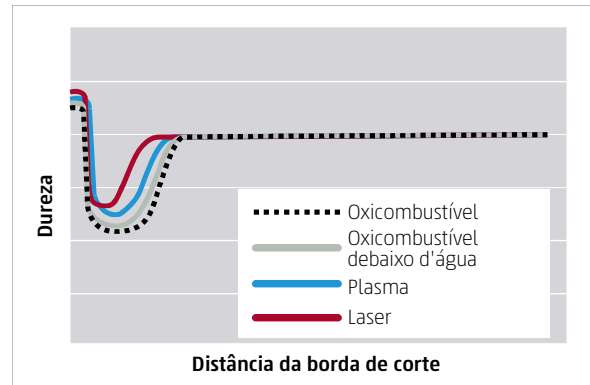
## Propriedades de dureza na ZTA

As propriedades da ZTA dependem de:

- Se o aço foi ou não temperado durante a fabricação e, em caso afirmativo, como isso foi feito.
- A composição química do aço.
- O impacto do tratamento térmico do processo de corte.

A largura da ZTA aumenta com o aumento do aporte térmico do processo de corte. Por exemplo, cortar com a mesma potência e reduzir a velocidade de corte resulta em uma ZTA mais larga. Diferentes processos de corte térmico têm diferentes aportes térmicos, resultando em ZTA mais larga ou mais estreita. O corte oxicom bustível tem o maior aporte térmico, seguido do corte plasma e do corte laser.

A **Figura 9** mostra uma figura esquemática da ZTA para Strenx® 1100 – Strenx® 1300 e Hardox® 400 – Hardox® Extreme.



**FIGURA 9.** Perfis de dureza na ZTA após o corte térmico de Hardox® e Strenx® com diferentes métodos de corte.

## Manuseio de chapas Hardox® 550, Hardox® 600 e Hardox® Extreme

Ao se manusear os materiais **Hardox® 550**, **Hardox® 600** e **Hardox® Extreme**, verifique sempre se as chapas não estão sujeitas a flexão de 3 pontos. Este tipo de flexão ocorre quando as chapas são empilhadas com madeiras/barrotes durante o empilhamento em camadas e estes barrotes não são posicionados corretamente. Sempre certifique-se de que os barrotes em cada camada sejam colocados sob os barrotes da camada inferior.

Nunca retorne uma chapa ao estoque com quinas vivas. Estas quinas agem como concentradores de tensão e irão causar a nucleação de trincas na chapa. Sempre faça um corte limpo para remover estes tipos de quinas antes de devolver a chapa ao estoque. Isso é válido para todos os métodos de corte, tanto térmicos quanto a frio, como o corte por jato d'água. As chapas de **Hardox® 550**, **Hardox® 600** e **Hardox® Extreme** são especialmente sensíveis a isso.



**FIGURA 11.** Chapas empilhadas adequadamente.

## Redução do risco de amaciamento

A resistência do aço ao amaciamento depende de sua composição química, microestrutura e forma de fabricação. Quanto menor a peça cortada termicamente, maior o risco de todo o componente perder dureza. Se a temperatura do aço ficar muito alta, a dureza dele será reduzida, de acordo com a **figura 11**. Verifique a temperatura máxima permitida nas **tabelas 3 e 4**.

### Método de corte

Quando são cortadas peças pequenas, o calor fornecido pelo maçarico de corte e pelo pré-aquecimento será acumulado na peça de trabalho. Quanto menor o tamanho da peça cortada, maior o risco de amaciamento. Quando é usado oxícombustível para corte de chapas de 30 mm ou mais, a regra geral é que existe o risco de perda de dureza de todo o componente se a distância entre dois cortes for inferior a 200 mm. A melhor maneira de eliminar o risco de amaciamento é usando métodos de corte a frio, como o corte a jato de água abrasivo. Se for usado corte térmico, é preferível utilizar corte laser ou plasma em vez de corte oxícombustível. Isso acontece porque o corte oxícombustível fornece mais calor e, assim, aumenta a temperatura da peça de trabalho.

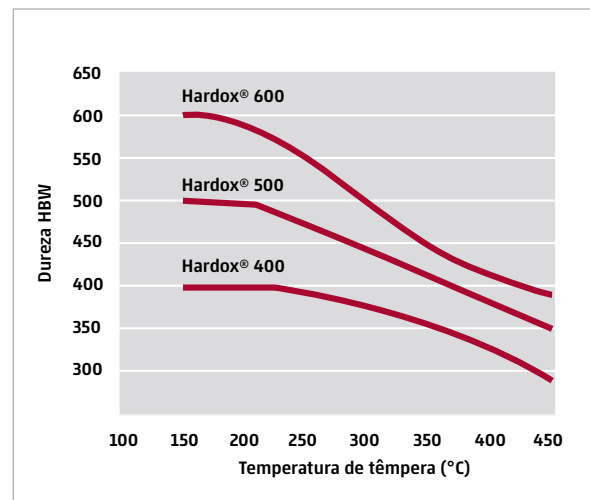
### Corte submerso

Uma maneira eficaz de limitar e reduzir a têmpera da chapa é resfriá-la, bem como a superfície de corte, com água durante a operação de corte. É possível fazer isso submergindo a chapa na água (**figura 12**) ou pulverizando água sobre a peça durante e após o corte. É possível aplicar o corte submerso ao corte plasma e ao corte oxícombustível.

Algumas vantagens que o corte submerso oferece são:

- Evita a perda de dureza de todo o componente.
- Menor empeno da peça cortada.
- As peças são resfriadas diretamente após o corte.
- Sem vapores ou poeira.
- Nível de ruído reduzido.

Visto que o pré-aquecimento não é aplicável ao corte submerso, as únicas medidas disponíveis para combater o risco de trinca por hidrogênio são o pós-aquecimento e a redução da velocidade de corte. Quando peças pequenas são cortadas por oxícombustível a partir de uma chapa grossa de Hardox®, há risco de amaciamento e de trincas nas bordas de corte. A melhor maneira de evitar isso é por corte submerso em velocidades baixas de corte ou com tratamento por pós-aquecimento das peças cortadas. O pós-aquecimento pode ser feito com maçarico ou em um forno.



**FIGURA 11.** Dureza superficial versus temperatura de têmpera.



**FIGURA 12.** Corte submerso.