

UMA VISÃO GERAL DOS FATORES METALÚRGICOS QUE INFLUENCIAM NA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS E AS DIFERENTES FORMAS DE MELHORÁ-LA

Nicolas Renaudot¹, Marc Mantel¹, Antonio S. Viana².

¹ UGITECH, Schmolz + Bickenbach group, Research Center, Avenue Paul Girod , 73403 Ugine , France

² Schmoltz BickenBach do Brasil

Resumo:

Usinabilidade, capacidade de um material ser usinado, é muito difícil definir devido a numerosos critérios existentes. Para um dado conjunto de parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, lubrificantes,...), ferramenta de desgaste, quebra de cavacos ou a potência consumida pelo torno mecânico são alguns desses critérios.

É um assunto empiricamente consolidado. Para os materiais e condições padrões (histórico termomecânico), os parâmetros de corte podem ser encontrados prontamente nas tabelas publicadas disponíveis, com excessão para as novas classes de aços inoxidáveis como os duplex e para os aços inoxidáveis com a «usinabilidade melhorada» como os UGIMA®.

Em vez de simplesmente produzir dados, o presente documento centra-se sobre os fatores metalúrgicos que regem a usinabilidade dos aços inoxidáveis padrões e as diferentes formas de melhorá-lo para mostrar as possibilidades e os limites dessas classes.

Abstract:

Machinability, i.e. the ability to be machined, is very difficult to define because of the numerous existing criteria. For a given set of cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut, lubricant, ...), tool wear, chip breakability or the power consumed by the lathe are some of these criteria.

It is a very empirically mature subject. For standard materials and conditions (thermo-mechanical history), the recommended cutting parameters can be found in readily available published tables, except for new stainless steel grades such as duplex and for “improved

machinability” stainless steels such as UGIMA®.

Rather than simply producing data, this paper is focused on the metallurgical factors governing the machinability of standard stainless steels and the different ways to improve it in order to show the possibilities and limits of these grades.

Introdução:

Entre as numerosas técnicas empregadas para trabalhar os aços inoxidáveis, os processos de usinagem dizem respeito principalmente aos produtos longos, apesar de perfurações, fresagem e furos de rosca serem frequentemente realizados em produtos planos. Neste último caso, estas operações muitas vezes precedem uma união mecânica com parafusos, pinos ou rebites. Em geral, usinagem é um processo no qual o material é removido com o auxílio de uma ferramenta de corte. A facilidade com que isto pode ser feito depende, entre outras coisas do material que a peça é feita. Isso deu origem ao conceito de usinabilidade, aplicada a um material ou a uma família de materiais.

No caso dos aços inoxidáveis, a usinabilidade foi a muito tempo considerada de importância secundária, uma vez que estes materiais foram classificados como sendo de difícil usinagem, especialmente a classe austenítica. No entanto, empresas siderúrgicas têm envidado esforços no sentido de controlar essas propriedades e foram bem sucedidos no desenvolvimento de uma classe de aços inoxidáveis de fácil usinagem, dos quais dois tipos destacam-se:

- Classe de aços resulfurizados de fácil usinagem;
- Classe de aços de fácil usinagem «Controlada com óxidos tratados», sendo a mais conhecida a família UGIMA®, cuja

usinabilidade é melhorada através do controle da distribuição e da composição química das inclusões de óxido AlSiCa. O tratamento do "controle de óxidos" pode ser aplicado nas classes com "baixos teores de enxofre" (até 0,03% S, de acordo com as normas) ou em classes de resulfuração (até 0,35% S), a fim de se aumentar a sinergia entre os dois métodos de usinagem fácil.

Em ambos os casos, o controle rigoroso da composição química e do processo de refino asseguram a presença de inclusões não-metálica e a fragmentação do cavaco, os quais criam uma camada de lubrificante na interface ferramenta/cavaco durante a usinagem.

Critérios de usinabilidade:

Um grande número de fatores podem afetar a usinabilidade, mas por razões práticas, apenas aqueles que podem ser facilmente observados ou medidos serão considerados, tais como a formação do cavaco, a vida da ferramenta, a qualidade da superfície do usinado (rugosidade) e o consumo de energia. Os dois primeiros são frequentemente avaliados através de dois testes padrões realizados em aços inoxidáveis com ferramentas revestidas com carbonetos. Estes testes são chamados $Vb_{15/0,15}$ ¹ e Couple Tool/Material² (CTM).

O $Vb_{15/0,15}$ é a velocidade de corte no torneamento para o qual o desgaste da ferramenta é de 0,15 mm em 15min de corte com uma dada taxa de alimentação (0,25mm/rev) e uma profundidade de corte (1,5 milímetros). Evidentemente, quanto maior o índice $Vb_{15/0,15}$, melhor a qualidade em termos de usinabilidade. O CTM é um teste que permite obter as três informações mais importantes sobre a usinabilidade de uma classe. Em primeiro lugar, permite a obtenção, pela medição das tensões aplicadas à ferramenta, da velocidade mínima de corte, abaixo da qual a temperatura do cavaco é demasiadamente baixa, induzindo elevadas tensões na ferramenta, e reduzindo o seu tempo de vida. Depois, permite a obtenção da zona de formação do cavaco³ (CBZ), ou seja, a área em termos do avanço e da profundidade do corte, na qual a quebra do cavaco é boa (o

cavaco é pequeno o suficiente para evitar problemas como quebra de ferramenta ou deterioração das superfícies das peças obtidas após usinagem). Evidentemente, quanto maior esta zona, melhor a classe.

Por último, este teste permite a obtenção de uma lei empírica chamada de Lei de Taylor, que associa o tempo de vida da ferramenta com os parâmetros de corte.

Este teste ligeiramente modificado pode inclusive ser aplicado em operações de perfuração.

Comportamento dos diferentes tipos de aço inoxidáveis:

Aços inoxidáveis austeníticos

Primeiro de tudo, estas qualidades apresentam elevadas taxas de encruamento. Quaisquer que sejam as características mecânicas das barras austeníticas à serem usinadas, são induzidas elevadas tensões nas ferramentas durante as operações de usinagem, devido ao rápido endurecimento dos cavacos durante a sua formação. Essas elevadas tensões tendem a reduzir o tempo de vida das ferramentas. Evidentemente, se o metal foi previamente trabalhado à frio, esse endurecimento é o principal responsável pela redução do tempo de vida da ferramenta.

Altos teores de C e N nestas classes tendem a aumentar as taxas de encruamento. Isto pode explicar a diferença observada entre $Vb_{15/0,15}$ de um 304L (ou 316L) e um 304H (ou 316H), em favor do 304L (ou 316L) (ver Tabela 1). Elementos como Mo, que estão como substitucionais na matriz, tendem a endurecer o metal devido à maior dimensão de seus cátions, e induzem também a uma diminuição do $Vb_{15/0,15}$ (ver Tabela 1).

Tabela 1: Efeito do C e N (através de seus efeitos no encruamentos) sobre a usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos.

	304L (4307)	304H (4301)	316L (4404)	316H (4401)
C (%)	0,020	0,040	0,020	0,040
N (%)	0,055	0,075	0,040	0,030
Mo (%)	-	-	2,0	2,0
$Vb_{15/0,15}$ * (m/min)	280	260	240	225

* Stellram ferramenta Z250 SNMG 120408-95

No entanto, mesmo quando trabalhados fortemente à frio, a sua elevada ductilidade permanece em grau suficiente para causar a formação de longos cavacos que tendem a fixar-se na ferramenta. Isto pode resultar na formação de uma encrustação na borda da ferramenta (fenômeno de *gripamento*) que pode aumentar as cargas sobre a ferramenta de corte e criar como consequência o risco de fratura da ferramenta. Portanto, altas cargas de corte são necessárias, o que conduz a um rápido desgaste da ferramenta, com o risco de fraturas devido a danos causados no seu canto. Em alguns casos (nominalmente, para operações de perfuração), um aumento do nível de C ou N ou do trabalho a frio pode aumentar a usinabilidade através de uma ampliação do CBZ.

Por último, a condutividade térmica destas ligas é cerca de três vezes inferior à dos aços carbono, levando a uma alta temperatura da interface metal/ferramenta, que reduz a vida útil da ferramenta.

Por todas estas razões, a classe austenítica destinada à usinagem tem geralmente teores de enxofre controlados (0,025/0,030%) ou são "ressulfurados", ou seja, possuem um nível de enxofre 0,25/0,35%.

Aços Inoxidáveis Ferríticos

As ligas ferríticas encruam muito menos do que a classe austenítica. O limite de resistência aumenta apenas cerca de 200 MPa para 50% de deformação à frio, comparado com mais que 1000 MPa para certos aços austeníticos. Essas características devem ser melhores para o tempo de vida da ferramenta, porque isso tende a limitar as tensões na ferramenta durante a formação de seu cavaco.

Além do mais, a condutividade térmica dos aços inoxidáveis ferríticos é maior do que a das ligas austeníticas, o que é muito bom para limitar a temperatura da ferramenta e aumentar o seu tempo de vida.

Mas, o muito baixo encruamento dos cavacos ferríticos durante a sua formação tende a produzir longos cavacos, induzindo a um mau aspecto superficial das partes usinadas, e à quebra da ferramenta devido aos cavacos,

especialmente em operações confinadas como o processo de perfuração. Neste caso, é muito difícil evacuar os longos cavacos obtidos pelos sulcos da broca, e isso induz à quebra da ferramenta.

Logicamente, os riscos de emperramento na borda da ferramenta são máximos.

Para limitar essas dificuldades, os aços inoxidáveis ferríticos destinados à usinagem são quase sempre ressulfurados (ver Inclusões de sulfetos nos aços ressulfurados de fácil usinagem).

Aços Inoxidáveis Martensíticos

A alta condutividade térmica e a baixa taxa de encruamento dos aços inoxidáveis martensíticos tende a permitir um maior valor de $V_{b15/0,15}$.

Mas, um dos principais parâmetros limitador do $V_{b15/0,15}$ parece ser o teor de C nessa classe, especialmente para os martensíticos com alto teor de C. Desde que a maior parte do carbono nessas ligas de alto C esteja em carbonetos, esses provavelmente atuarão como precipitados abrasivos, que reduzirão o tempo de vida da ferramenta.

Isto pode ser observado na $V_{b15/0,15}$ das quatro classes de aços martensíticos com o mesmo limite de resistência à tração, cerca de 800MPa (obtidos pelo tratamento térmico de têmpera + revenimento) (ver Tabela 2). O maior teor de C, corresponde ao menor valor de $V_{b15/0,15}$.

Tabela 2: Efeito do C (através da quantidade de carbonetos na matriz) na usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos.

	410 (4006)	420A (4021)	420B (4028)	420D (4034)
Cr (%)	11,5	12,2	12,1	12,6
C (%)	0,09	0,20	0,30	0,44
UTS (MPa)	785	780	804	800
$V_{b15/0,15}$ * (m/min)	320	270	230	215

* *Stellram tool Z250 SNMG 120408-95*

Certamente, um outro parâmetro importante para a usinabilidade da classe martensítica é o tratamento térmico (têmpera + revenimento). Se o revenimento é feito a uma temperatura muito baixa, induz uma alta resistência no material, e, a força de corte será alta demais,

bem como a taxa de desgaste da ferramenta. Por outro lado, se o revenimento é feito a uma temperatura alta demais, induzindo uma menor resistência do material, o encrustamento na ferramenta pode ser muito importante, induzindo uma importante diminuição do tempo de vida da ferramenta como na classe ferrítica.

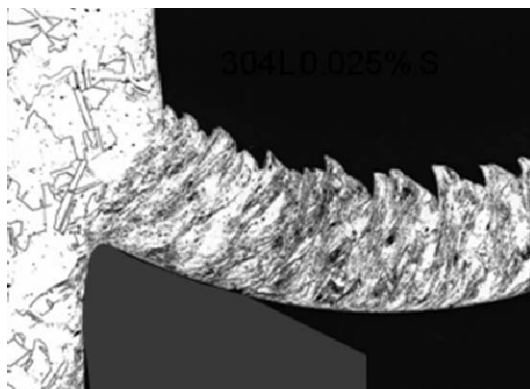
Formas de melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis:

Inclusões de sulfetos – aços resulfurados de fácil usinagem

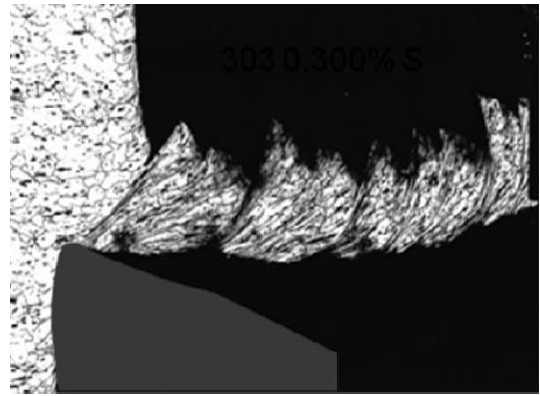
O uso deliberado de elevados teores de enxofre, tipicamente na faixa de 0,15 a 0,35% é uma técnica consolidada que produz uma espetacular melhoria na usinabilidade. A adição de enxofre causa a formação de sulfetos de manganês MnS e tem efeito benéfico na usinabilidade já claramente demonstrado.

O primeiro efeito benéfico observado é, de longe, a fratura do cavaco (ver Figura 1). Esse efeito é obtido graças à localização do cisalhamento do cavaco, que ocorre em torno do sulfeto de manganês. esses são muito maleáveis à temperatura que se estabelece no cavaco durante a sua deformação.⁴

Figura 1: Comparação da deformação dos cavacos em duas classes de aços inoxidáveis austeníticos 18%Cr-9%Ni – classe resulfurada (1.4305 / 303) tem de longe uma melhor tendência à fratura do cavaco que a classe 1.4307 (304L).



Formação do cavaco durante usinagem da classe 304L (4307)



Formação do cavaco durante usinagem da classe padrão 303 (4305)

O segundo efeito positivo é sobre o tempo de duração da ferramenta nas mesmas condições de corte, ou o aumento de $V_{b_{15/0,15}}$ (ver Tabela 3).

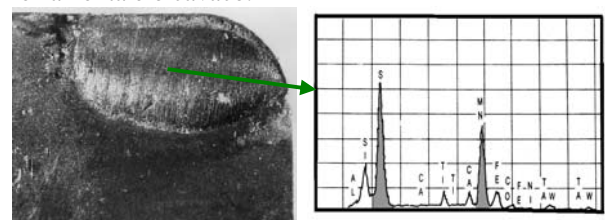
Tabela 3: efeito do S (através do efeito lubrificante do MnS) na usinabilidade da classe dos aços inoxidáveis austeníticos.

	304 (4301)	304 (4301)	303 (4305)
S (%)	0,005	0,025	0,300
$V_{b_{15/0,15}}$ * (m/min)	220	260	350

* *Stellram tool Z250 SNMG 120408-95*

É bem sabido que esse aumento está associado ao efeito lubrificante do sulfeto de manganês na interface entre a ferramenta e o cavaco durante a sua formação (ver Figura 2).

Figura 2: Observação da ferramenta após a usinagem do padrão 303 (4305): A presença de Mn e S na ferramenta é a prova de que o MnS age como lubrificante entre a ferramenta e o cavaco.



Em contrapartida, a sua presença reduz acentuadamente a resistência à corrosão, particularmente sob condições que conduzem ao *pitting*. Além disso, níveis excessivos de enxofre prejudicam tanto a trabalhabilidade à quente quanto a soldabilidade, devido ao aumento no risco de fratura à quente (principalmente para a classe austenítica). Por essa razão, metalurgistas têm trabalhado em

outros mecanismos para melhorar a usinabilidade (ver Inclusões de óxidos).

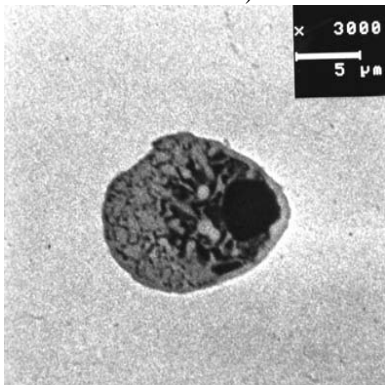
A versão com alto enxofre de aços de fácil usinagem está disponível para as três famílias principais de aços inoxidáveis: austeníticos, ferríticos e martensíticos.

Mas, para a família duplex (austeno-ferrítico), aumentar o teor de enxofre sem diminuir drasticamente as outras propriedades é muito difícil. A forjabilidade torna-se muito dificultada quando se aumenta o teor de S acima do nível padrão (< 10 ppm).

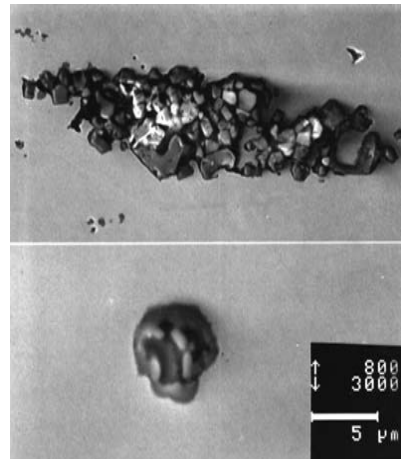
Inclusões de óxidos (UGIMA®)

Nos aços inoxidáveis padrões (não UGIMA®), os óxidos encontrados na matriz são principalmente alumina, crometos e sílica (ver Figura 3) esses são muito duros e frágeis, e possuem uma enorme tendência em danificar a ferramenta durante a usinagem. Além do mais, a quantidade desses óxidos não é controlada, induzindo variações na usinabilidade dessas classes padrões.

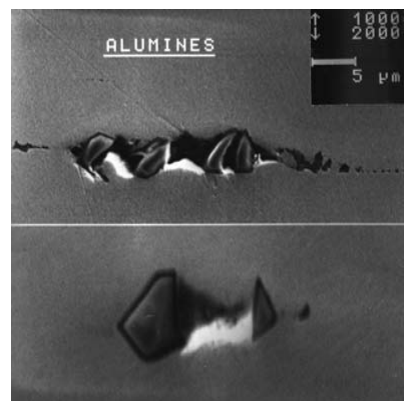
Figura 3: Exemplos de óxidos encontrados na matriz de um aço inoxidável padrão após laminação à quente – esses óxidos não são maleáveis e são sempre quebradiços nas elevadas temperaturas de laminação à quente (entre 1100 e and 1300°C)



Alumina



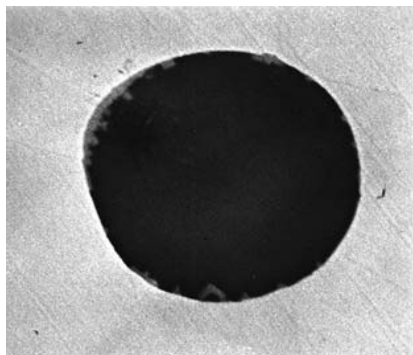
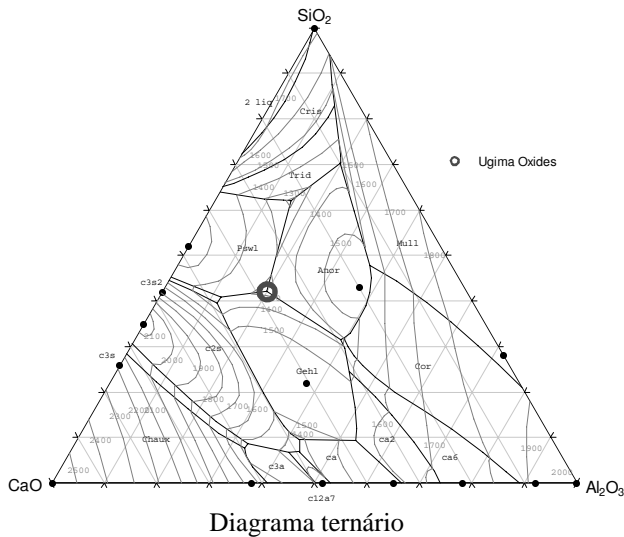
Crometos



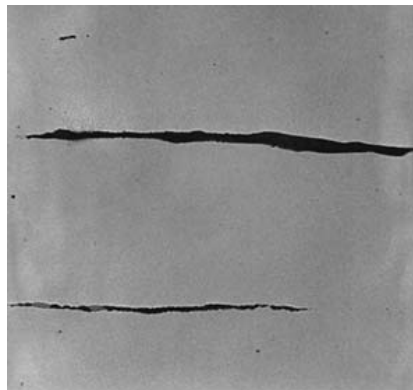
Sílica

Nos aços inoxidáveis UGIMA®, os óxidos possuem aparências específica, mostradas na Figura 4. Esses óxidos possuem pontos de fusão muito baixos (se comparados à alumina, crometos e sílica), induzindo uma habilidade de se tornarem maleáveis nas temperaturas intermediárias encontradas nos cavacos durante a usinagem, especialmente em altas velocidades de corte.

Figura 4: Diagrama ternário mostrando a análise química específica dos óxidos UGIMA® e conseqüentemente a sua maleabilidade, antes e após a laminação à quente



Óxido UGIMA® antes da laminação à quente



Óxido UGIMA® após a laminação à quente

Então, substituindo os óxidos padrões por UGIMA®, esses induzem nos aços inoxidáveis a possibilidade de terem uma usinabilidade estável de uma corrida para outra e de uma melhor usinabilidade média devido à ausência de óxidos duros. Mas, a maleabilidade dos óxidos nas temperaturas encontradas nos cavacos durante a usinagem induzem também a uma melhoria na usinabilidade através de dois fenômenos. Em primeiro lugar, os óxidos UGIMA® agem

como um lubrificante entre a ferramenta e o cavaco – graças à sua maleabilidade nas temperaturas intermediárias (ver Figura 5). Em segundo lugar, os óxidos UGIMA® permitem uma melhor fratura do cavaco, por meio do aumento da plasticidade localizada ao longo deles (ver Figura 6)⁵.

Figura 5: Microscopia observada de uma ferramenta após a usinagem de um UGIMA® 4305 (303): A presença de Al, Ca e Si (bem como de Mn e S) na ferramenta é a prova de que os óxidos UGIMA® (como o MnS para a classe resulfurizada) agem como lubrificante entre a ferramenta e o cavaco.

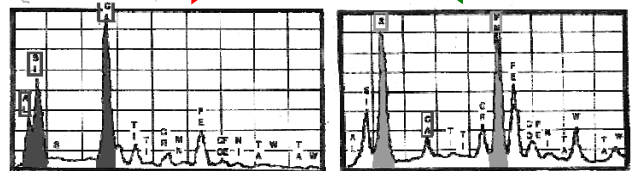
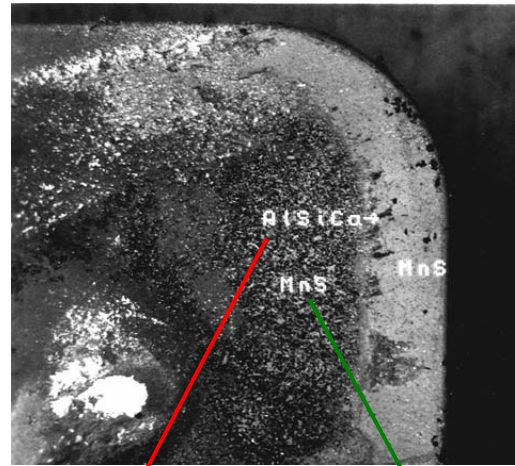
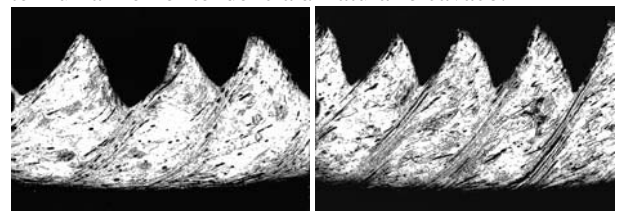


Figura 6: Comparação dos formatos dos cavacos para duas classes de aço inoxidável 4307. A classe UGIMA® tem uma melhor tendência à fraturar o cavaco.

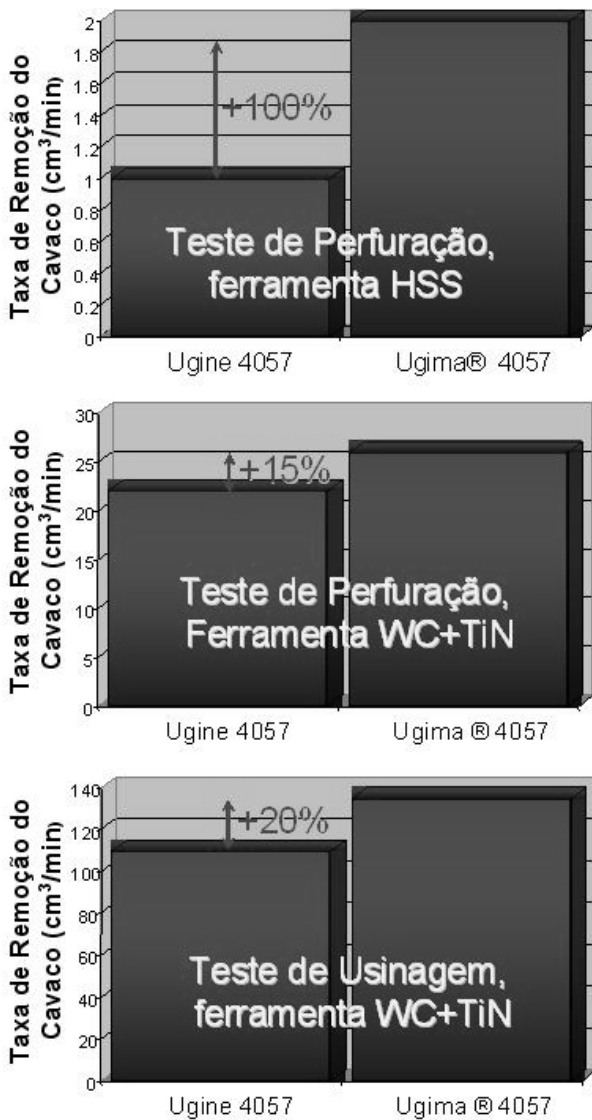


Cavaco - Padrão 4307

Cavaco - UGIMA® 4307

O controle dos óxidos obtido pelo processo UGIMA® permite aumentar a produtividade na usinagem sem reduzir o tempo de vida das ferramentas, graças aos efeitos de lubrificação e de quebra do cavaco. Na Figura 7 são mostrados alguns exemplos obtidos na melhoria da produtividade.

Figura 7: Exemplo de melhoria na produtividade (taxa de remoção do cavaco constante em cm^3/min com tempo de vida da ferramenta constante) para um UGIMA® 4057, em comparação com um padrão Ugin 4057 para 3 operações diferentes.



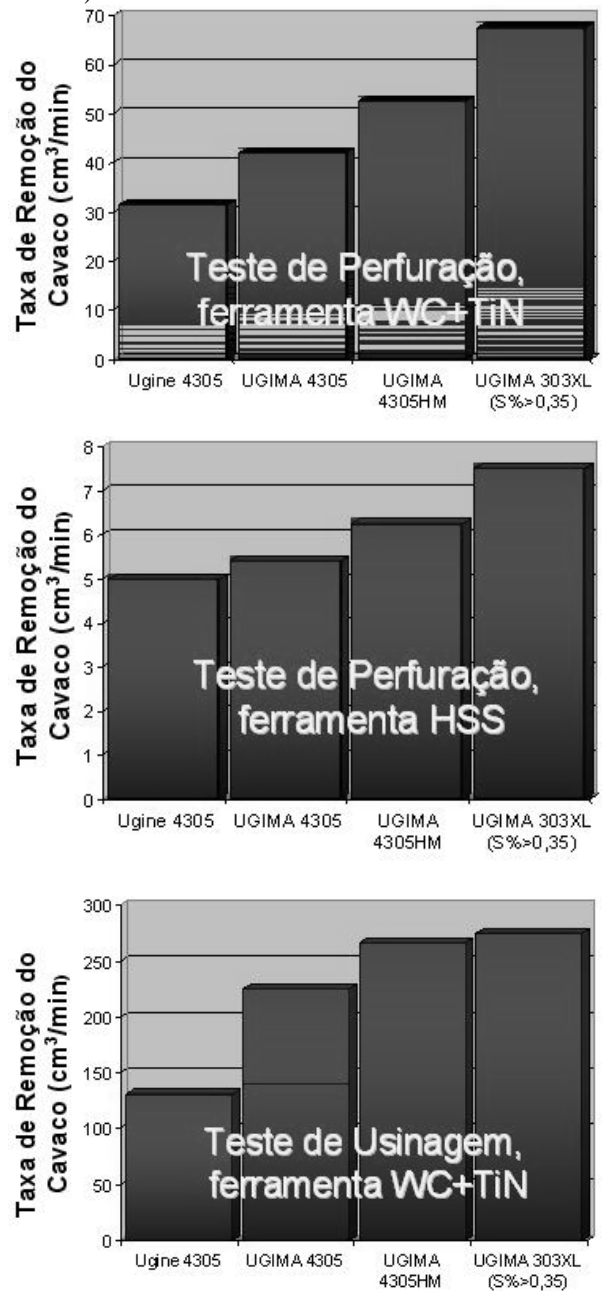
Além disso (certamente uma das melhores vantagens dos óxidos UGIMA®, contrariamente aos MnS), os óxidos UGIMA® não têm nenhum efeito negativo sobre outras propriedades como a laminação à quente, resistência à corrosão e soldabilidade por exemplo.

Sinergia entre os efeitos dos sulfetos e a maleabilidade dos óxidos

Há alguns poucos anos, uma nova família da classe melhorada UGIMA® foi desenvolvida,

a chamada UGIMA® HM (para alta usinabilidade). Essa é focada na sinergia entre sulfetos e óxidos UGIMA® e na usinabilidade. A Figura 8 mostra a evolução na usinabilidade do padrão 4305 até o UGIMA® 4305 HM. Na operação de torneamento, o UGIMA® 4305 HM atinge o nível do 303XL com o seu teor de S mais elevado, graças aos óxidos controlados e à sinergia destes com o MnS.

Figura 8: Evolução da usinabilidade a partir do padrão 4305 (Ugin4305) até a mais nova versão melhorada (UGIMA® 4305 HM) (+ o mais elevado nível de S 303XL).



Conclusões

Muitos fatores metalúrgicos podem afetar a usinabilidade dos aços inoxidáveis. Naturalmente, o limite de resistência à tração do metal à ser usinado é importante. Mas outros fatores como a taxa de encruamento ou sua condutividade térmica possuem uma grande influência sobre a sua usinabilidade. Como estas características físicas são muito diferentes para as classes austenítica, martensítica ou ferrítica, devem ser levadas em conta para entender melhor as diferenças observadas entre as classes de aços inoxidáveis, em termos de usinabilidade e, sobretudo, compreender a razão pela qual problemas como a má fratura do cavaco ou o tempo de vida da ferramenta são frequentemente observadas em aços inoxidáveis. A compreensão dos mecanismos básicos metalúrgicos tem permitido encontrar, nas últimas décadas, melhorias na usinabilidade como o conhecido efeito do enxofre, ou o mais recente controle de óxidos UGIMA®, na sua versão padrão e HM. Este entendimento deve ser mantido e melhorado de modo a se encontrar novas soluções, especialmente para a família de aços inoxidáveis Duplex, para a qual o nível de enxofre tem de ser mantido em um valor mínimo, a fim de se evitar problemas de forjabilidade.

Referências Bibliográficas

¹ Norma – NF ISO 3685, 1993.

² Norma – NF E 66 520-3, 1997.

³ BAYOL J. *et al.* *Usinage des aciers inoxydables : étude du tournage avec outils en carbure de tungstène revêtus*, Machines Production, nr. 562, 1991, p. 21-30.

⁴ BLETTON, O. *et al.* *Stainless Steels With Improved Machinability. Development and Applications*. 4th Days of Machinability and Cutting Technology, 1989, Tekniker, Eibar (Espanha).

⁵ BLETTON, O. *et al.* *Influence of Oxide Nature on the Machinability of 316L Stainless Steels*, 1st International Conference on the Behaviour of Materials in Machining, 1988, Stratford upon Avon, (Inglaterra).