

# SAF 2707 HD® (UNS S32707) – UM AÇO INOXIDÁVEL HIPER-DUPLEX PARA AMBIENTES SEVEROS CONTENDO CLORETOS

Alan Souza<sup>1</sup>, Eduardo Perea<sup>2</sup>, Rodrigo Signorelli<sup>3</sup>

## Abstract

This paper introduces the new hyper-duplex stainless steel SAF 2707 HD.

The general material properties of SAF 2707 HD are presented, including chemical composition, corrosion and mechanical properties.

With a nominal PRE (%Cr + 3.3%Mo+16%N) of 49, the new grade has significantly improved corrosion resistance in chloride solutions compared with currently available super duplex stainless steels (e.g. UNS S32750) and the 6Mo austenitic stainless steels (e.g. UNS S31254).

This makes SAF 2707 HD particularly interesting for use in applications involving hot seawater. Compared with the current super-duplex grades, SAF 2707 HD also extends safe operating conditions in a number of other chloride containing acidic environments, e.g. in critical heat exchangers in oil refineries.

## Resumo

Este artigo introduz o novo aço inoxidável hiper-duplex SAF 2707 HD.

As propriedades gerais do material SAF 2707 HD são apresentadas, incluindo composição química, resistência à corrosão e propriedades mecânicas.

Com um PRE (%Cr + 3.3%Mo + 16%N) nominal de 49, a nova liga tem resistência à corrosão significativamente melhorada em soluções contendo cloretos, comparando com o atual aço inoxidável super duplex (ex. UNS S32750) e os aços inoxidáveis austeníticos 6Mo (ex. UNS S31254).

Isso faz com que o SAF 2707 HD seja particularmente interessante para aplicações envolvendo água de mares tropicais. Comparado com as ligas super duplex, o SAF 2707 HD também estende uma condição segura de operação em vários outros meios ácidos contendo cloretos, por exemplo, trocadores de calor críticos em refinarias.

**Palavras-chave:** inoxidável, duplex, corrosão, SAF 2707 HD

1 Engenheiro Metalurgista – SANDVIK

2 Engenheiro Metalurgista – SANDVIK

3 Engenheiro de Materiais – SANDVIK

## Introdução

Desde a sua introdução há mais de 15 anos, os aços inoxidáveis super-duplex, como os UNS S32750, S32760 e S32520, encontraram diversas aplicações em indústrias como as de óleo e gás, refinarias, químicas e petroquímicas. A popularidade deles é atribuída à combinação atrativa de alta resistência à corrosão, excelentes propriedades mecânicas e também um relativo baixo custo comparado a outros materiais de alta performance, como aços inoxidáveis super-austeníticos e ligas de níquel.

Apesar das inúmeras aplicações para os aços inoxidáveis super-duplex, existem áreas onde a resistência à corrosão destas ligas é insuficiente para uma longa vida útil, onde se fazem necessários materiais de maior custo e com maior resistência à corrosão.

Como um exemplo, durante a última década tem-se discutido muito sobre a resistência à corrosão de diversas ligas duplex em água do mar, e mesmo que o super-duplex não sofra corrosão em água do mar a baixas temperaturas, este apresenta limitações em temperaturas mais elevadas. Por este motivo havia um claro desejo por novas ligas com maior resistência à corrosão do que a disponível nos aços inoxidáveis super-duplex.

Para este fim, o SAF 2707 HD foi desenvolvido. Além da alta resistência à corrosão por cloretos, este também oferece propriedades mecânicas superiores, por exemplo, ao SAF 2507® (UNS S32750). A melhorada resistência à corrosão estende o uso dos aços inoxidáveis duplex em ambientes agressivos contendo cloretos, como em águas do mar tropicais (quentes).

Com os altos custos geralmente associados à manutenção e o desejo de prolongar os períodos entre inspeções, o aumento de confiabilidade é um fator chave para baixar o custo de vida cíclica. Os materiais de construção selecionados devem suportar as variações de condições, que são vivenciadas com frequência. Com este histórico, o desenvolvimento de um material que vai além dos aços inoxidáveis super-duplex tem sido uma etapa natural com o intuito de atingir as demandas atual e futura das indústrias

por materiais econômicos e de alta performance.

## Composição Química e Valores de PRE

O SAF 2707 HD (UNS S32707) tem uma composição bem balanceada, com aproximadamente 50% ferrita e 50% austenita, e é projetado para uso em ambientes ácidos contendo cloretos. A combinação de cromo, nitrogênio e molibdênio aumenta a resistência à corrosão localizada como, por exemplo, corrosão por pite ou por fresta. Em materiais duplex é importante que o valor individual de PRE das duas fases, ferrita e austenita, sejam similares, para então prevenir o início de uma corrosão na fase mais fraca. No SAF 2707 HD, o PRE nominal é 49, onde  $PRE = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$  (%peso). O valor individual de PRE em cada fase é balanceado dentro de uma unidade de PRE, em média. Os elementos contidos também são balanceados para proporcionar maior resistência ao impacto (tenacidade) e menor risco de formação de fases frágeis durante o recozimento.

As composições químicas do SAF 2707 HD e do SAF 2507 são dadas na tabela 1.

**Tabela 1. Composição química nominal dos dois aços inoxidáveis duplex de alta liga, %peso.**

Liga Sandvik	UNS	C max	Cr	Ni	Mo	N	PRE* nominal
SAF 2507	S32750	0,03	25	7	4	0,3	42
SAF 2707 HD	S32707	0,03	27	6,5	5	0,4	49

\* PRE = Equivalente de resistência ao Pite (sigla do inglês: Pitting Resistance Equivalent) =  $\%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$

## Corrosão Localizada

Em águas contendo cloretos sob condições oxidantes, corrosão por pite ou fresta são os meios de falha mais comuns em aços inoxidáveis. Aços inoxidáveis duplex modernos, como o SAF 2507, foram explicitamente desenvolvidos para ter alta resistência à corrosão por pite e fresta. Toda a experiência adquirida por esta liga foi utilizada no desenvolvimento do SAF 2707 HD.

Em uma versão modificada da ASTM G48A, corpos de prova para ensaios foram expostos por períodos de 24 horas em 6% FeCl<sub>3</sub>. Quando pites são detectados com uma perda de peso substancial (>5mg), o ensaio é interrompido. Caso contrário, a temperatura é aumentada em 5°C e o ensaio prossegue. A temperatura crítica de pite do SAF 2707 HD foi definida por este ensaio como 97,5°C, comparada com aproximadamente 80°C do SAF 2507.

Testes para corrosão por fresta foram realizados em 6% FeCl<sub>3</sub>, com uma fresta especificada pelo procedimento MTI-2, onde frestas artificiais foram montadas na amostra com um torque de 0,28 Nm. Também, neste caso, houve aumento significativo da temperatura crítica de fresta. Os resultados obtidos, comparados com o SAF 2507 (UNS S32750), são dados na Figura 1.

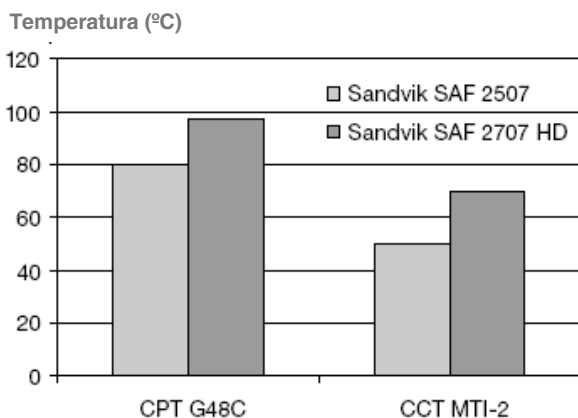


Fig.1: Temperatura Crítica de Pite (CPT) no G-48A modificado e Temperatura Crítica de Fresta (CCT) obtida no ensaio MTI-2

Temperaturas críticas de pite também podem ser medidas em testes potencioestáticos. A Figura 2 mostra a temperatura crítica de pite em função da concentração de cloreto de sódio, variando de 3 a 25%, e do pH. O potencial aplicado durante o ensaio foi de 600mV, SCE, que é aproximadamente o mesmo potencial redox usado no ensaio G-48A. Este alto potencial geralmente não é encontrado em meios contendo cloretos. A temperatura possível de aplicação em meios contendo cloretos de menor potencial redox, como por exemplo, fluidos de processos em refinarias ou água do mar natural desclorinada é, portanto, tipicamente muito maior.

Em particular, em soluções com baixo pH e alta concentração de cloretos, o SAF 2707 HD apresenta uma resistência superior ao SAF 2507 e as ligas austeníticas 6Mo+N.

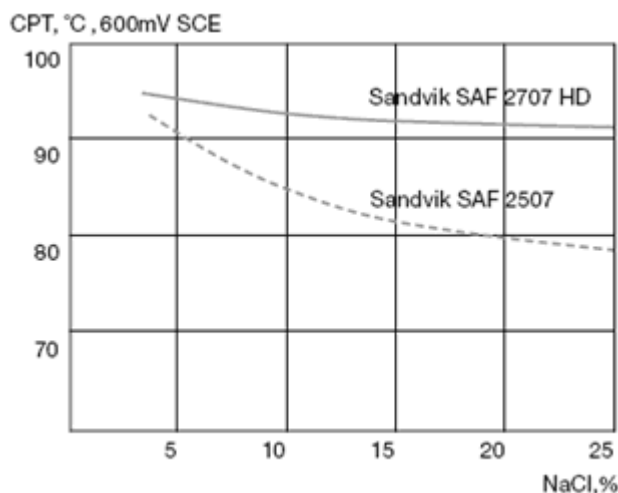


Fig. 2: Temperaturas críticas de pite em função da concentração de cloreto de sódio, variando entre 3 e 25% (determinação potencioestática a +600mV SCE com superfície lixada com lixa de granulacão 220).

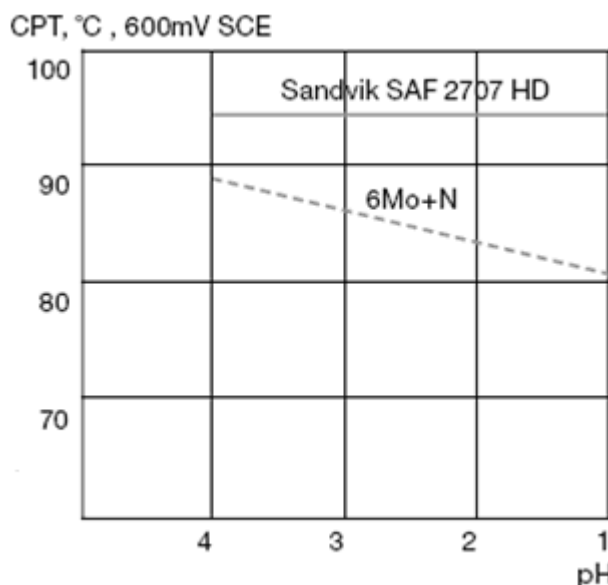


Fig. 3: Temperaturas críticas de pite (CPT) em 3%NaCl com variação de pH (determinação potencioestática a +600mV SCE com superfície lixada com lixa de granulacão 220)

A alta resistência à corrosão em soluções ácidas, de baixo pH, contendo cloretos é também demonstrada pelos resultados obtidos na solução de ensaio tipo “Green Death” (1%FeCl<sub>3</sub> + 1%CuCl<sub>2</sub> + 11%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1,2%HCl). A Tabela 2 mostra que neste ambiente a temperatura crítica

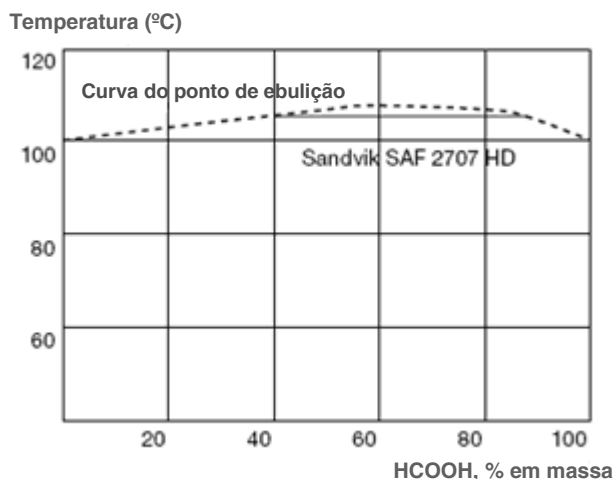
de pite se eleva em 25°C, comparado com o SAF 2507.

**Tabela 2: Temperatura crítica de pite (CPT) determinada em “Green Death”**

Liga	CPT (°C)
Sandvik SAF 2507	97,5
Sandvik SAF 2707 HD	72,5
6Mo + N	70

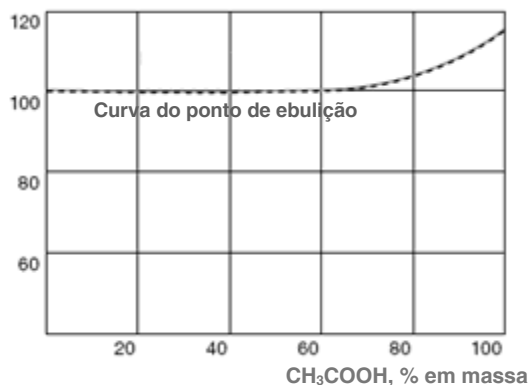
## Corrosão Generalizada

A corrosão generalizada pode limitar a vida útil de um componente em aço inoxidável em contato com uma solução de processo. O SAF 2707 HD é altamente resistente a ácidos orgânicos como, por exemplo, ácido fórmico e ácido acético, como é apresentado os diagramas de isocorrosão nas figuras 4 e 5. Este também se mantém resistente em ácidos contaminados. Portanto, a liga é uma alternativa competitiva a aços inoxidáveis austeníticos de alta liga e ligas de níquel, em aplicações onde os aços inoxidáveis austeníticos comuns sofrem corrosão a altas taxas.



*Fig. 4: Diagrama de isocorrosão de ácido fórmico naturalmente aerado. A curva representa uma taxa de corrosão de 0,1mm/ano (4mpy) numa solução de ensaio estagnada.*

Temperatura (°C)



*Fig. 5: Diagrama de isocorrosão de ácido acético naturalmente aerado. A curva representa uma taxa de corrosão de 0,1mm/ano (4mpy) numa solução de ensaio estagnada.*

A taxa de corrosão do SAF 2707 HD em ácido fórmico a 105°C e nos pontos de orvalho foi comparada com a liga de níquel C-276 (UNS N10276) em uma variação completa de concentrações. Os resultados mostraram que a 105°C o SAF 2707 HD apresentou uma taxa de corrosão consideravelmente menor que o C-276 para todas as concentrações. Para condições nos pontos de orvalho, a taxa de corrosão do SAF 2707 HD foi menor para concentrações de até 50% de ácido fórmico, enquanto o C-276 teve melhor performance para concentrações superiores.

## Corrosão Sob Tensão Fraturante

Corrosão sob tensão fraturante é provavelmente a forma de corrosão mais séria encontrada em processos industriais, pois esta pode provocar a falha rápida do material. Aços inoxidáveis austeníticos comuns podem sofrer trincas até sob concentrações muito baixas de cloretos. O risco de corrosão sob tensão pode ser eliminado pelo uso de materiais mais resistentes, como ligas de alto níquel ou aços inoxidáveis duplex. Enquanto os austeníticos em muitos casos se tornam resistentes em teores de níquel acima de 25%, os duplex obtêm resistência semelhante ou até maior em teores muito menores de elementos de liga, devido a sua microestrutura bifásica. A resistência à corrosão sob tensão do SAF 2707HD é mostrada na figura 6. Um ensaio de corrosão sob tensão em autoclave foi conduzido com amostras tensionadas até seu limite de escoamento. A pressão aplicada foi de

aproximadamente 100bar e teor de oxigênio de 8ppm. Solução de NaCl foi bombeada constantemente dentro da câmara e a duração do ensaio foi de 1000 horas (6 semanas). Não houve indícios de corrosão sob tensão fraturante em até 1000ppm Cl<sup>-</sup>/300°C e 10000ppm Cl<sup>-</sup>/250°C.

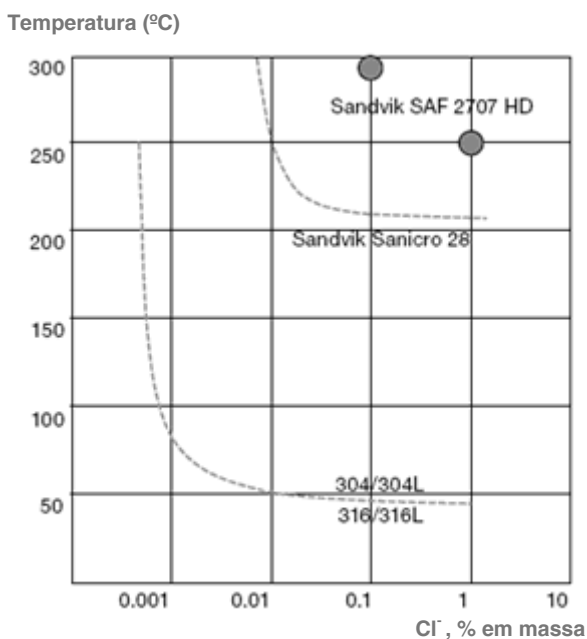


Fig.6: Resistência a corrosão sob tensão fraturante em solução neutra de cloretos contendo oxigênio (aprox. 8ppm). Tempo de ensaio 1000 horas. Tensão aplicada igual ao limite de escoamento a temperatura de ensaio. Sanicro 28 = UNS N08028

## Propriedades Mecânicas

O SAF 2707 HD foi projetado para possuir alta resistência mecânica. A estrutura duplex gera um limite de escoamento aproximadamente duas vezes maior que o dos aços inoxidáveis austeníticos, com a correspondente resistência à corrosão por pite. A mais elevada resistência mecânica dos materiais duplex pode, em muitos casos, admitir uma redução de espessura do material, diminuindo o peso e o custo total da instalação. Apesar de sua alta resistência, a ductilidade se mantém elevada e, portanto, os métodos comuns de fabricação, como dobramento e expansão, podem ser realizados da mesma forma que com aços austeníticos.

Os valores típicos de resistência ao escoamento e limite de resistência são  $R_{p0,2}$  800 MPa e 1000 MPa, respectivamente. O valor do alongamento se apresenta acima de 25% no estado recozido. Quando o metal é exposto a altas temperaturas, os efeitos do endurecimento por solução e por deformação diminuem, pois a difusividade dos átomos (substitucionais e intersticiais) se eleva, e a densidade de discordâncias diminui, devido à alta velocidade de deslocamento das discordâncias. A figura 7 mostra o limite de escoamento  $R_{p0,2}$  e a figura 8 mostra o limite de resistência à tração  $R_m$ , medidos em tubos de trocador de calor com espessura máxima de 4 mm e em temperaturas variando de 20 a 300°C. O limite de escoamento e o limite de resistência à tração são elevados em toda faixa de temperatura até 300°C.

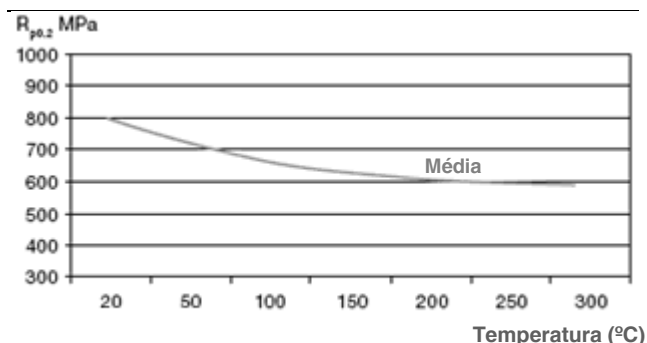


Fig.7: Limite de Escoamento  $R_{p0,2}$  do SAF 2707 HD.

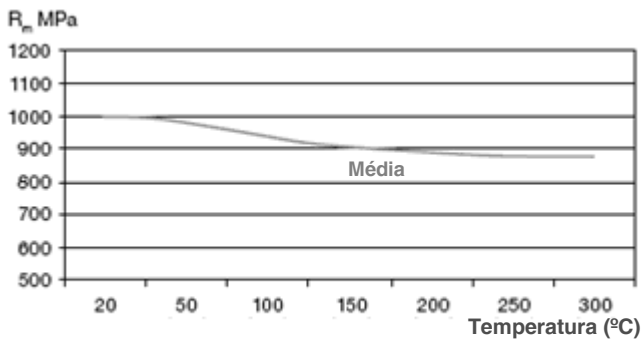


Fig.8: Limite de resistência à tração  $R_m$  do SAF 2707 HD.

### Resistência ao Impacto

Os aços inoxidáveis duplex podem ser utilizados em uma faixa de temperaturas que varia aproximadamente entre  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , com algumas diferenças em limites de projetos, diferentes ligas e padrões. A razão pelo baixo limite é o fato de que os duplex, assim como outros materiais com matriz ferrítica, sofrem fragilização a temperaturas mais baixas. O limite superior também é dado pela fragilização, onde a fase ferrítica passa por transformações com o tempo. Este fenômeno é conhecido como fragilização dos  $475^{\circ}\text{C}$ , porque a taxa de decomposição da ferrita geralmente é maior nesta temperatura. O SAF 2707 HD possui boa resistência ao impacto e sua temperatura de transição dúctil-frágil é menor que  $-50^{\circ}\text{C}$ . A figura 10 mostra a energia de impacto (KCV) numa faixa de temperaturas entre  $-200^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ . As amostras foram tiradas nas direções longitudinais e transversais de um tubo extrudado a quente e solubilizado, de dimensões  $200 \times 13\text{mm}$ .

Energia de impacto, KCV, J

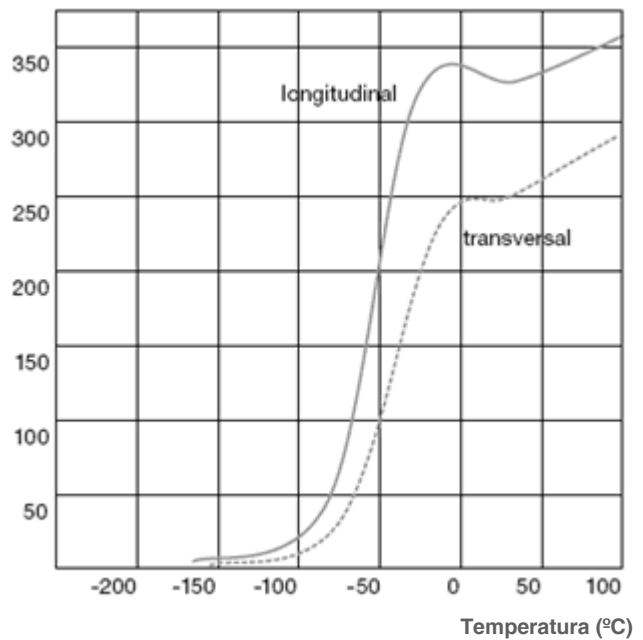


Fig.9: Curva de energia de impacto para o SAF 2707 HD usando amostras padrão para ensaio Charpy V ( $10 \times 10\text{mm}$ ).

### Conclusões

O SAF 2707 HD possui excelente resistência à corrosão por pite e fresta em ambientes contendo cloretos, assim como resistência à corrosão sob tensão fraturante induzida por cloretos. O SAF 2707 HD também possui ótimos resultados quanto à corrosão generalizada em ácidos orgânicos.

As propriedades mecânicas do SAF 2707 HD são boas. O alto limite de escoamento permite vantagens de projeto e custo, comparado com outros materiais de alta performance.

- A soldabilidade do material SAF 2707 HD é boa.
- O excelente desempenho contra corrosão do SAF 2707 HD tem sido verificado em um grande número de trocadores de calor em instalações de plantas de processamento.

## Referências bibliográficas

---

1. Datasheet – Sandvik SAF 2707 HD (S-1877)
2. NICHOLLS, J.M. AB Sandvik Steel, **Duplex Stainless Steels for Demanding Applications**. Paper presented on the 12<sup>th</sup> International Corrosion Congress in Houston, Texas, March 1<sup>st</sup>, 1993
3. RUGGLES T. J., **Metallurgy and Equipment Upgrades to Process Opportunity Crudes**, AIChE Conference, April 2006

**Autor:** Alan Couri Alves de Souza  
**Empresa:** Sandvik Materials Technology  
**Endereço Residencial:** Rua Bela Vista, 295 ap 11 —São Bernardo do Campo/SP  
**Endereço Comercial:** Av. das Nações Unidas, 21732 —São Paulo/SP  
**Email:** [alan.souza@sandvik.com](mailto:alan.souza@sandvik.com)  
**Telefone Residencial:** (11) 4122.2102  
**Telefone Comercial:** (11) 5696.5454  
**Celular:** (11) 8690.6460