

EFEITO DA USINAGEM NA ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SUPERAUSTENÍTICO ASTM A351 CN3MN

Márcio Tadeu Gravalos ¹, Marcelo Martins ¹, Anselmo Eduardo Diniz ², Paulo Roberto Mei ²

¹ Sulzer Brasil S.A., Jundiaí, SP, marcio.gravalos@sulzer.com, marcelo.martins@sulzer.com

² Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, Campinas, SP, pmei@fem.unicamp.br

ABSTRACT

The super austenitic stainless steels are denominated like this because they present good resistance to corrosion by pitting and, also, offer excellent mechanical properties, what makes them one of the options for the production of components used by petroleum industry. However, the superficial work hardening during the machining processes can change these properties. This paper aimed at investigating the effects of the turning operation in the surface of the super austenitic steel ASTM A351 CN3MN. Samples of the casting steel suffered a wear by cylindrical turning, with different cutting speeds, using indexable carbides inserts with varied geometries. The analysis of the microstructure on casting surface was accomplished by optical microscopy and the work hardened surface was determined through micro-hardness. The mechanical properties of the steel were determined by traction assay. The wear in the cutting inserts was accomplished in a MEV.

RESUMO

Os aços inoxidáveis superaustenítico são assim denominados pois, além de apresentarem boa resistência à corrosão por pite, reúnem também excelentes propriedades mecânicas, o que os tornam uma das opções para a fabricação de componentes utilizados pela indústria petrolífera. Entretanto, o encruamento superficial durante os processos de usinagem pode alterar estas propriedades. Este trabalho teve por objetivo investigar os efeitos da operação de torneamento na superfície do aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN. Amostras do aço fundido sofreram um desgaste por torneamento cilíndrico, com distintas velocidades de corte, utilizando-se de pastilhas de metal duro com geometrias variadas. A análise da microestrutura na superfície fundida foi realizada por microscopia óptica e a superfície encruada foi determinada através da microdureza. As propriedades mecânicas do aço foram determinadas por ensaio de tração. O desgaste nas pastilhas de corte foi observado em um MEV.

Palavras chaves: aço inoxidável superaustenítico ASTM A351 CN3MN, usinagem, torneamento, encruamento.

1 - INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis superaustenítico são assim denominados porque possuem uma elevada resistência à corrosão por pite quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos convencionais. Além desta característica reúnem, também, excelentes propriedades mecânicas, tornando-os uma das opções na fabricação dos componentes utilizados em equipamentos da indústria petrolífera. A usinagem é um processo bastante utilizado na fabricação destes componentes.

Existem muitas publicações sobre a usinagem de aços inoxidáveis austeníticos convencionais, porém poucas sobre a usinagem dos aços inoxidáveis superausteníticos, o que motivou este estudo.

Os aços inoxidáveis austeníticos convencionais apresentam uma grande dificuldade para serem usinados devido à baixa condutividade térmica, o alto coeficiente de atrito e o alto coeficiente de dilatação térmica [03]. Durante o processo de usinagem desses aços ocorre um aumento da temperatura na interface ferramenta-peça que está relacionado com o aumento da velocidade de corte [12]; o atrito entre a ferramenta e o material gera elevadas forças de corte que também contribui para o aumento da temperatura. O aumento da temperatura e a baixa condutividade térmica, uma das características dos aços inoxidáveis austenítico, favorecem o aquecimento da superfície do material da peça para a formação do encruamento superficial [08].

O encruamento superficial significa um aumento considerável na dureza superficial quando a estrutura do material é deformada durante o processo de usinagem [09]. O nitrogênio facilita o encruamento da fase austenítica [03] e analisando-se a composição química de um aço superaustenítico observa-se que a quantidade deste elemento é, aproximadamente, 4 vezes maior que num aço austenítico convencional. Para minimizar o encruamento durante a usinagem sugere-se a utilização de ferramentas com ângulo de saída positivo [07] e indica-se a utilização de ferramentas com cobertura de TiN (nitreto de titânio) para diminuir o atrito ferramenta-peça [11].

Este trabalho, além de investigar o encruamento superficial no aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN, um dos efeitos causado pelo processo de usinagem, tem também como objetivo o de investigar se o encruamento tem uma correlação com as diferentes condições de usinagem aplicadas. Os testes foram realizados através da operação de torneamento em desbaste com variações na velocidade de corte e no ângulo de saída da ferramenta. Além de abordar a caracterização das superfícies usinadas através de ensaios de microdureza e de tração, foi abordado também a caracterização do desgaste e avarias nas ferramentas de corte utilizadas, através da análise por microscopia eletrônica de varredura. Diminuir o consumo de ferramentas, através do aumento da vida útil da mesma, e aumentar a produtividade, através de maiores taxas de remoção de material por unidade de tempo, sem, contudo, causar efeitos indesejáveis nas propriedades do material usinado, significa reduzir os custos de fabricação dos componentes.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras cilíndricas do aço inoxidável superaustenítico ASTM A351 CN3MN, com 95 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, fundidas pelo processo estático (Figura 01). Na Tabela 01 encontram-se a composição química do aço utilizado e seu PREN (*Pitting Resistance Equivalent*), valor que determina a resistência à corrosão por pite [01], calculado através da equação: $PREN = Cr\% + 3,3Mo\% + 16N\%$

Tabela 01 - Valores da composição química (% em peso) e do PREN.

ELEMENTO	Si	C	Mo	Cr	Si	Ni	P	Mn	Cu	N	PREN
AMOSTRA	0,74	0,015	6,25	20,79	0,008	24,65	0,021	0,63	0,33	0,2	44,6
NORMA	1 Máx.	0,03 Máx.	6,0 a 7,0	20 a 22	0,01 Máx.	23,5 a 25,5	0,04 Máx.	2 Máx.	0,75 Máx.	0,18 a 0,26	≥ 40

A zona da camada coquilhada proveniente do processo de fundição foi analisada através de um microscópio ótico Leitz Laborlux 12MES – Leica. A espessura da camada coquilhada foi caracterizada pela presença de vazios, como pode ser observado na Figura 02, apresentando uma espessura na faixa de 250 a 300 μm .

Com o objetivo de evitar a interferência desta camada coquilhada nas investigações das propriedades superficiais e na caracterização dos desgastes e avarias nas superfícies das pastilhas de corte utilizadas, a camada coquilhada foi removida através de uma operação de usinagem prévia, onde foram retirados os primeiros 500 μm de camada externa das amostras fundidas. Antes dos ensaios as amostras ficaram cilíndricas com um diâmetro de 85mm, conforme podemos observar através da figura 01.



Figura 01 – Amostra fundida com e sem a camada coquilhada



Figura 02 – camada coquilhada.

Para realização da usinagem foi utilizado um torno CNC Monarch 35TC1 de 30 kW de potência, rotação máxima de 2200 rpm e com diâmetro máximo de passagem de 440 mm. Para investigar a influência do ângulo de saída (γ) no encruamento superficial foram utilizados duas diferentes ferramentas de corte, compostas de porta ferramenta + inserto intercambiável:

- Um porta-ferramenta padrão ISO PCLNR 2525 M1, com ângulo de folga (α) de 6° e ângulo de posição (χ_r) de 95° ;
- Dois tipos de insertos de metal duro intercambiáveis com diferentes valores dos ângulos de saída: com $+10^\circ$ e $+4^\circ$, padrão ISO CNMG 120412, com tripla cobertura composta de $\text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$, comprimento da aresta de corte de 12 mm, espessura de 4 mm e raio da ponta de 1,2 mm.

Como resultado os ângulos de saída em cada um dos conjuntos porta ferramenta + inserto montado eram, respectivamente, $+4^\circ$ (positivo) e -3° (negativo).

As amostras foram submetidas à mesma operação de usinagem: torneamento em desbaste. Os parâmetros de corte foram fixados com uma única profundidade de corte (a_p) = 2,5 mm e um único avanço (f) = 0,25 mm/rotação. Para investigar o efeito da velocidade de corte (V_c) no encruamento superficial foram utilizados dois valores distintos de velocidade: 60 m/min e 90 m/min.

O comprimento de corte em cada passada foi fixado em 140 mm. Ao final de cada passe os insertos eram retirados para avaliação e medição dos desgastes de flanco (VB) em um microscópio ótico. Como critério de fim de vida útil foi adotado o valor de desgaste de flanco (VB) máximo de 0,8 mm ou avarias, como lascamentos, o que ocorresse primeiro durante os ensaios.

A tabela 02 resume as três condições de usinagem aplicadas durante os ensaios:

Tabela 02 – Parâmetros empregados na usinagem das amostras.

Código	Ângulo de saída (γ_0) (graus)	Velocidade de corte (Vc) (m/min)	Profundidade de corte (ap) (mm)	Avanço (f) (mm/rotação)	Comprimento de corte (l) por passada (mm)
VC60 γ_0+	+ 4	60	2,5	0,25	140
VC60 γ_0-	- 2	60	2,5	0,25	140
VC90 γ_0+	+ 4	90	2,5	0,25	140

A usinagem em cada amostra limitava-se a 6 passadas. Ao atingir o diâmetro de 55 mm as amostras eram retiradas do torno e um disco de espessura de 15 mm era extraído da cada amostra para caracterização da superfície usinada. Para cada condição de usinagem foram realizados ensaios de microdureza nas secções transversais às superfícies usinadas, conforme figura 03, em 2 amostras de cada. O perfil de dureza possibilitou identificar a dimensão da camada endurecida durante a usinagem. Para obtenção do perfil de dureza foram realizadas medidas em diferentes pontos a partir da superfície usinada em direção ao centro. As medidas de dureza Vickers (HV) foram realizadas utilizando-se uma carga de 100gf.

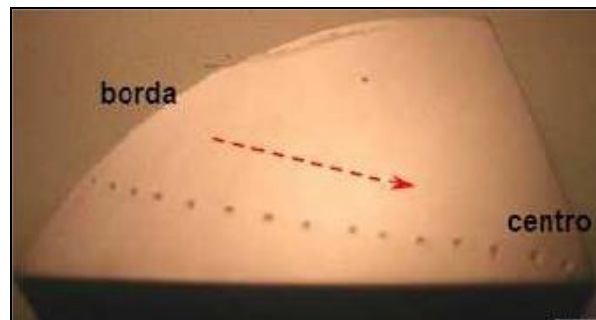


Figura 03 – Sentido de medição da dureza.

Com o objetivo de investigar se o encruamento superficial tem influência nos valores de propriedades mecânicas, obtidos através do ensaio de tração, foram confeccionados 2 corpos de prova de cada condição de usinagem, de acordo com padrão DIN 50125 forma C, os quais foram usinados nas mesmas condições estabelecidas na tabela 02. Os ensaios foram realizados numa Máquina de Tração Universal marca Tinus Olsen Super L com capacidade para 30 ton.. e os valores encontrados foram comparados com os valores estabelecidos pela norma ASTM A 351 grau CN3MN.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Análise de dureza

Nas regiões próximas da superfície usinada, todas as amostras atingiram uma dureza média máxima da ordem de 350 HV, um valor 1,8 vez maior quando comparado com a dureza medida na região do substrato. Nota-se também que os valores de dureza estão decrescendo na medida que se distância da superfície, evidenciando que a usinagem provocou um encruamento nas amostras numa profundidade de até 350 μm , a partir da superfície usinada. A severidade do encruamento superficial pode ser estimada através da fórmula de Saoubi [10]:

$$\Delta\text{HVmáx.} / \text{HVmáx.} = (\text{HVmax.} - \text{HVinicial}) / \text{HVmáx.}$$

Utilizando-se os valores médios da figura 05, obtém-se, então, uma severidade do encruamento de 0,45.

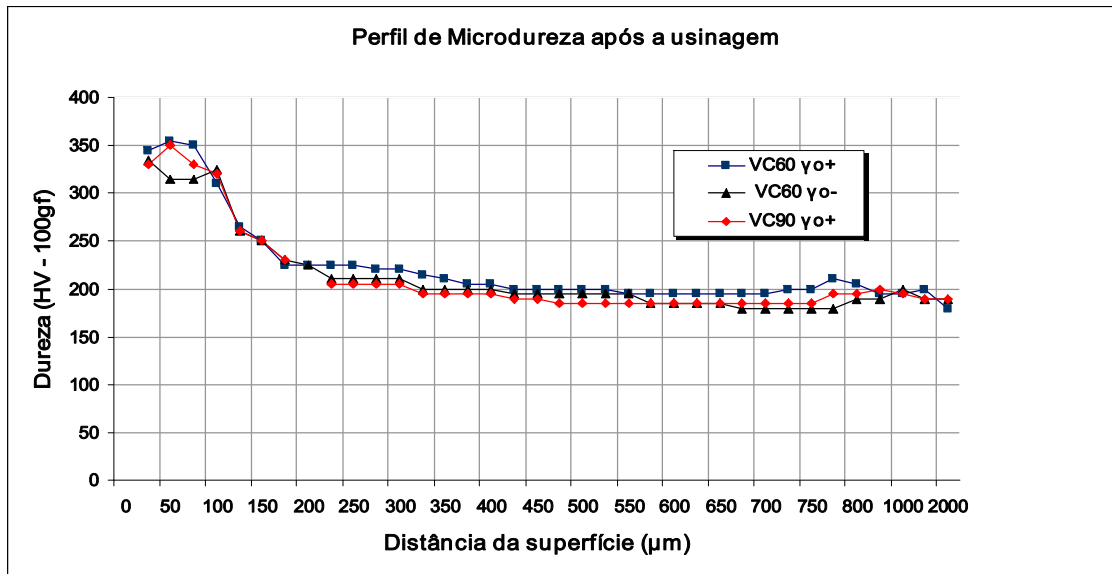


Figura 04 – Perfil de dureza das superfícies usinadas.

Tabela 03 – Valores da dureza média e do desvio padrão em função da distância da superfície

Variável	Distância (µm)	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450
VC60 γo+	Dureza média	345	355	350	310	265	250	225	225	225	225	220	220	215	210	205	205	200	200
	Desvio padrão	10,6	3,5	7,1	10,6	7,1	24,7	10,6	17,7	21,2	19,8	17,7	17,7	16,3	7,1	3,5	3,5	0,0	0,0
VC60 γo-	Dureza média	335	315	315	325	260	250	230	225	210	210	210	210	200	200	200	200	195	195
	Desvio padrão	3,5	17,7	17,7	10,6	3,5	3,5	3,5	3,5	7,1	3,5	0,0	0,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	1,4
VC90 γo+	Dureza média	330	350	330	320	260	250	230	220	205	205	205	205	195	195	195	195	190	190
	Desvio padrão	17,7	35,4	7,1	46,0	42,4	28,3	10,6	7,1	14,1	10,6	8,5	7,1	5,7	3,5	1,4	7,1	8,5	10,6

Variável	Distância (µm)	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800	900	1000	1500	2000
VC60 γo+	Dureza média	200	200	200	195	195	195	195	195	195	195	200	200	210	205	195	195	200	180
	Desvio padrão	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	7,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	17,7	7,1	3,5	7,1	10,6
VC60 γo-	Dureza média	195	195	195	195	185	185	185	185	180	180	180	180	180	190	190	200	190	190
	Desvio padrão	3,5	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	0,0	3,5	3,5	3,5
VC90 γo+	Dureza média	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	195	195	200	195	190	190
	Desvio padrão	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	5,7	0,0	2,1	2,1	7,1	3,5	14,1	0,0

3.2 - Análise das propriedades mecânicas

A tabela 04 compara os valores médio obtidos de propriedades mecânicas com os especificados pela norma ASTM A 351, grau CN3MN [01]. Os valores de Limite de Resistência (LR) e de Limite de Escoamento (LE) encontrado para todas as amostras estão de acordo com valores especificado pela norma, enquanto que os de Alongamento (Al) encontram-se abaixo do valor especificado.

Tabela 04 – Valores médio e desvio padrão obtidos no ensaio de tração.

Variáveis	LR (MPa)	Desvio padrão	LE (MPa)	Desvio padrão	Al (%)	Desvio padrão
Norma (mínimo)	550		260		35	
VC60 γ_0+	588	15	318	4	31	2
VC60 γ_0-	559	9	323	4	27	2
VC90 γ_0+	581	13	308	6	35	1

3.3 - Análise dos desgastes e avarias nas ferramentas de corte

3.3.1 - Aresta de corte

Na figura 05 pode-se notar que a ferramenta com ângulo de saída positivo apresentou um desgaste de flanco menor que a ferramenta com ângulo de saída negativo, utilizando-se a mesma velocidade de corte de (60 m/min) e dentro do mesmo critério de fim de vida útil da aresta pré-estabelecido de $VB_{\text{máx}} = 0,8$ mm. Verificou-se também uma pequena redução do desgaste das ferramentas com ângulo de saída positivo quando a velocidade de corte foi elevada de 60 para 90 m/min (Figuras 05 e 06).

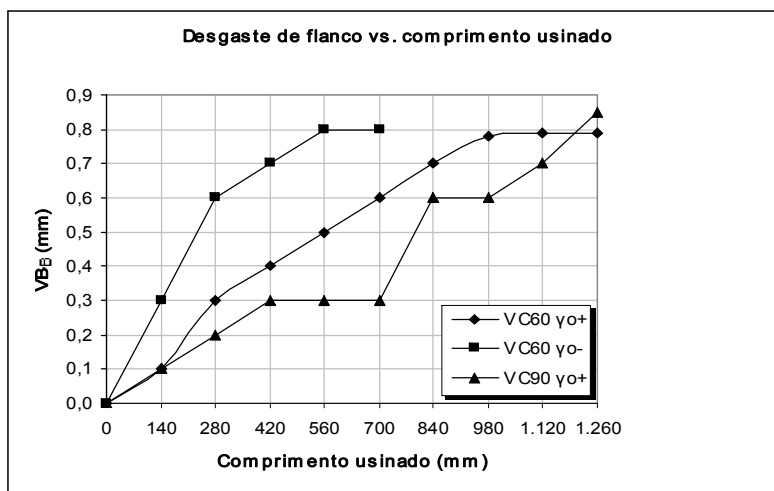


Figura 05 – Desgaste das três ferramentas utilizadas na usinagem.

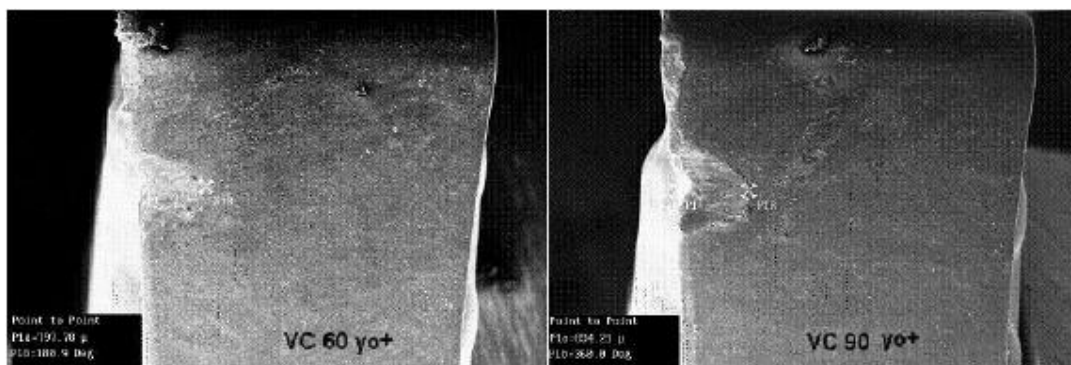


Figura 06 – Desgaste de flanco nas ferramentas com ângulo de saída positivo.

A ferramenta de corte com ângulo de saída positivo apresentou um resultado melhor quanto à vida útil. Por outro lado, observa-se na figura 04 que os perfis de dureza obtidos na camada encruada foram bastante semelhantes, indicando que os ângulos de saídas, negativo ou positivo, não contribuíram para minimizar a formação da superfície encruada.

3.3.2 - Aresta de saída

A figura 07 apresenta a face da aresta de saída das ferramentas utilizadas na usinagem. As regiões mais claras da figura 07 mostram a presença de partículas do aço aderidas na aresta de saída da ferramenta. A análise destas áreas claras (figura 08) identificou a presença de elementos químicos como; cromo, níquel, molibdênio e silício, que fazem parte da composição do aço inoxidável superaustenítico, mas que não fazem parte da ferramenta de metal duro, que contém como elemento principal o carboneto de tungstênio (WC), com triplo revestimento composto de $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$, confirmando a adesão de partículas do aço na aresta de saída da ferramenta. A aderência de partículas do material usinado na superfície de saída da ferramenta corresponde ao desgaste por difusão que ocorre durante a usinagem em elevadas temperaturas em materiais com baixas propriedades térmicas [12].

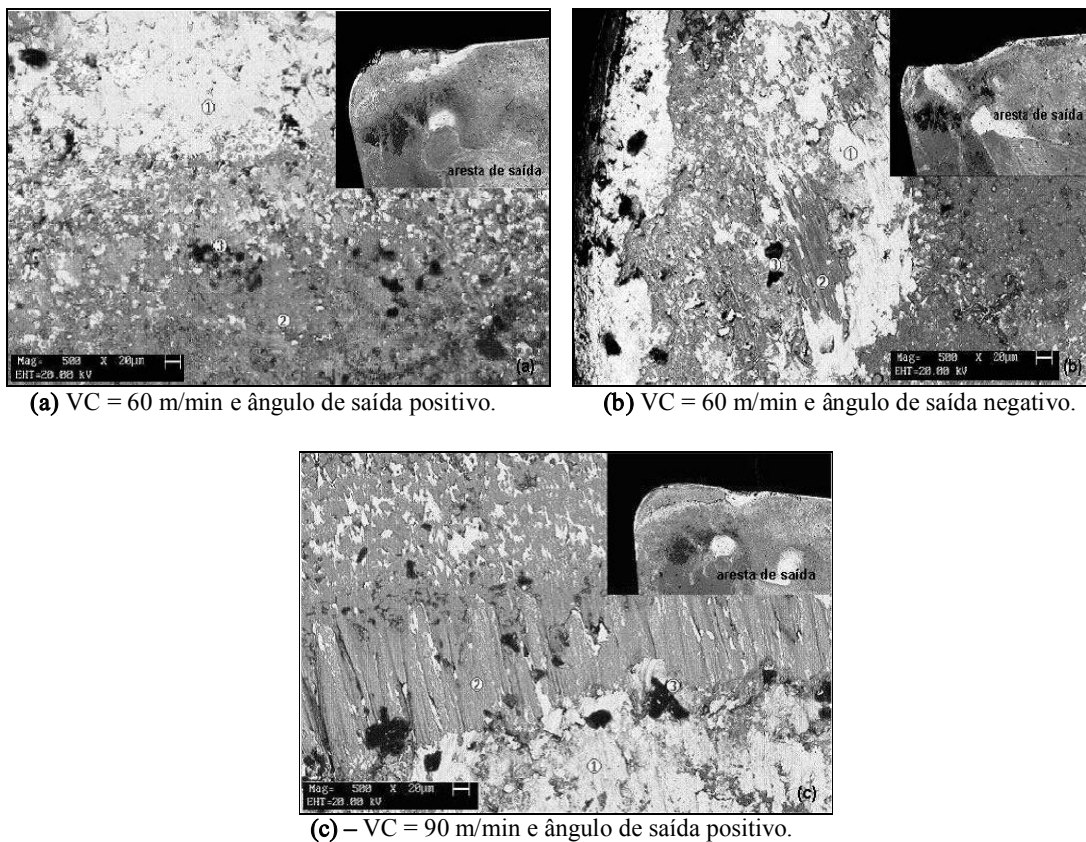


Figura 07 – Seção da superfície de saída com difusão das partículas do aço superaustenítico (MEV).

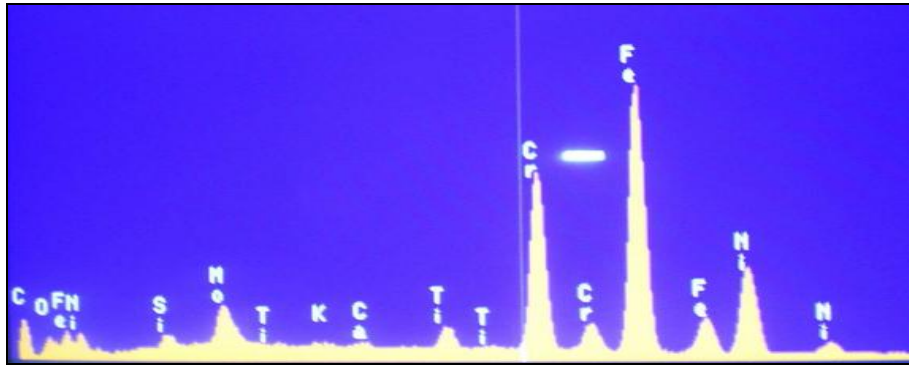


Figura 08 – Análise qualitativa dos elementos na superfície de saída (MEV-EDS)

4 - CONCLUSÕES

Para um aço inoxidável superaustenítico ASTM A351 CN3MN, usinado com velocidade de corte (V_c) de 60 ou 90 m/min, utilizando-se pastilhas de metal duro, padrão ISO CNMG 120412, com tripla cobertura [Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN] e ângulos de saída do conjunto (porta ferramenta e inserto) de + 4° e - 3°, conclui-se que:

- 1 - A usinagem provocou o encruamento do aço, elevando sua dureza superficial de 200 para 350 HV. A região encruada atingiu uma profundidade de até 350 μ m, a partir da superfície usinada.
- 2 - A presença das partículas do aço inoxidável superaustenítico aderidas na superfície de saída da ferramenta de corte indicam que o corte ocorreu em altas temperaturas.
- 3 - Os diferentes ângulos de saída das ferramentas utilizadas, um positivo e outro negativo, provocaram igual elevação na dureza superficial. Por outro lado, os valores de desgastes de flanco, medidos ao longo da usinagem, indicaram que o ângulo de saída positivo contribuiu para o aumento da vida útil da ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ASTM A 351/351M-03, Standard Specification for Casting, Austenitic, Austenitic-Ferritic (Duplex), for Pressure-Containing Parts, p.137-141, 2004.
- [02] BLAZINSKY, T.Z., Materials at high strains rate, *Elsevier Science Magazine*, Amsterdam, 1992.
- [03] LACK, E; BOHMANN, A.; SCHARF, M.; WERNER, E., *Adv. Eng. Materials*, 2^a ed., p.750-752, 2000.
- [04] DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L., *Tecnologia da Usinagem dos Metais*, 4^a ed., Editora Artliber, São Paulo, 2003.

- [05] JIANG,L.; ROOS, A.; LIU, P., The influence of austenite grain size and its distribution on chip deformation and tool life during machining of AISI 304L, *Journal of Metallurgical and Materials Transactions A*, v.28A, n° 11, p.2415,1997.
- [06] NASH, W.A., *Resistência dos Materiais*, 2ª ed., Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1982.
- [07] NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, *Machining Nickel Alloys*, 1998.
- [08] OUTUKUMPU, *Steel Stainless Properties-Work-Hardening*, P.5763, 2005.
- [09] ROSE, S., Work hardening-a material kind of problem, *Tooling and Production Magazine*, Ohio, 1999.
- [10] SAOUBI, R.M'; CHANDRASEKARAN, H., Role of phase and grain size on chip formation and material work hardening during machining of single and dual phase steels, *Journal Ironmaking and Steelmaking of Institute of Materials, Minerals and Mining*, v.37, n° 3, p.258-264,2004.
- [11] SHAW, M.C., *Metal cutting principles*, 2ª ed., Oxford University Press, New York, USA, 2005.
- [12] TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K., *Metal Cutting*, 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.