

ESTUDO DO DESGASTE DE PUNÇÕES DE METAL-DURO UTILIZADOS NO CORTE DE CHAPAS PARA FABRICAÇÃO DE ROTORES E ESTADORES DE MOTORES ELÉTRICOS ¹

André Paulo Tschiptschin²
Fernando José Gomes Landgraf³
Ellen Regina Giroto⁴

Resumo

Punções de metal duro, utilizados em operações de corte de chapas de aço baixo carbono para fins elétricos (rotores e estadores), têm apresentado desgaste excessivo, demandando afiamento após um pequeno número de operações de corte. Foram feitas análises microestruturais, de composição química e da superfície desgastada das ferramentas, visando identificar os mecanismos responsáveis pelo desgaste acentuado das mesmas. Para tanto foram utilizadas as técnicas de microscopia eletrônica de varredura e espectrometria por dispersão de energia de raios-X (EDS) para análise química localizada. Alguns punções apresentaram um “colar de desgaste” acentuado e formação de um degrau com cerca de 0,9 mm de profundidade. Na região desgastada observou-se esboroamento das partículas de WC, decorrente de perda de cobalto, detectada por análise EDS de raios-X. Quando não houve formação acentuada de colar de desgaste observou-se esboroamento de partículas de cobalto nas arestas de corte, principalmente nas regiões de menores raios de curvatura. As evidências indicam a ocorrência de lixiviação do Co, devido ao contato com o óleo solúvel, levando a um processo sinérgico de erosão-corrosão da ferramenta. O controle do pH do óleo lubrificante é uma variável importante para o controle do processo de desgaste.

Palavras-chave: Metal duro; Desgaste; Erosão-corrosão; Lixiviação de cobalto.

WEAR OF WC-Co CERMET PUNCHES USED TO CUT STEEL SHEETS FOR FABRICATING ROTORS AND STATORS OF ELECTRICAL MOTORS ¹

Abstract

WC - 12% Co cermet punches, used to cut low carbon sheet steel for manufacturing rotors and stators of electrical motors, have been showing excessive wear, requiring grinding after just relatively few cutting operations. Microstructure, chemical composition and wear surfaces of the punches were analyzed using Scanning Electron Microscopy and X-Ray Energy Dispersive Spectrometry, in order to identify the operating wear mechanisms. Some punches showed a well pronounced wear collar 0.9 mm in depth. In the wear region, WC particles crumbled due to Co loss were observed, detected by X-Ray EDS analyses. In the cases where a "wear collar" was not formed, crumbling of the WC particles was only observed on the cutting edges of the punch, especially at regions showing small radius of curvature. Co lixiviation during contact with soluble oils led to a synergistic erosion-corrosion process of the punches. Control of the pH of the lubricant is important to reduce the erosion-corrosion wear process of the punches.

Key words: Cerme; Wear; Erosion-corrosion; Co lixiviation.

¹ Contribuição técnica ao 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 15 e 16 de julho de 2009, São Paulo, SP.

² Engenheiro Metalurgista – Mestre e Doutor em Engenharia – Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

³ Engenheiro Metalurgista – Mestre e Doutor em Engenharia – Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

⁴ Engenheira Metalurgista – Mestranda em Engenharia na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SEW Eurodrive Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 30 milhões de motores elétricos são fabricados no Brasil por ano. Para produzi-los, bilhões de lâminas de aço elétrico são estampadas por ano no país. A estampagem é feita em prensas de alta velocidade que trabalham dando até 400 golpes por minuto com ferramentas de metal duro ou aço rápido. O puncionamento é o método utilizado para dar forma às lâminas que empilhadas formam o rotor e o estator dos motores elétricos.

Os punções de metal duro, usinados por eletroerosão e retificados para acabamento final devem apresentar resistência ao desgaste compatível com uma vida de cerca de 3 milhões de golpes entre afiações. Nas operações de puncionamento e corte das chapas de aço elétrico, o punção penetra até aproximadamente 50% da espessura da chapa, que é de 0,5 mm a 0,7 mm, antes que ela rompa. A operação exige lubrificação e refrigeração, sendo utilizados óleos solúveis em água.

Em algumas circunstâncias, punções de metal duro, utilizados em operações de corte de chapas de aço baixo carbono para fins elétricos (rotores e estatores), têm apresentado desgaste excessivo, demandando afiamento após um pequeno número de “batidas” (~ 800.000), quando comparado com o previsto (~ 3 milhões de batidas). Quando desgastados os punções deixam rebarbas nas chapas que prejudicam seu empilhamento e a montagem de rotores e estatores. A altura máxima de rebarba é da ordem de 50 μm .

O objetivo deste trabalho é estudar o desgaste prematuro verificado em ferramentas de metal-duro que em alguns casos apresentaram “colar de desgaste” com cerca de 0,9 mm de profundidade, visando identificar os mecanismos responsáveis pelo desgaste acentuado das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As ferramentas analisadas foram fabricadas a partir de um bloco de “metal duro” (liga WC-Co com 12% de cobalto como ligante, de acordo com o catálogo da Ceratizit para o grau H40S) obtido por Metalurgia do Pó. As ferramentas foram usinadas por processo de eletro-erosão e retificadas para acabamento final.

A operação de corte das chapas exige lubrificação e refrigeração e para tanto são utilizados óleos lubrificantes. Anteriormente eram utilizados óleos minerais e a partir do ano passado começou a se utilizar óleo solúvel em água. Em maio de 2008 o óleo solúvel HOR 42 foi substituído por outro indicado pelo fabricante da ferramenta.

O diagrama da Figura 1 mostra o fluxograma de fabricação e processamento das ferramentas.

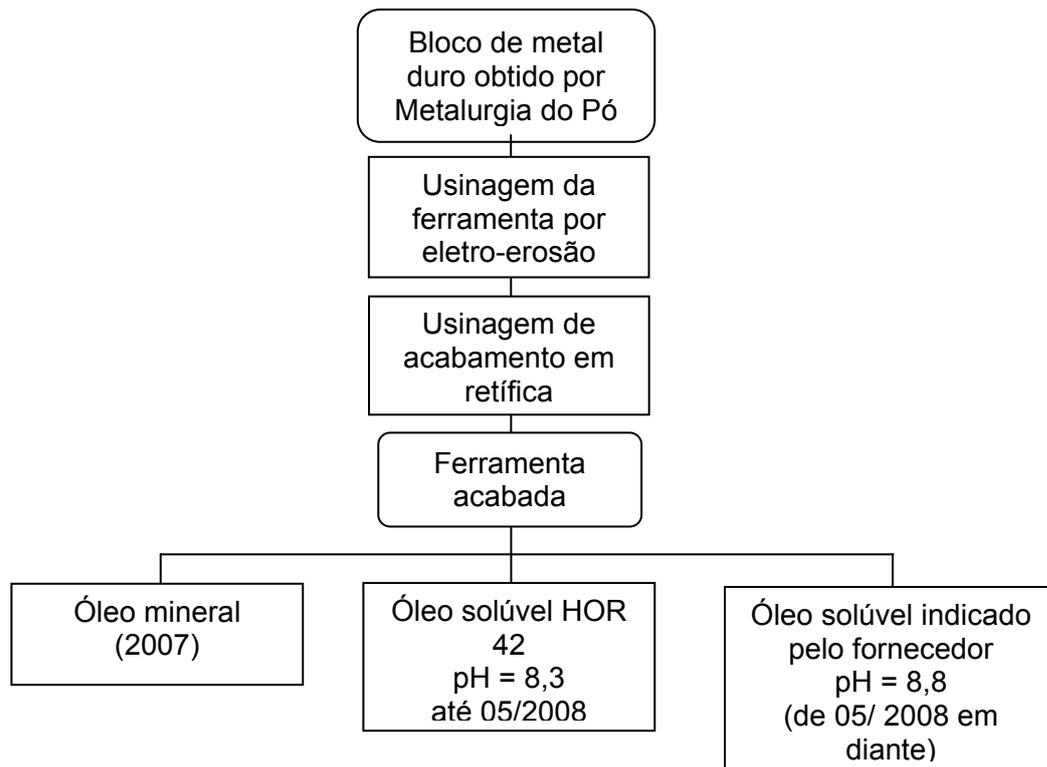


Figura 1 – Fluxograma de fabricação e uso de punções de metal-duro.

Em cada etapa de fabricação e de utilização a ferramenta tem contato com diferentes tipos de materiais e de meios ambientes que podem ter ação de desgaste ou corrosão, até mesmo de associação destes dois processos.

A Tabela 1 mostra a denominação, a identificação e a situação do estampo em que os punções estudados trabalharam.

Tabela 1 - Denominação, identificação e a situação do estampo em que os punções trabalharam

	Situação do estampo	Ano	Observação
A9	Ativo	2007	Pouco uso
B2	Em utilização provisória		Metal duro de boa qualidade
C1	Ativo	2005	Apresenta colar de desgaste na extremidade
D4	Desativado		Apresenta colar de desgaste na extremidade

Os punções foram analisados em microscópio eletrônico de varredura, utilizando imagens de elétrons secundários, de elétrons retroespalhados e espectrometria por dispersão de energia de raios-X (EDS) para análise química localizada.

3 RESULTADOS

3.1 Ferramenta A – Ativa com Pouco Uso

A ferramenta A é um punção com muito pouco uso, que não apresenta colar de desgaste. Suas faces laterais apresentam-se preservadas, como se vê na **Erro! Fonte de referência não encontrada.a**. Já a aresta de corte apresenta pequenas quebras como se vê na Figura 2b. A Figura mostra o espectro EDS da região retangular assinalada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.b**. O teor de Co em torno de 7% é inferior ao teor nominal do metal-duro utilizado.

A Figura 4 mostra um detalhe ampliado da aresta de corte, onde se nota que as quebras de aresta medem até 10µm. A análise química de uma região dessa aresta de corte resultou no espectro da Figura 4, onde se vê a presença de ferro. Esse teor de ferro só pode ser originado de operações de estampagem. Portanto, apesar de referenciada como uma “ferramenta sem uso”, ela deve ter tido pelo menos algumas operações de teste.

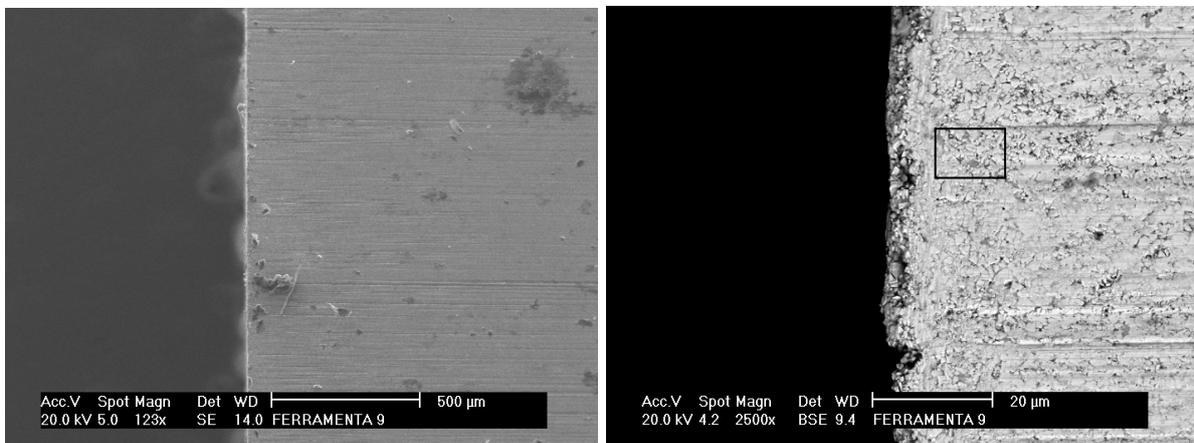


Figura 2 – Aresta de corte da ferramenta A. a) ausência de colar de desgaste. A face lateral está preservada. MEV. SE. 123X. b) pequenas quebras na aresta de corte. MEV.ERE. 2.500X.

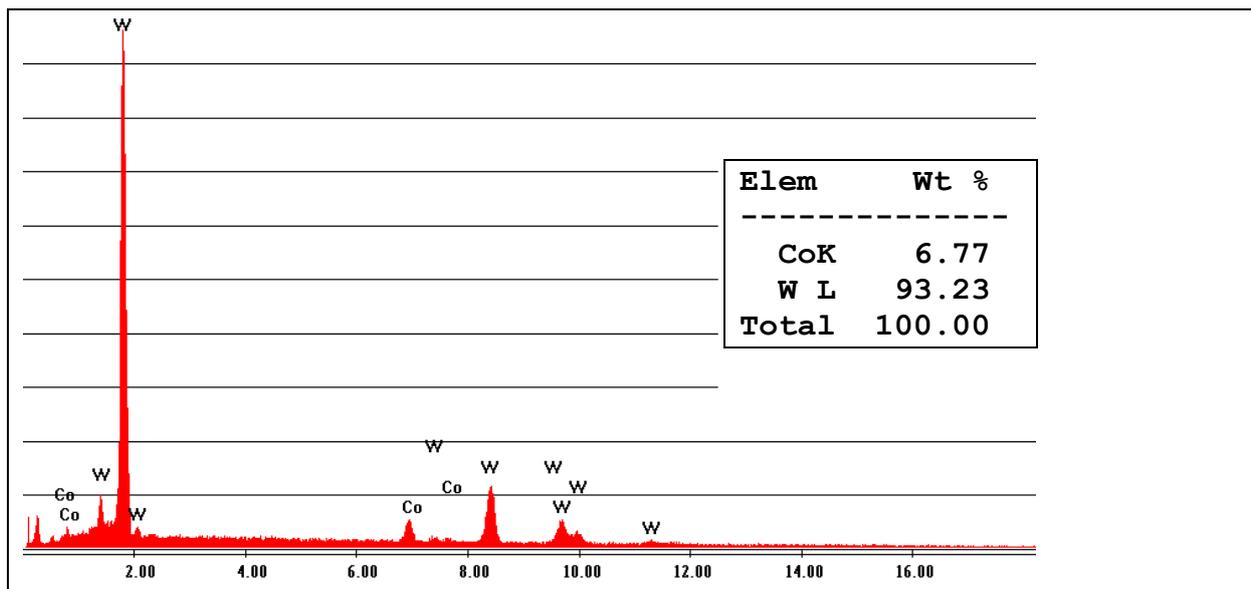


Figura 3 – Análise EDS de raios-X e análise química semi-quantitativa da face lateral da ferramenta A na região retangular assinalada na Figura 4. Nota-se perda de Co.

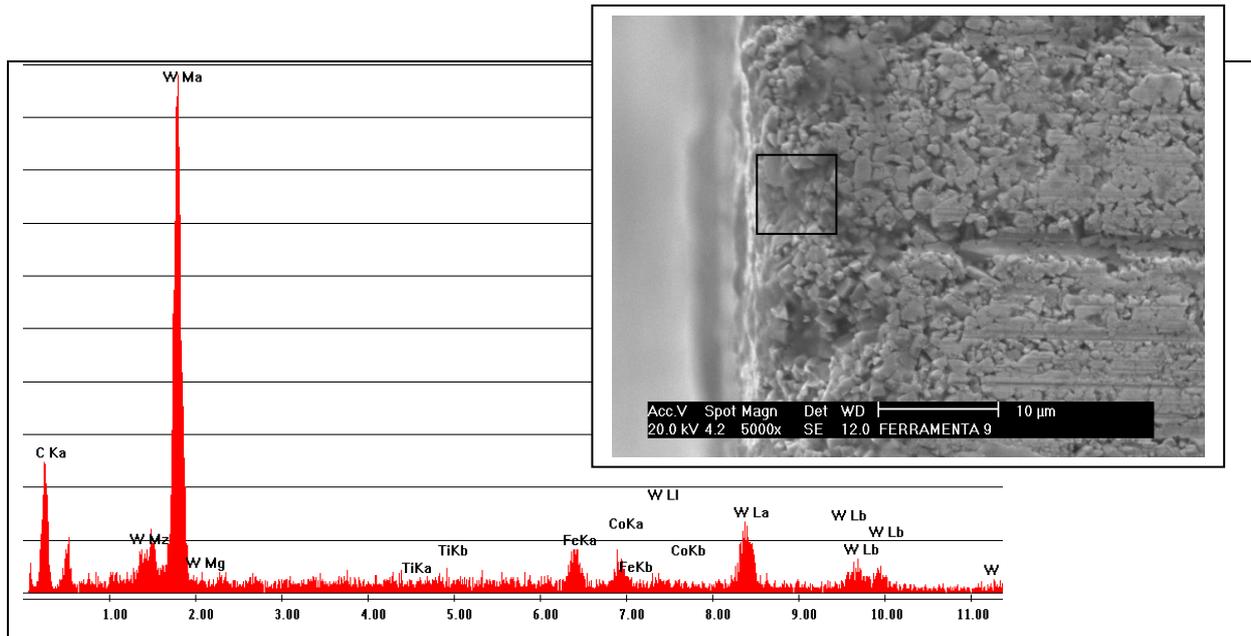


Figura 4 – Aresta de corte da ferramenta A, mostrando pequenas quebras. Espectro EDS de raios-X da região retangular assinalada. MEV. ES. 5.000X.

3.2 Ferramenta B – Em utilização Provisória

A ferramenta B foi pouco usada, segundo informações do usuário. A face lateral da ferramenta B mostra-se com aspecto bastante compacto, conforme Figura 5. Essa ferramenta foi cortada ao meio, polida e analisado. A Figura 5b mostra a seção transversal da ferramenta em uma região próxima da borda (face lateral). A Figura 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que o teor de cobalto é da ordem de 12%, como previsto.

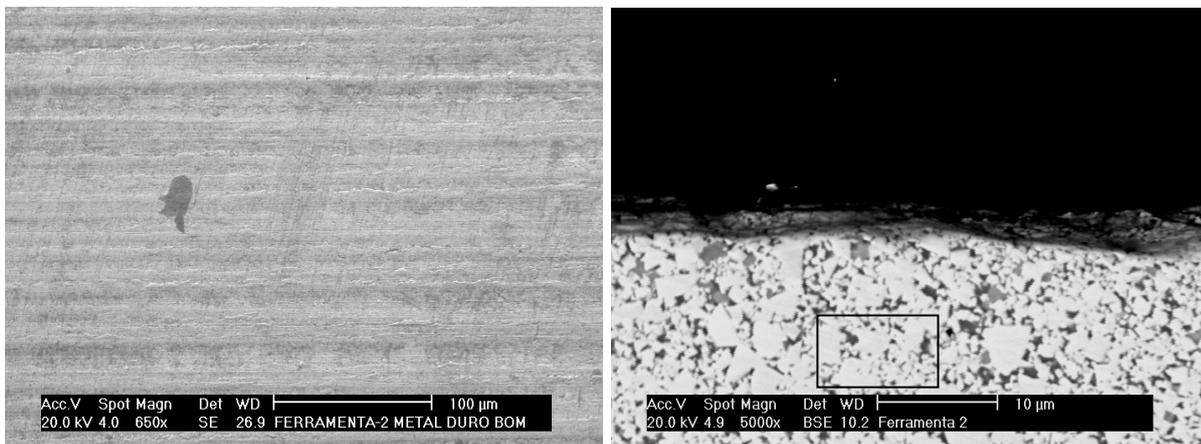


Figura 5 - a) Face lateral da ferramenta B com aspecto compacto. MEV. ES. 650X. b) Seção transversal da ferramenta B. Presença de ligante Co. A borda lateral da ferramenta está preservada. MEV. ERE. 5.000X

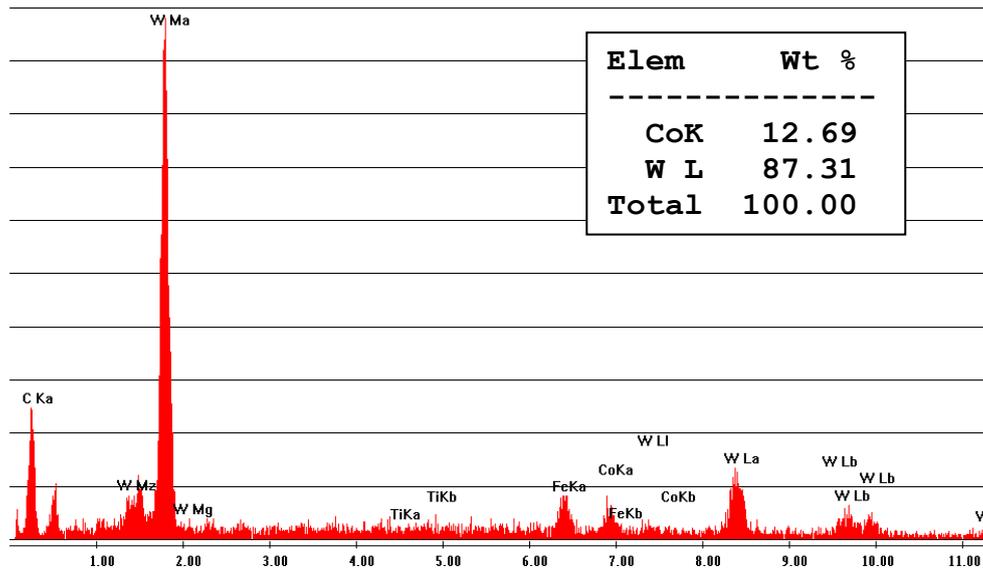


Figura 6 – Espectro EDS de raios-X e análise química semi-quantitativa da área retangular assinalada na Figura 5b.

3.3 Ferramenta C – Ativa

A ferramenta C, que teve vida curta, apresentou acentuado colar de desgaste com altura de aproximadamente 1 mm, como se vê na Figura 7a. A análise química da região do colar de desgaste revelou ausência de Co e presença de ferro, como mostra o espectro da Figura 8. A presença de ferro é devida à adesão das chapas de aço, durante a operação de corte, ao punção. A Figura 7b mostra uma região da face lateral da ferramenta C, aonde se vêem partículas de carbeto de tungstênio soltas na microestrutura, devido à perda de Co.

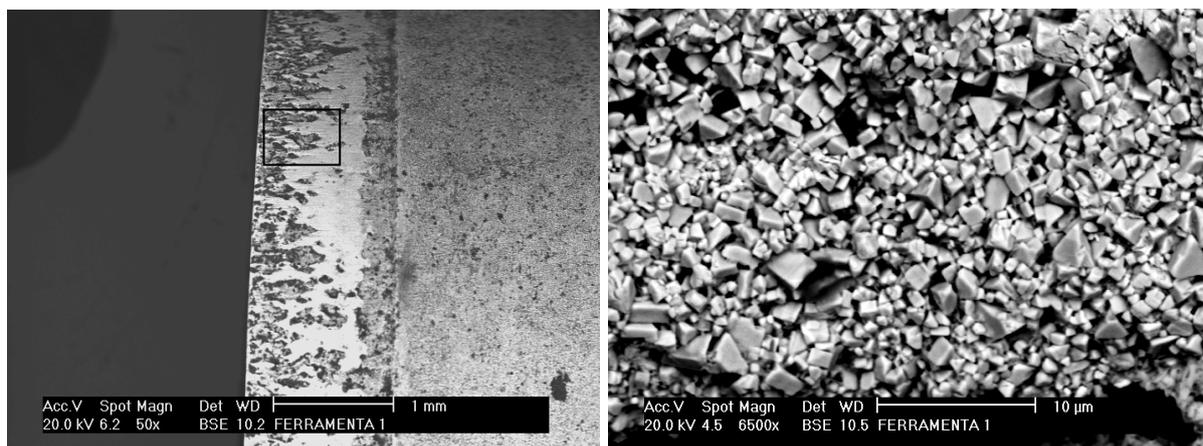


Figura 7 – a) Colar de desgaste com aproximadamente 1 mm de altura na ferramenta C. MEV. ERE. 50X. b) Face lateral da ferramenta C. Partículas de carbeto de tungstênio soltas devido à perda do elemento ligante Co. MEV. ERE. 6.500X.

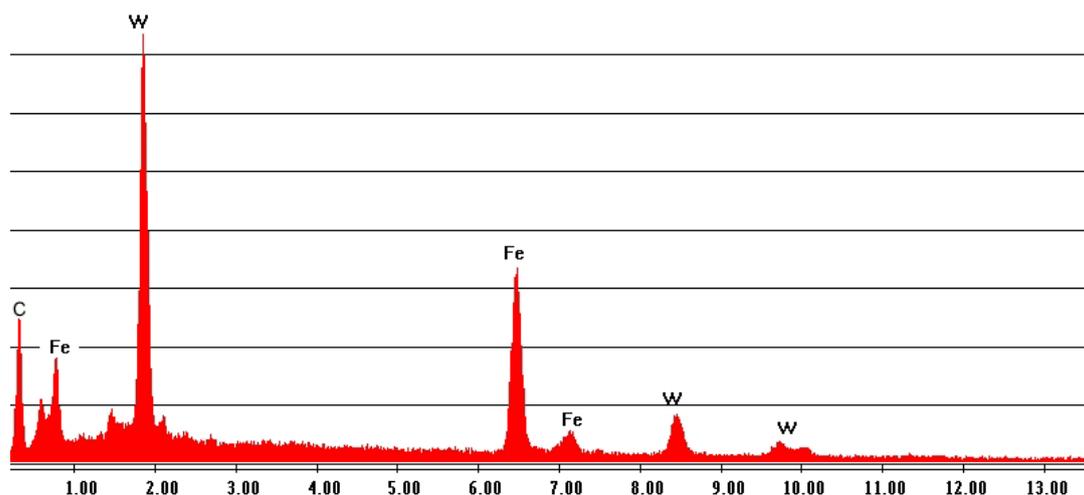


Figura 8 - Espectro EDS de raios X, da região retangular no colar de desgaste da ferramenta C. Ausência de Co e presença de ferro oriundo da adesão das chapas ao punção.

A superfície da ferramenta C foi analisada semi-quantitativamente por espectrometria EDS de raios-X em três diferentes regiões, tendo sido obtidos os resultados da Tabela 2. Nota-se que o teor de Co aumenta conforme a distância em relação ao colar aumenta.

Tabela 2 – Análise química semi-quantitativa da ferramenta C

Região	% W	% Co
Colar	99,29	0,71
A 5 mm da aresta de corte	96,11	3,89
No meio da face lateral	92,92	7,08

As evidências encontradas indicam ter havido formação de acentuado colar de desgaste, com aproximadamente 1 mm de altura e perda acentuada de Co na região do colar. Foi encontrado Fe no colar da ferramenta C, resultante da aderência de material da chapa de aço puncionada. Houve, também, perda de Co na lateral da ferramenta embora em intensidade menor que a observada na aresta de corte.

3.4 Ferramenta D - Apresenta Colar de Desgaste

A ferramenta D apresentou um colar de desgaste com aproximadamente 0,9 mm de altura, visto na Figura 9a. A face lateral e a aresta de corte da ferramenta D encontram-se desgastadas com aspecto pouco compacto e partículas de carbetto de tungstênio soltas. A Figura 9b mostra a face lateral da ferramenta D com esboroamento de grãos, devido à perda de Co que atua como ligante. A aresta de corte também apresenta esboroamento com perda de ligante como se vê na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. A análise EDS de raios-X revelou ausência de Co e presença de ferro nessa região.

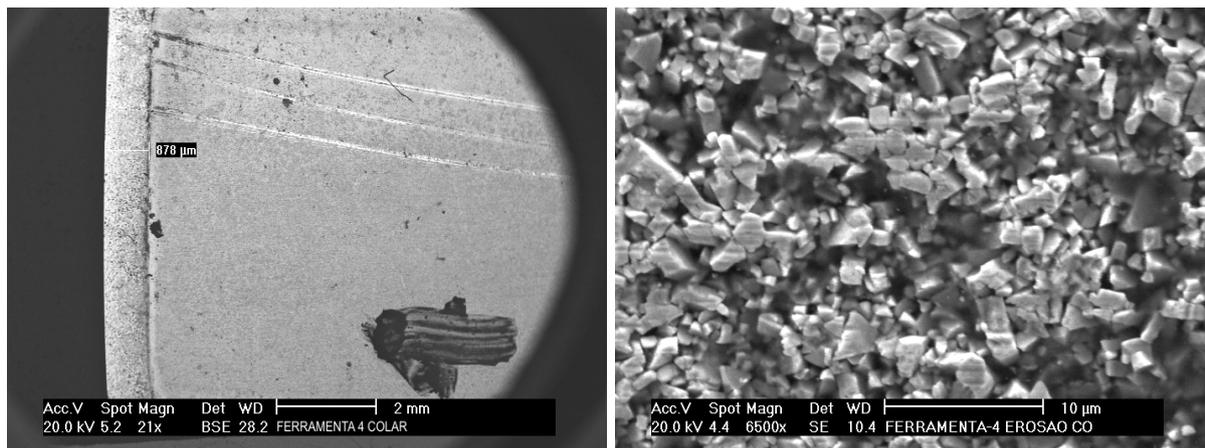


Figura 9 – a) Colar de desgaste com altura de 0,9 mm. MEV. ERE. 21X. b) Esboroamento de partículas de WC devido à perda de Co. MEV. ES. 6.500X.

O exame da seção transversal da ferramenta D revelou que essa região empobrecida em Co não é apenas superficial, ela tem aproximadamente 40μm de profundidade, como se vê nas Figuras 10a e 10b das bordas laterais. Como ela estava presente nas duas faces laterais do punção, pode-se supor que toda a superfície da ferramenta tenha esse empobrecimento em cobalto. Essa camada é conhecida como zona de depleção ou zona depleta.

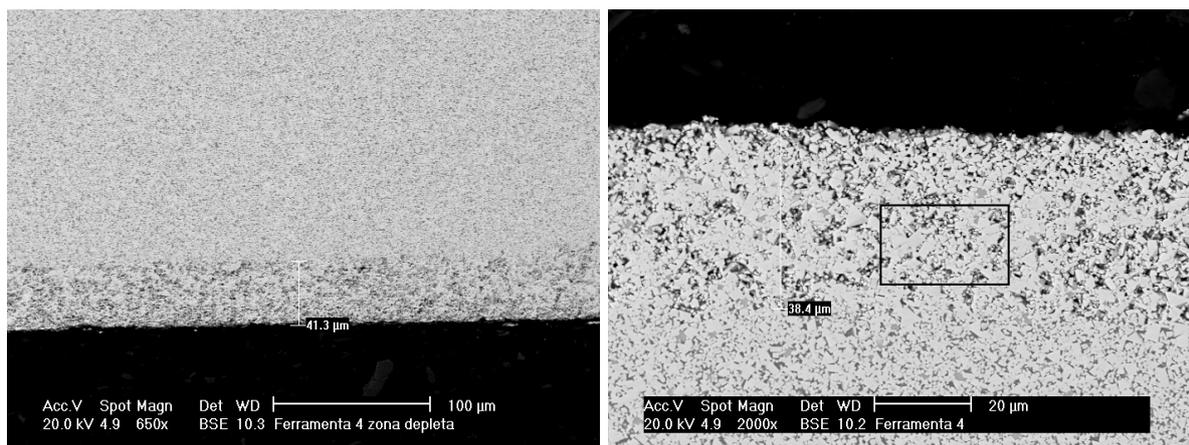


Figura 10 – a) Face lateral da ferramenta D. Seção transversal em posição afastada da aresta de corte. Zona empobrecida em cobalto com cerca de 40 μm de profundidade. MEV. ERE. 650X. b) Face lateral oposta da ferramenta D. Seção transversal em posição afastada da aresta de corte. Zona empobrecida em cobalto com cerca de 40 μm de profundidade. MEV. ERE. 2.000X

A Figura 11 – **Espectro EDS de raios-X da zona depleta na região assinalada pelo retângulo na Figura 11** mostra o espectro EDS de raios-X da região assinalada pelo retângulo na Figura 10b. Repare que houve perda de Co, porém não há ferro. Essa evidência é indicativa de processo de corrosão da ferramenta sem que tenha havido contato da mesma com o aço, durante operações de estampagem.

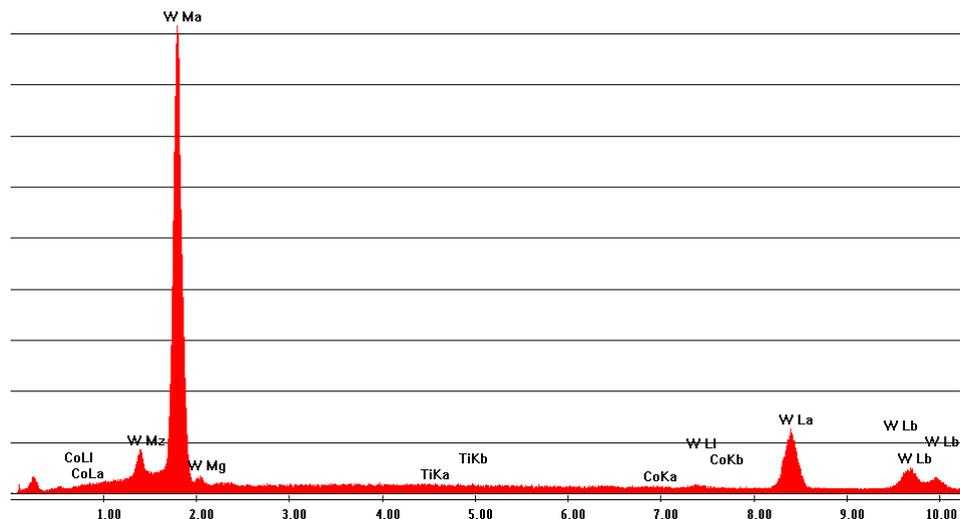


Figura 11 – Espectro EDS de raios-X da zona depleta na região assinalada pelo retângulo na Figura 10.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a análise química semi-quantitativa da ferramenta D, medida na seção transversal e na região depleta em que houve perda de Co. O teor de Co dessa ferramenta é de cerca de 12% em peso.

Tabela 3 – Análise química semi-quantitativa da ferramenta D no núcleo e na região depleta

Região	% W	% Co	% Ti
Núcleo	87,30	12,09	0,71
Região depleta	98,32	0,96	0,72

Portanto, a ferramenta D sofreu forte perda de Co mesmo em regiões muito afastadas da aresta de corte numa profundidade de aproximadamente 40 μm . As evidências encontradas indicam ter ocorrido processo de perda de cobalto ao longo de toda a superfície da ferramenta D.

4 DISCUSSÃO

As evidências encontradas indicam ter ocorrido um processo de corrosão das ferramentas, muito provavelmente devido ao contato com o líquido lubrificante. No caso da ferramenta D essa perda de cobalto ocorreu ao longo de toda a superfície, atingindo uma profundidade de aproximadamente 40 μm .

De fato a literatura técnica descreve o fenômeno de lixiviação de Co de ferramentas de metal duro quando em contato com óleos solúveis.⁽¹⁾

Na Figura é possível observar que o cobalto sofre corrosão em contato com a água para potencial 0 e pH menor que 7. É importante controlar o pH do óleo solúvel lubrificante pois o mesmo pode ter ação lixiviante (ação de dissolução) do Co, dependendo do pH. É importante lembrar que o óleo solúvel pode apresentar um diagrama diferente do acima exposto, que vale para a água.

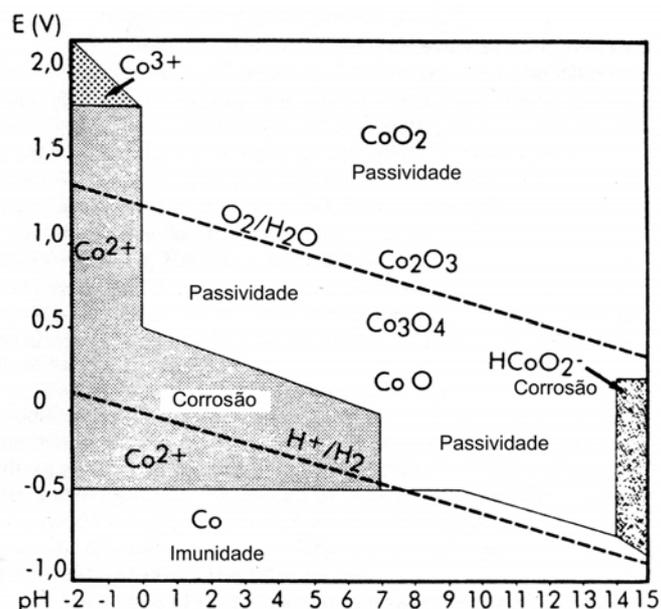


Figura 12 – Diagrama de Pourbaix para Co puro indicando as regiões de corrosão, imunidade e passividade de Co em contato com a água.⁽¹⁾

O processo de corrosão parece ser potencializado pela formação ou existência de frestas. O cobalto pode sofrer hidrólise e liberar um próton (H^+) em uma fresta. Assim, o valor do pH no interior da fresta cai drasticamente, com o aumento da concentração de prótons. A taxa de corrosão torna-se inversamente proporcional à largura da fresta. As frestas encontradas na microestrutura dos punções analisados têm variação de largura entre $1\ \mu m$ a $10\ \mu m$. Assim os diferentes pHs e diferentes condições de aeração dentro e fora da fresta formam uma célula eletrolítica e podem acelerar a taxa de corrosão. Quando um punção de carbeto de tungstênio é colocado em contato com o lubrificante, o carbeto de tungstênio atua como catodo e o Co como anodo na célula formada. A ausência de Co nas frestas formadas na microestrutura das ferramentas, observada por espectrometria EDS de raios-X, dá apoio à hipótese de lixiviação seletiva do cobalto no interior da ferramenta.⁽²⁾ Rosenfeld estudou o pH do eletrólito e a taxa de corrosão no interior de uma fresta com $40\ \mu m$ de largura tendo encontrado pH 2,4 após somente uma hora de exposição.⁽³⁾

As ferramentas C e D claramente trabalharam em contato com óleo solúvel por muito tempo e sofreram dissolução do Co ao longo da sua superfície e esboroamento das partículas de WC na aresta de corte. Já a ferramenta B apresenta perda de Co e esboroamento somente na região da aresta de corte. Isso se deve à uma ação sinérgica de erosão-corrosão sobre o metal duro. O desgaste da ferramenta por ação dos esforços mecânicos remove os produtos de corrosão ou a película passiva que se forma na superfície da ferramenta e o líquido corrosivo tem ação corrosiva mais intensa sobre a ferramenta.

Durante o preparo dos corpos de prova para análise metalográfica observamos que durante operação prolongada de lixamento e polimento das ferramentas (12 horas), utilizando água como lubrificante, ocorreu acentuada perda de Co das ferramentas na região em que foi feito o polimento.

5 CONCLUSÕES

A condição ideal de uso dos punções deveria levar a operação por até 3 milhões de golpes, seguida de retífica de 0,1 mm para posterior retomada de operação. Certos lotes de punção têm bom desempenho, outros não. Havia uma hipótese de que uma das etapas de fabricação dos punções, na empresa fornecedora, poderia dar origem ao problema. A proposta de investigação incluiu, portanto, a análise comparada de punções de desempenho insatisfatório e punções novos.

Este estudo resultou numa interpretação sobre a causa do desgaste prematuro dos punções: em todos os punções que foram submetidos a serviço existem evidências nítidas de perda de cobalto por lixiviação na sua superfície, ao longo de vários milímetros de seu comprimento. Essa perda de cobalto, que deveria funcionar como um “cimento” entre as partículas de WC tira a sustentação das partículas e, com isso, ocorre o desgaste. A literatura diz que a lixiviação ocorre quando o material é exposto a uma solução aquosa com pH abaixo de um valor crítico.

Punções novos exibem cobalto em sua superfície. Portanto, a perda de cobalto não ocorreu na etapa de fabricação dos punções, mas sim em uso. Durante o estudo aqui relatado, observou-se perda de cobalto na superfície de corpos de prova cortados e polidos, quando o polimento foi feito em solução aquosa, por algumas horas. Isso mostra que a lixiviação ocorre em poucas horas de exposição.

REFERÊNCIAS

- 1 MOSHER, E; PETERSON, L.; SKOLD, R. – The chemical control of cobalt leaching from cemented carbide tooling – *Materials Performance*, pp. 38-43, out. 1986.
- 2 LU, R., MINARRO, L, SU, Y. SHEMENSKI R. - Failure mechanism of cemented tungsten carbide dies in wet drawing process of steel cord filament - *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 26, pp. 589–600, 2008.
- 3 ROSENFELD, I.L. - Crevice corrosion of metals and alloys. In: B.F. Brown, J. Kruger and R.W. Staehle, Editors, *Localized corrosion*, National Association of Corrosion Engineers, Houston, pp. 373–398, 1971.