

CARACTERIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM AÇO INOXIDÁVEL DE ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO MAQUINADO POR EDM

A Leite¹, M. Melo², J. Faustino², M. Santos²

¹Licenciado em Eng. Materiais FCTUNL

² INETI / DMTP- Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção
Ed. C, Estrada do Paço do Lumiar, 1649-038 Lisboa

RESUMO

A maquinagem de um aço por electroerosão modifica as propriedades da superfície da peça, alterando a sua composição química e microestrutura, bem como a sua rugosidade e aspecto. Esta alteração depende das condições de maquinagem (intensidade de corrente, tempo de descarga e tensão), assim como das características do material maquinado (propriedades da matriz (?), propriedades do material). O desempenho na maquinagem depende, também destes parâmetros. A electroerosão de um aço inoxidável de endurecimento por precipitação CORRAX evidenciou diferentes desempenhos de maquinagem (MRR e TWR) e diferentes aspectos de superfície (graus de acabamento) (Ra), associados a diferentes estados de integridade estrutural na camada branca e na zona termicamente afectada. Comparativamente com aço MG50 (AISI H13), identificou-se uma taxa de remoção três vezes inferior, uma rugosidade superior e uma camada branca com um teor de carbono superior ao da matriz.

1- INTRODUÇÃO

A tecnologia de maquinagem por electroerosão (EDM) combina efeitos térmicos e eléctricos, que conduzem ao desgaste na superfície de moldes e ferramentas especiais em ligas ferrosas e não ferrosas, através da fusão e da solidificação rápida produzida à superfície da peça durante o processo de descarga eléctrica entre o eléctrodo (cátodo) e a peça (ânodo) (Fig.1).

O princípio da electroerosão baseia-se no aplicação de uma descarga eléctrica através de um meio dieléctrico (electrólito), que, ao ionizar este fluido, cria condições para o estabelecimento de uma descarga contínua.

Esta descarga contínua sobre a superfície da peça, produzida por uma corrente com milhares de A/cm² promove a fusão e a vaporização do material [1].

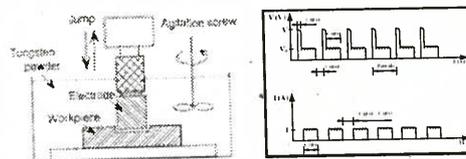


Fig.1: Processo e parâmetros de maquinagem EDM.

É a interrupção da descarga eléctrica entre o ânodo e o cátodo que provoca a explosão de bolhas de gás provenientes da decomposição do dieléctrico, cria crateras

na superfície e origina a rugosidade superficial (Fig. 2), em função das condições eléctricas de descarga e características do material (Fig. 1). Os parâmetros de maquinagem responsáveis são a tensão, intensidade e tempo de descarga da corrente eléctrica [2].

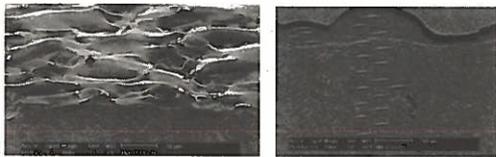


Fig. 2: Aço CORRAX após maquinagem por EDM: a) Topografia da camada branca; b) Perfil da camada branca.

Através do movimento de subida e descida do eléctrodo e do movimento do dieléctrico, o material é retirado da superfície, desempenhando ainda o dieléctrico uma função de arrefecedor rápido da superfície em fusão, com repercussão nas transformações microestruturais das camadas adjacentes.

A camada superficial, identificada como camada branca devido à sua não contrastação pelos métodos clássicos, é formada basicamente pelos elementos constituintes do material base, adicionados de carbono proveniente da decomposição do hidrocarboneto e eventualmente de contaminação do eléctrodo.

A espessura da camada branca depende das propriedades do material, como sejam a composição química, a condutibilidade térmica do material base, e também das condições térmicas do processo, designadamente as velocidades de aquecimento e arrefecimento e as propriedades do dieléctrico [3].

A maquinagem de um aço inoxidável de endurecimento por precipitação com elevada percentagem de elementos de liga (Cr, Ni e Al), de baixa dureza de fornecimento, traduz uma experimentação, na procura de resultados mais favoráveis, tanto na espessura da CB, como na rugosidade, relativamente aos obtidos noutros tipos de aço.

2- TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1- Material

2.1.1- Introdução

Os aços inoxidáveis de endurecimento por precipitação apresentam elevada resistência à corrosão e à fractura, permitindo a maquinagem por meios convencionais, enquanto macios. De acordo com a sua composição existem três categorias: austenítico, semi-austenítico e martensítico, sendo o primeiro o menos utilizado [4].

Têm como característica particular o facto de, quando tratados termicamente, poderem envelhecer, aumentando a dureza, sem indução de distorção na peça. Este endurecimento obtém-se pela a formação e precipitação fina de fases secundárias.

São diversos os elementos que conduzem à formação destes precipitados, como alumínio, cobre, molibdénio, titânio, e podem formar-se no precipitados intermetálicos como NiAl, Ni₃Mo, Ni₃Ti e Fe₂Mo [5]. A precipitação de carbonetos neste tipo de aço é muito reduzida uma vez que possuem um teor de carbono bastante baixo.

2.1.2- Características e propriedades

O aço utilizado, CORRAX, fornecido pela F. RAMADA, é um aço do tipo martensítico. Após simples arrefecimento ao ar, subsequente ao tratamento de solubilização, apresenta uma matriz martensítica de baixa dureza. Na sua composição nominal (Tab. 1) destacam-se o Cr (12%), Ni (9.2%) e o Al (1.6%) [6].

De entre as suas características salienta-se a flexibilidade de endurecimento, a estabilidade e uniformidade dimensional associada ao tratamento de envelhecimento e elevada resistência à corrosão, indicada como superior à do aço inoxidável AISI 420 [6].

Segundo dados fornecidos pelo fabricante é um aço que quando envelhecido para uma dureza de 46 HRC e sob uma tem-

Tabela 1: Composição química.

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni	% Al
0,03	0,30	0,30	12,00	1,40	9,20	1,60

peratura de 200 °C, apresenta um coeficiente de expansão térmica de $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e uma condutibilidade térmica de 18 W/m °C [6].

2.1.3- Metalografia

As amostras de aço CORRAX foram preparadas metalograficamente e contrastadas com diversos reagentes para revelação da microestrutura.



Fig. 3: Microestrutura sem envelhecimento (contratação com super picral).

A observação em microscópio óptico de uma amostra no estado de fornecimento, sem envelhecimento, contrastado com super picral, revelou uma microestrutura de matriz martensítica, apresentando algum zonamento, "stringers" de ferrite δ e algumas inclusões, arredondadas do tipo sulfureto e finas e alongadas do tipo óxido (Fig. 3).

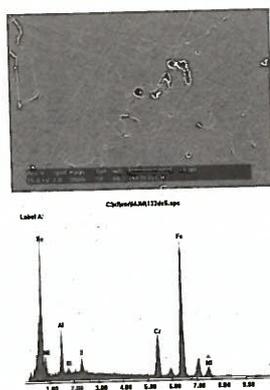


Fig. 4: Inclusão de alumínio: a) Imagem em MEV; b) Espectro de EDX.

Observaram-se algumas inclusões ricas em Al, cuja forma irregular (Fig. 4a). A

análise da composição química da inclusão foi registada num espectro de EDX (Fig. 4b).

2.1.4- Dureza

O aço foi fornecido no estado de solubilizado com um dureza de 34 HRC.

2.1.5- Tratamento térmico de envelhecimento

Efectuaram-se ensaios de tratamento térmico de envelhecimento, para observar a modificação da microestrutura e da característica mecânica do aço, nas seguintes condições: 425 e 525 °C, durante 4 horas, e 600°C durante 8 horas (Tab. 2). O principal resultado consistiu na evolução da dureza de 34 HRC para 47 HRC, após 4h a 425°C e 51 HRC, após 4h a 525 °C.

Tabela 2: Características após envelhecimento.

ENSAIO		RESULTADO
Temperatura (°C)	Tempo (h)	Dureza (HRC)
*	*	* 34
425	4	47
525	4	51
600	8	40

* no estado de fornecimento.

2.2- Maquinagem por electroerosão

O corte e preparação das amostras (30x30x3mm) foi realizada por electroerosão por fio (WEDM), numa máquina "CHARMILLES TECHNOLOGIES - ROBOFIL 310". A maquinagem de erosão por penetração foi realizada numa máquina "CHARMILLES TECHNOLOGIES- ROBOFORM 2000", em regimes para aço, nas condições de desbaste, acabamento e polimento (Tab. 3), estas duas últimas com movimento orbital do eléctrodo.

Tabela 3- Parâmetros de maquinagem

Regime - Máquina	Intensidade (A)	Tempo de impulso (ms)	Energia de descarga (μJ)
312 (Desbaste)	8	50	10200
220 (Acabamento)	2	6.4	320
E0 (Polimento)	1	3.2	80

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Maquinagem

3.1.1- Rugosidade

Na tabela 4 indicam-se os valores médios obtidos para o aço CORRAX. Embora a rugosidade do pico (Rz) fosse mais elevada após desbaste, verificou-se, contudo, no polimento, uma razão Rz/Ra superior à obtido no desbaste (9.4 vs 5.6).

A rugosidade média (Ra) obtida no acabamento final por polimento indicou um valor de Ra, no aço CORRAX, 3 vezes maior que o obtido no aço ferramenta MG 50 (AISI H13).

Tabela 4: Média das rugosidades Ra e Rz, obtidas no aço CORRAX.

Regime	Ra (μm)	Rz (μm)
Desbaste	5.167	28.773
Acabamento	1.858	11.513
Polimento	0.305	2.853

A comparação com a rugosidade obtida noutros tipos de aço, maquinados no estado de tratados termicamente (Fig. 5), permitiu verificar que o aço CORRAX também apresentou pior acabamento que o aço inoxidável STAVAX. Teve um comportamento idêntico ao aço pré-tratado PM300 (AISI P20) e bastante melhor do que o C265 (AISI D2).

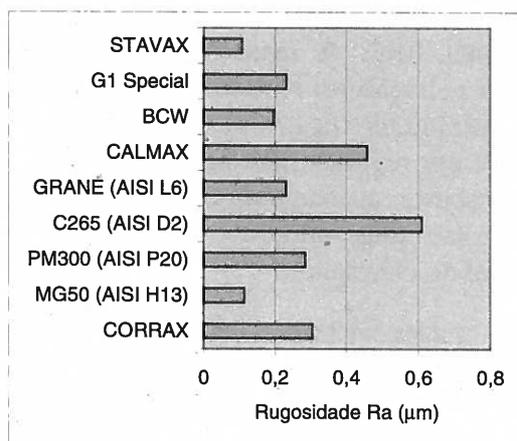


Fig. 5: Comparação da maquinagem através da rugosidade superficial de diversas amostras de aço (polimento).

3.1.2- Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material (MRR), determinada pela divisão entre a diferença

de peso antes e após a maquinagem e o tempo de ensaio, forneceu diferentes valores, sendo menor a taxa de remoção de material em polimento (Tab. 5).

Tabela 5: Taxa de remoção de material (mm^3/min).

Desbaste	Acabamento	Polimento
8.8	7.1	1.6

Comparativamente ao aço MG50 (AISI H13), que produziu melhor acabamento, verificou-se, para idênticas condições de maquinagem, que o CORRAX apresentava uma pior taxa de remoção em regime de polimento, embora semelhante em acabamento.

3.1.3- Taxa de desgaste do eléctrodo

A taxa de desgaste do eléctrodo (TWR), medida pela relação entre o desgaste do electrodo e da peça maquinada, aumenta na sequência dos regimes de maquinagem como indicado na tabela 6.

Tabela 6: Taxa de desgaste do eléctrodo.

Regime	Taxa de Desgaste (%)
Desbaste	0.6
Acabamento	3.0
Polimento	5.2

3.2- Camada branca

3.2.1- Aspecto superficial

As superfícies maquinadas apresentam, em geral, crateras com formas bem definidas e arredondadas. O seu aspecto (forma da cratera, limites e a sobreposição de bordos) é ilustrado na figura 6, quando observadas por microscopia óptica, e nas figuras 7 e 8, quando observadas por microscopia electrónica de varrimento.



Fig. 6- Aspecto da superfície maquinada (m. o. 500x): a) desbaste; b) acabamento; c) polimento.

Em regime de acabamento apresentam um diâmetro médio de $36 \mu\text{m}$ (Fig. 6a).

Em regime de polimento as crateras apresentavam-se mais planas e arredondadas, com um diâmetro médio de 20 μm (Fig. 7).

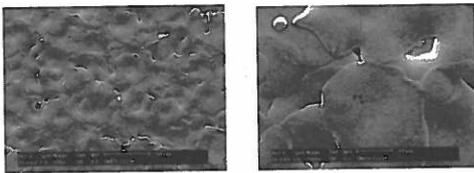


Fig. 7: Aspecto da superfície após maquinagem em regime de polimento (m.e.v.): a) 500x; b) 2000x.

Nestas identificaram-se microfissuras aleatoriamente distribuídas (Fig. 8), com orientação não preferencial e localizadas tanto no pico da cratera, como na base, ou entre bases de crateras.

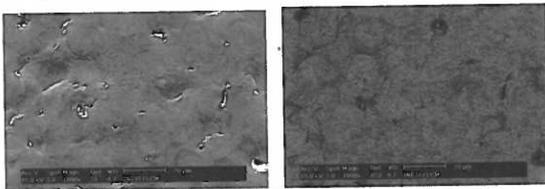


Fig. 8: Imagens de fissuração e contaminação na superfície maquinada em regime de polimento (m.e.v., 1000x): a) electrões secundários; b) electrões retrodifundidos.

3.2.2- Aspectos metalúrgicos

A metalografia da camada branca permitiu revelar diversos aspectos da sua configuração (Figs. 9 e 10) de que se destaca uma estrutura de solidificação rápida.

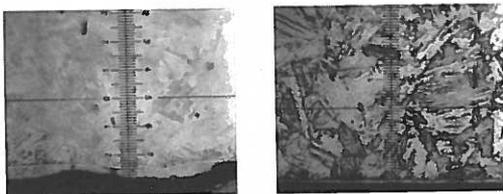


Fig. 9: Observação da camada branca, zona termicamente afectada e matriz (menor divisão da escala 2 μm): a) regime de desbaste; b) regime de polimento.

Na figura 11 ilustram-se alguns detalhes microestruturais produzidos na camada branca em regime de desbaste, após leve contraste químico com reagente de Marble diluído. Observou-se uma estrutura ondedada com camadas sobrepostas e com dendrites

pouco ramificadas e muito finas. Possui uma estrutura acicular a assinalar frentes de solidificação.

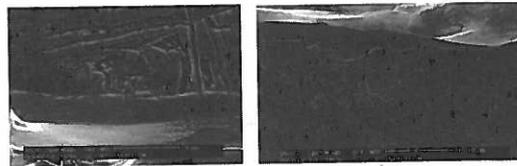


Fig. 10: Aspectos metalográfico da camada branca, da zona de transição e da zona termicamente afectada.

Em geral, a camada branca não apresenta descoesão na zona de transição para o material base.

A configuração da camada ressolidificada depende do regime de maquinagem. Em desbaste apresenta-se contínua, com um forma irregular correspondente à topografia das crateras, variando a espessura entre 0 e 18 μm . Em acabamento apresenta uma irregularidade menos acentuada, variando a espessura entre 0 e 9 μm , uma vez que foi obtida em condições de maquinagem correspondentes a menor energia. O polimento cria uma camada branca fina, regular e uniforme, com uma espessura média de 3,26 μm .

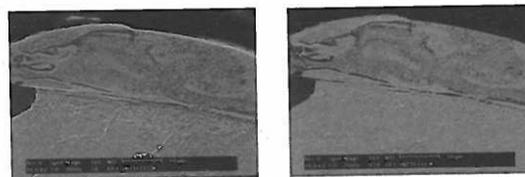


Fig. 11: Imagens da microestrutura da camada branca revelada com reagente de Marble diluído; a) electrões secundários (2000x); b) electrões retrodifundidos.

3.2.3- Composição química

A análise química por EDX mostrou que, em geral, à excepção de um teor mais elevado de carbono, a camada branca continha uma composição idêntica à do material de base, identificando-se como elementos principais o Fe, Cr, Ni e Al. Porém, na interface, detectaram-se, pontualmente, teores mais elevados de oxigénio e enxofre (Fig. 12).

Os mapas de Raios X (Fig. 13) mostraram uma distribuição relativamente uniforme dos elementos de liga, quer na camada branca quer na matriz. Os mapas relativos ao carbono e enxofre confirmaram uma concentração mais elevada na camada branca e indicaram uma zona de transição, identificada pela descontinuidade observada no mapa de Fe_L, que poderá corresponder a uma contaminação da superfície inicial.

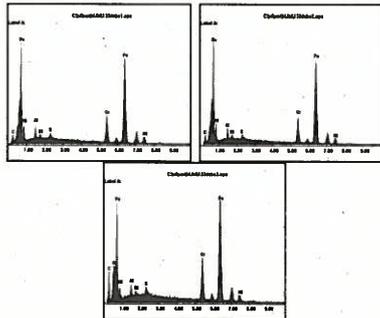


Fig. 12: Espectro de EDX na camada branca: a) no interior; b) junto à superfície exterior; c) junto à interface.

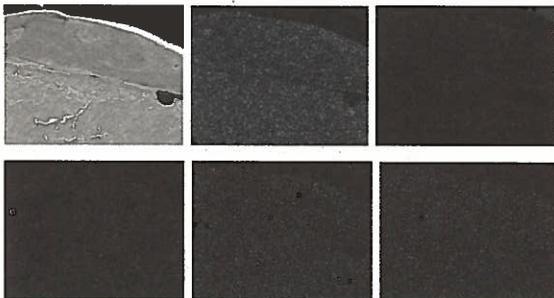


Fig. 13 Mapas de raios X obtidos na camada branca, de material maquinado por desbaste: a) região analisada; b) Fe_L; c) C_K; d) Cr_K; e) Al_K; f) S_K

3.2.4- Composição química e estrutural – difracção de raios X

Os espectros de difracção de raios X obtidos sobre amostras de aço tal qual recebido (Fig. 14d) e após maquinagem (Fig. 14a-c), mostram que estas operações introduzem uma alteração significativa na região superficial, que depende do regime utilizado.

A análise indica formação de austenite com orientação preferencial e carbonetos de ferro com diferentes estequiometrias. A austenite deverá possuir um teor de carbono relativamente elevado.

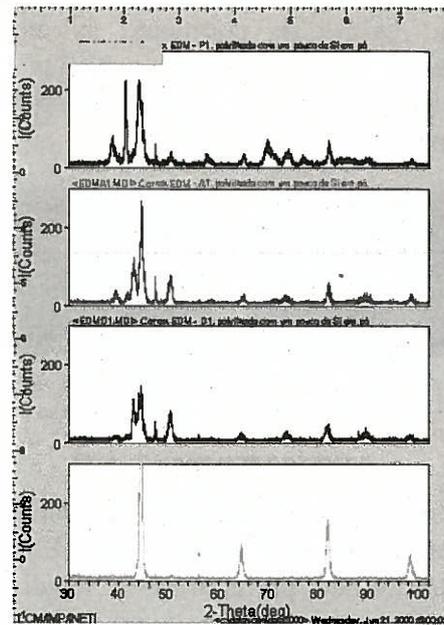


Fig. 14. Espectros de difracção de raios X obtidos sobre superfície maquinada: a) regime de polimento; b) regime de acabamento; c) regime de desbaste; e) d) material polido tal qual recebido.

3.2.5- Variação da dureza em profundidade

a) Regime de desbaste

O valor de dureza mais elevado foi obtido à superfície, onde se registou um valor médio aproximado de 600 HK vs, cerca de 400 HK no material de base (Fig. 15b).

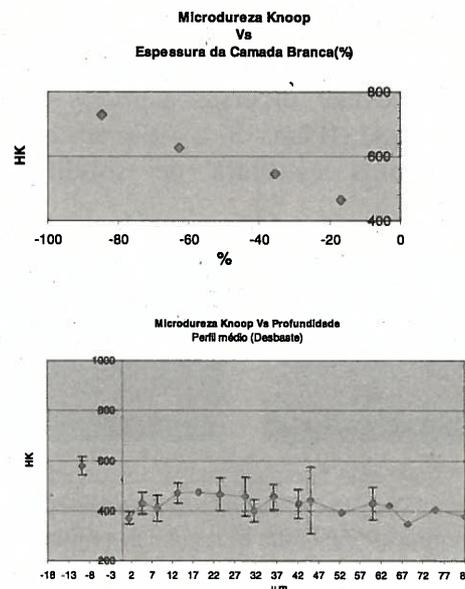


Fig. 15: Perfil de microdureza em amostras maquinadas em desbaste: a) camada branca; b) em profundidade.

O perfil de dureza da camada branca (Fig. 15a) mostrou uma variação

significativa entre a superfície e a zona de transição, denotando uma tendência para decrescer quase linearmente para o interior.

A evolução da dureza ao longo da zona termicamente afectada (Fig. 15b), com uma profundidade estimada entre 30 e 60 μm , evidenciou uma modificação da microestrutura que se poderá esquematizar através de três regiões:

- uma sub-camada, adjacente à camada branca, com uma dureza correspondente à do material solubilizado, onde terá ocorrido uma ressolubilização;
- uma zona intermédia, de dureza crescente, onde o sobre-envelhecimento se atenua gradualmente, dando lugar ao envelhecimento;
- uma zona mais interior onde o envelhecimento se atenua e a dureza tende para o valor da matriz.

b) Regime de acabamento

O perfil de dureza (Fig. 16) confirmou um aumento de dureza à superfície, superior ao obtido em desbaste (valor médio aproximado de 900 HK), e uma tendência semelhante à acima descrita, embora com menor gradiente.

Identificou-se, contudo, uma menor extensão da zona correspondente ao endurecimento secundário (Fig. 16b).

A extensão da ZTA variou entre 20 e 30 μm .

c) Regime de polimento

O perfil de dureza indicou também um valor mais elevado na camada branca, valor médio aproximado de 500 HK (Fig. 17b), mas uma menor variação ao longo da espessura desta camada (Fig. 17a).

A zona termicamente afectada apresentou uma evolução da dureza idêntica à dos outros regimes (Fig. 17b). A sua extensão foi estimada em cerca de 15–20 μm .

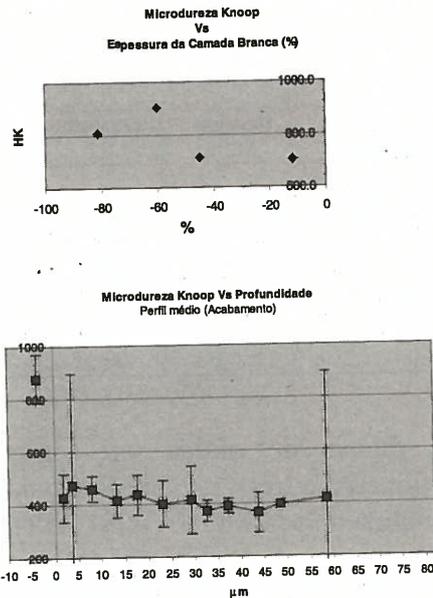


Fig. 16: Perfil de microdureza em amostras maquinadas em acabamento: a) perfil na camada branca; b) perfil em profundidade.

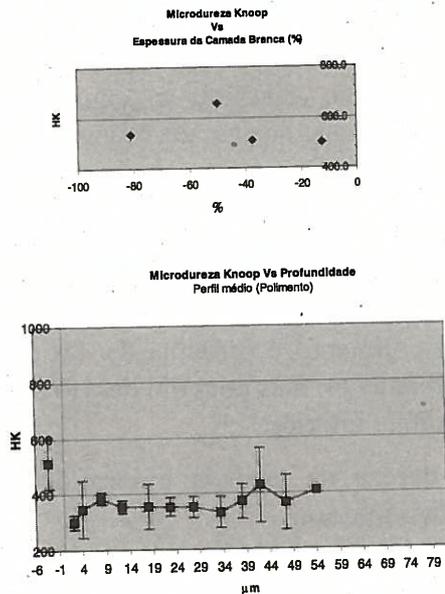


Fig. 17: Perfil de microdureza em amostras maquinadas em polimento: a) perfil na camada branca; b) perfil em profundidade.

4- CONCLUSÕES

O quadro seguinte resume as principais características físicas determinadas no presente estudo.

O resultado da maquinagem por EDM do aço CORRAX permite concluir que:

Tabela 7: Características físicas obtidas no aço CORRAX.

Parâmetro	Desbaste	Acabamento	Polimento
En. Descarga (μJ)	10200	320	80
Espessura da CB			
Valor médio (μm)	9,73	3,67	3,26
Desvio padrão	6,16	2,44	1,74
Valor máx. da espes.	18	9	6
ZTA (μm)	50 - 60	20 - 30	15 - 20
Rugosidade			
Ra (μm)	5,167	1,858	0,305
Rz (μm)	28,773	11,513	2,853

- a) A rugosidade obtida em regime de polimento é três vezes mais elevada que a obtida no aço MG50 (AISI H13).
- b) A taxa de remoção em regime de polimento é inferior em quase três vezes a do aço MG50 (AISI H13).

O efeito produzido pela maquinação nas camadas superficiais permite concluir que:

- a) A camada branca possui um teor de carbono superior ao da matriz.
- b) O carbono distribui-se com relativa uniformidade na camada branca.
- c) A interface camada branca - matriz poderá conter maior teor de elementos leves, como carbono e oxigénio.
- d) A espessura média da camada branca em polimento é próxima da obtida em acabamento, mas com um desvio padrão bastante inferior.
- e) A dureza da camada branca decresce para o interior.
- f) A alteração microestrutural da zona termicamente afectada, cuja extensão depende da energia de descarga, não é revelada através dos reagentes de contrastação química.

4- REFERÊNCIAS

- [1] G. Mamalis et al, *Macroscopic and microscopic phenomena of electro-discharge machined steel surfaces: na experimental investigation*, J.Mec. Working Technologies, 15,335-356.
- [2] E.J.Weller, *Non Traditional Machining Processes*, Published by Society of Manufacturing Engineers, Second Edition.
- [3] P. Devimeux, C. Dixmier, et al., *Guide des usinages par électroerosion et par électrochimie*, ed. CETIM (France) et ENIMS (URSS), 1980.
- [4] G. Voort et al, *Metallurgy and Microstructures*, Metals Handbook, Vol. 9 ASM, 9ª Edition, Ohio, USA, 1985.
- [5] S. Floreen, *Maraging Steel*, Metals Handbook, Vol. 1, ASM, 9ª Edition, Ohio, USA, 1978.
- [6] CORRAX- *A Stainless precipitation hardening steel, Documento técnico, Uddeholm, Suécia..*

AGRADECIMENTOS

Ao PEDIP pelo apoio à I&D através do projecto TAVAC e ao LCM/INETI pelo apoio e realização de diversas actividades.