

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Licenciatura em Engenharia Mecânica

PROJECTO DE FIM DE CURSO

Sistematização do processo de análise de eléctrodos

Julho de 2002

621(047.3)
LEM 2001/VILm



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Mais Educação

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Licenciatura em Engenharia Mecânica

PROJECTO DE FIM DE CURSO

Sistematização do processo de análise de eléctrodos



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



SOARMOLDES

Realizado por:

Miguel Angelo Q. T. S. Vilela

Julho de 2002

621(247.3)/Uem 2001/VCLm

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	91217
CDU	621(247.3)
Data	16/4/2007

Queria agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à empresa Soarmoldes a oportunidade proporcionada, bem como a todos aqueles que contribuíram com as suas sugestões para o enriquecimento deste projecto, em especial ao Eng. José Duarte Ribeiro Marafona e ao Eng. Joaquim Manuel Costa.

INDICE

Objectivos	2
Estudo do processo de electroerosão	3
Estudo do eléctrodo.....	12
Regimes de corte.....	17
Análise dos parâmetros da máquina	21
Processo de concepção e fabrico de eléctrodos	24
Descrição do trabalho desenvolvido	31
Descrição da aplicação.....	38
Exemplos práticos.....	48
Implementação	55
Conclusão.....	56
Bibliografia	57
ANEXO.....	58

Objectivos

Os trabalhos de electroerosão a executar nos componentes de moldes, na sua generalidade, estão associados a um consumo significativo de tempo, sendo por vezes de definição complexa e exigindo em muitos casos a execução de um grande numero de eléctrodos para a sua realização.

É por isso de fundamental importância para a optimização desta operação, que sejam tidos em consideração os diversos factores que influenciam directamente a sua rentabilidade.

Como muitas vezes é apenas a experiência dos operadores que dita as regras para a realização destes trabalhos, torna-se importante que sejam desenvolvidos estudos no sentido de tornar sistemática esta análise da operação de electroerosão.

Pretende-se então, a sistematização do processo de análise de eléctrodos considerando os parâmetros fundamentais do processo de electroerosão.

Para uma melhor descrição dos processos envolvidos e da aplicação realizada, utilizou-se linguagem estrutural IDEF0. Com este tipo de linguagem, é possível visualizar correctamente as actividades envolvidas, as suas entradas e saídas. Em *anexo* encontra-se uma descrição do funcionamento desta linguagem.

Estudo do processo de electroerosão

A electroerosão é a técnica utilizada pela indústria para maquinar formas complexas com grande precisão em todo o tipo de materiais que sejam condutores (metais, ligas, grafite, cerâmicas, etc) independentemente da sua dureza.

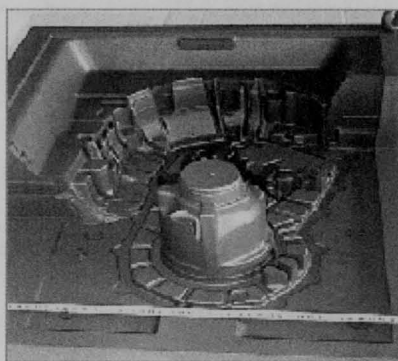


Figura 1 – Exemplo de uma peça feita por electroerosão

Define-se o processo de electroerosão como sendo o método de arranque de material por meio de uma série de descargas eléctricas separadas umas das outras por um certo período de tempo, que saltam entre os pólos (eléctrodo ou ferramenta de trabalho e peça a maquinar).

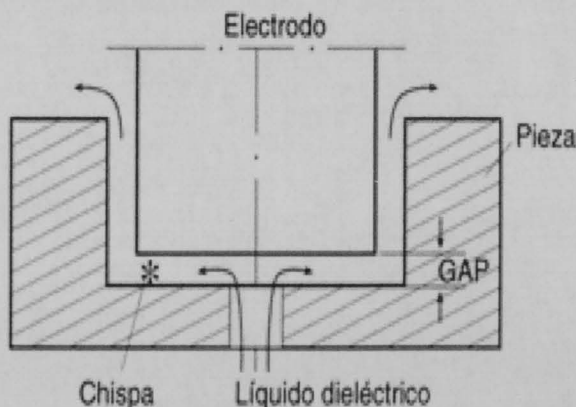
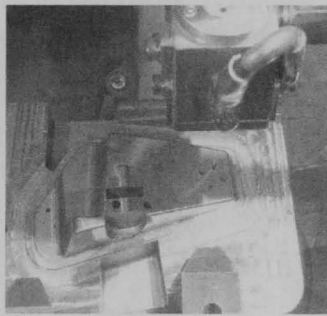


Figura 2 - retirada de “MECANIZADO POR ELECTROEROSION” por José L. Diéguez

Existem dois tipos de máquinas, as de electroerosão por fio e as de electroerosão por penetração, sendo esta o principal objecto de estudo proposto para este projecto.

Electroerosão por fio – breve descrição.

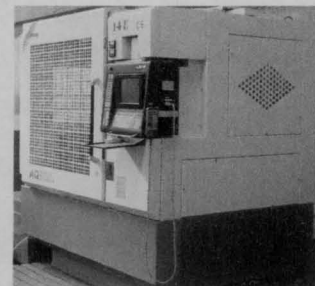
As máquinas de electroerosão por fio são utilizadas para a realização de contornos passantes. A peça move-se em relação ao fio controlada por um sistema de controlo numérico, criando um perfil por corte de material através do fio eléctrico.(tendo sido no fim do corte da peça obtida a forma ou perfil desejado). O corte por electroerosão por fio é conseguido por altas frequências de descargas entre o fio e a peça a trabalhar.



A geometria requerida para a peça é programada usando técnicas computacionais, o que proporciona uma grande flexibilidade na criação de formas geométricas complexas e de grande precisão. Por exemplo, a electroerosão por fio é usada para “moldes de alta precisão” onde são exigidas tolerâncias apertadas, como por exemplo, para integrar componentes de circuitos, componentes de relógios, etc.

Nenhum outro processo fornece tal flexibilidade e precisão. A estabilidade do fio e o excelente corte devido á água desionizada e condições de fluxo do dieléctrico são assim dos parâmetros mais influentes no processo. Para controlar as condições na zona de descarga e a velocidade de movimentação do fio e da peça um relativamente ao outro durante a maquinagem, a máquina de electroerosão por fio possui um sistema de servo controlo.

Na industria de moldes estas máquinas são usadas para inúmeros trabalhos, desde maquinagem de componentes de moldes como na obtenção de eléctrodos para serem utilizados no processo de electroerosão por penetração.



Electroerosão por penetração

Nas máquinas de electroerosão por penetração podem realizar-se contornos passantes e formas cegas. O eléctrodo tem um movimento de aproximação relativamente á peça, marcando a sua forma sobre esta da seguinte forma.

Primeiro uma alta tensão (a tensão fornecida pela máquina, normalmente perto dos 80V) é aplicada entre a ferramenta e a peça a maquinar (gap), a qual causa uma ionização seguida de descarga da qual resulta o efeito de uma avalanche de electrões em direcção ao ânodo.

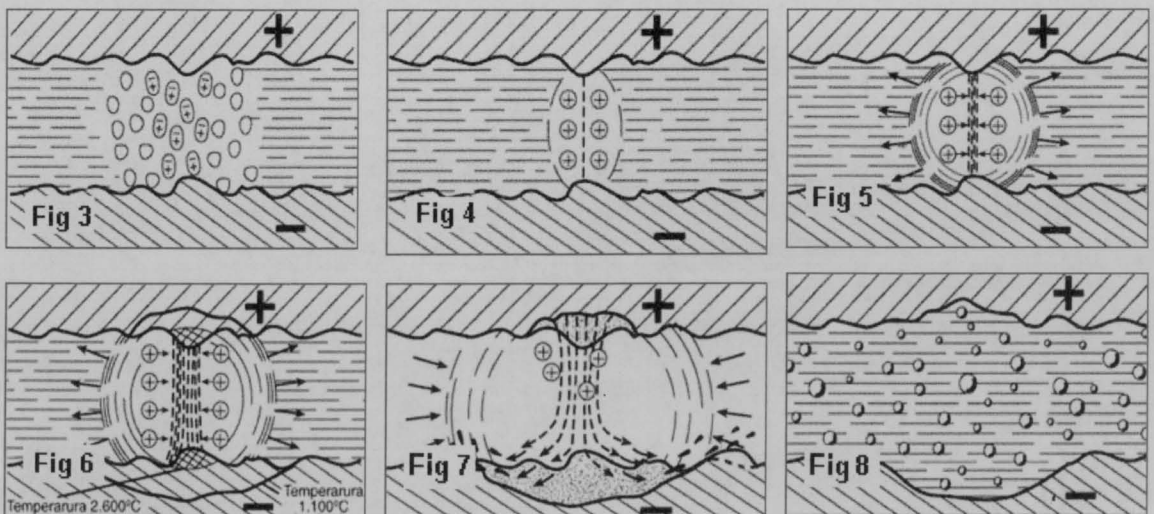
Um pequeno atraso ocorre entre a aplicação do impulso de tensão e a formação do impulso de corrente resultante, o qual é conhecido como atraso de ignição (fig. 3 e 4).

Uma vez estabelecida a corrente eléctrica (fig 5 e 6), a tensão dentro do espaço entre o eléctrodo e a peça (gap) desce para o valor de descarga (aproximadamente 25V), e a corrente eléctrica continua até se extinguir pelo corte da tensão aplicada (fig. 7).

Um intervalo de impulso é depois inserido antes da aplicação do próximo impulso de tensão (fig 8), sendo o intervalo entre impulsos de tensão necessária para a desionização do canal de descarga e para que a próxima descarga ocorra num local diferente e independente.

A fusão de metal ocorre dentro de três estágios distintos:

- A fase de ignição
- A descarga principal
- Fusão local e mesmo vaporização do eléctrodo de metal.



Este processo de maquinagem distingue-se principalmente por duas das suas propriedades:

- A sua grande aptidão para maquinar aços, metais, ligas duras ou refractários, pouco aptas a maquinar pelos processos convencionais de arranque de aparta. Este processo permite a maquinagem de aços temperados e materiais tenazes com alto teor em elementos de liga. Neste processo o arranque de material não depende das características mecânicas do material a trabalhar, mas sim das suas características térmicas.

- Outra propriedade fundamental é a aptidão para realizar formas complexas. Com um eléctrodo, normalmente de cobre ou grafite, feito por meios convencionais, maquina-se a peça, que fica com a forma do negativo do eléctrodo.

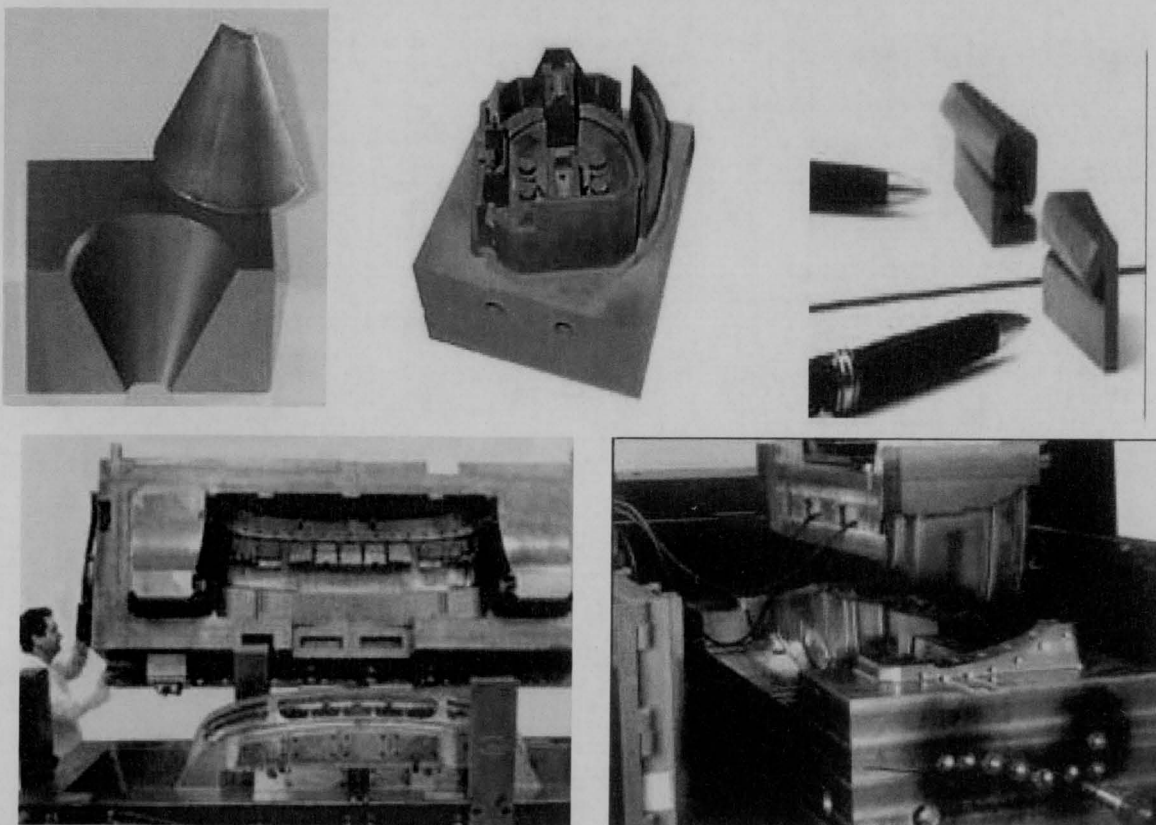


Figura 9 – Vários exemplos de peças obtidas por electroerosão e eléctrodos

O uso do processo de fabrico por electroerosão envolve o conhecimento dos seus principais parâmetros, tais como:

Parametro	Simbolo	Definição
Tempo de impulso	t_i	tempo que dura o impulso de tensão que permite a erosão entre o eléctrodo e a peça
Intensidade de corrente	I_f	intensidade que circula pela gap durante a descarga
Tensão em descarga	U_f	tensão entre o eléctrodo e a peça depois de criada a descarga.
Tensão em vazio	U_o	tensão existente entre o eléctrodo e a peça quando não ha descarga.
Período	t_p	tempo percorrido desde o inicio do impulso até ao inicio do impulso seguinte $t_p = t_i + t_o$
Tempo de pausa	t_o	intervalo de tempo percorrido desde o fim do impulso até ao inicio de outro
Tempo de descarga	t_f	período de tempo durante o qual passa uma corrente de descarga, responsável pela erosão, e que dura até se cortar o impulso de tensão $t_i = t_d + t_f$

A forma de onda que actua no processo de electroerosão pode ser descrita como a seguir se indica, em função dos parâmetros tensão e intensidade de corrente.

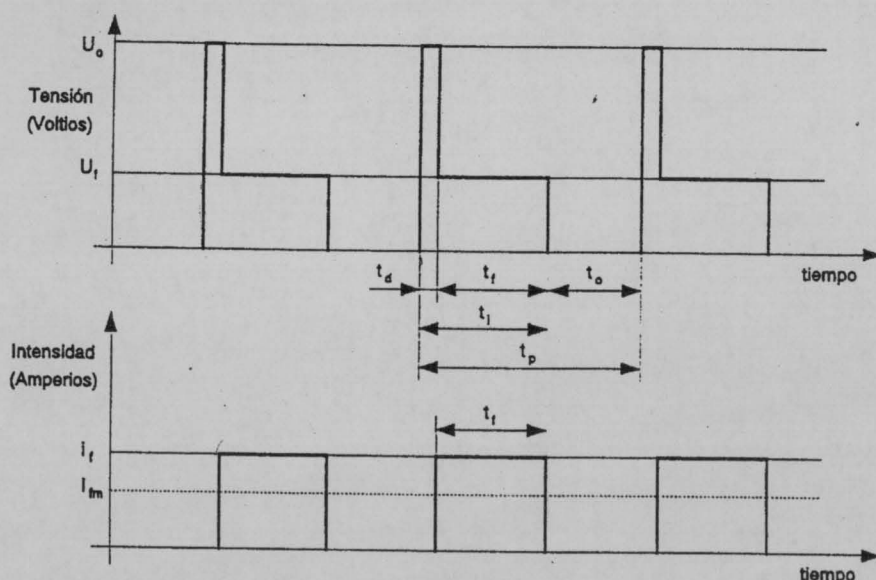


Figura 10 - retirada de "MECANIZADO POR ELECTROEROSION" por José L. Diéguez

A conjugação e alteração destes parâmetros influenciam a velocidade de corte, desgaste do eléctrodo, qualidade de acabamento superficial e na concepção de eléctrodos.

A gap, distancia entre a peça e o eléctrodo que é definida em função dos parâmetros utilizados, tem influência na concepção do eléctrodo e consequente influencia na subespessura a dar ao eléctrodo, como vamos abordar no capítulo do estudo do eléctrodo.

Para rentabilizar o processo temos que estudar o seu comportamento em relação á variação destes parâmetros e saber qual a influência de cada um.

Tempo de impulso

O arranque de material (V_w) aumenta com o aumento do tempo de impulso até um máximo a partir do qual decresce.

Para tempos de impulso curtos o desgaste volumétrico relativo (σ_v) é grande e diminui ao aumentar o tempo de impulso até atingir valores muito baixos.

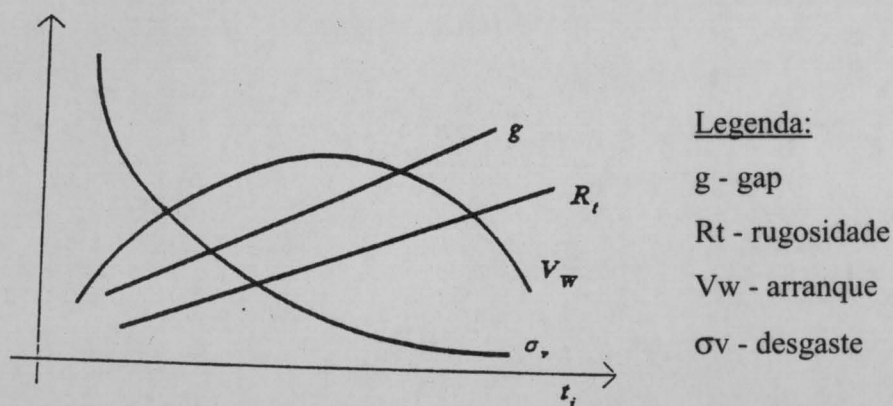


Figura 11 - Variação dos diversos parâmetros de erosão com o tempo de impulso(t_i)

Intensidade de impulso

O arranque de material (V_w), a gap (g), e a rugosidade (R_t) aumentam com o aumento do nível de intensidade.

O desgaste volumétrico relativo (σ_v) da ferramenta aumenta com o aumento da intensidade da corrente como se pode verificar na figura seguinte. Este comportamento é mais notório para grandes impulsos.

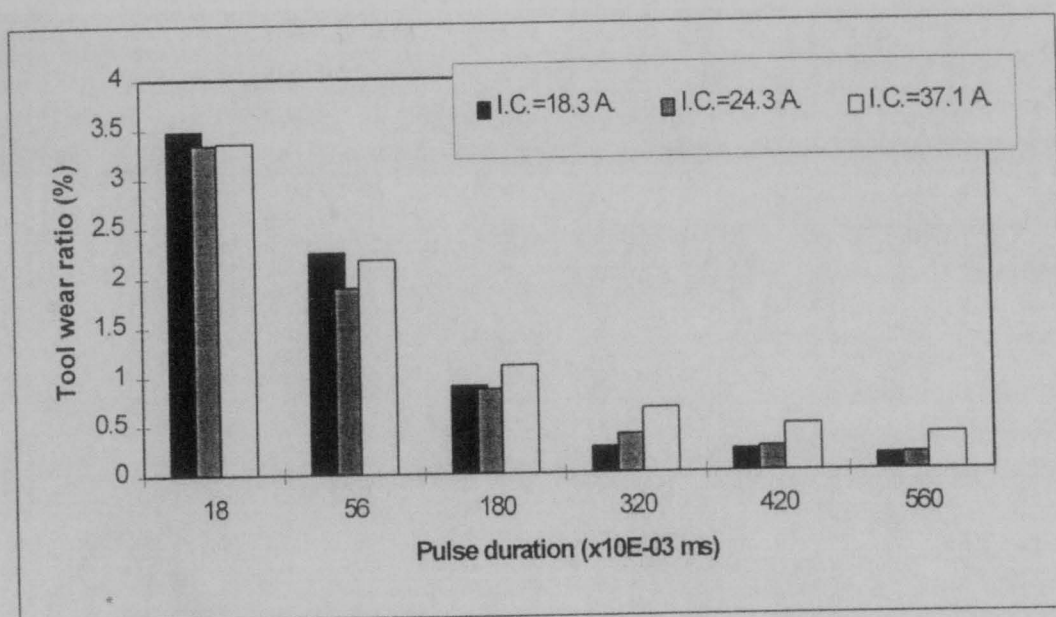


Figura 12 - retirada de "Tecnologia e aplicações da Electroerosão" por Eng. José Duarte Marafona
Variação do desgaste do eléctrodo em função da duração do impulso e da intensidade de corrente.

Tempo de pausa

Se o tempo de pausa for grande, o arranque (V_w) diminui devido a se realizarem menos impulsos por unidade de tempo. Se o tempo de pausa for demasiado pequeno então o arranque também diminui, pois não há tempo para haver uma boa limpeza e podem ocorrer curtos-circuitos.

Com o desgaste volumétrico relativo (σ_v) do eléctrodo ocorre algo parecido, existindo um desgaste mínimo para um ponto de tempo de pausa que depende também dos materiais do eléctrodo e da peça. Este ponto de desgaste mínimo não coincide com o tempo de arranque máximo.

Tanto a gap (g) como a rugosidade total (R_t) não variam com a variação do tempo de pausa. Pode-se afirmar que impulsos que tenham a mesma área dão origem a valores de gap e rugosidades aproximadamente iguais. E quanto maior é essa área, maiores são os valores da gap e da rugosidade.

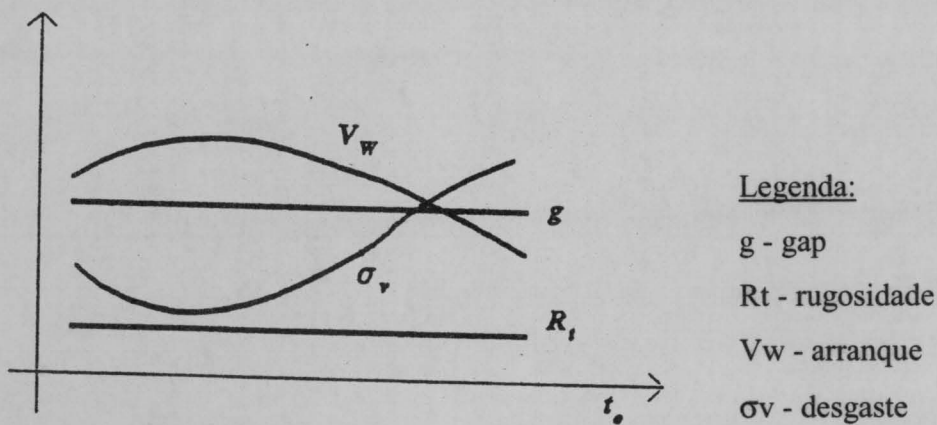


Figura 13 - Variação dos diversos parâmetros de electroerosão com o tempo de pausa.

Acabamento superficial

Uma outra característica importante nos trabalhos efectuados na indústria de moldes é, sem dúvida, o acabamento superficial, ou rugosidade superficial requerida.

O grau de rugosidade depende do tamanho da cratera produzida que por sua vez depende da quantidade de energia utilizada na descarga durante a maquinagem.

Cada descarga remove uma quantidade de material por minuto da peça, deixando uma forma tipo cratera com uma relação entre profundidade/diâmetro de aproximadamente 0,3. Com a continuação da maquinagem por electroerosão, a superfície da peça fica completamente coberta com a sobreposição de crateras, deixando a superfície da peça com um aspecto aleatório relativamente às marcas direccionais típicas dos métodos de maquinagem convencional.

Esta característica da electroerosão dá à peça uma incomparável aparência superficial, que é quantificável por uma escala de comparação VDI (para o acabamento superficial para este processo). O valor VDI está relacionado com a amplitude média aritmética da rugosidade R_a (μm) pela expressão:

$$\text{VDI N.º} = 20 * \log_{10}(10 * R_a)$$

Sendo a quantidade de energia da descarga igual ao produto da intensidade da corrente pela duração do impulso, é possível constatar que os acabamentos superficiais mais finos deverão ser efectuados com baixas intensidades de corrente e pequenos impulsos.

Estudo do eléctrodo

Partindo do princípio que qualquer material condutor pode ser utilizado para fabricar eléctrodos, a experiência mostra que existem materiais com melhores comportamentos que outros.

O principal problema dos eléctrodos é o desgaste. Como existe erosão nos dois pólos (peça e eléctrodo), define-se por desgaste a erosão do eléctrodo e é dado pela percentagem volumétrica entre os volumes de material removido do eléctrodo e da peça a trabalhar.

O desejável é que o desgaste do eléctrodo seja mínimo, e para isso se tornar verdade, o material deve ter as seguintes características:

- **Alto ponto de fusão** – dado que a electroerosão é um processo térmico em que se alcançam temperaturas muito elevadas em cada impulso em pontos localizados, fundindo assim pequenas quantidades de material quer do eléctrodo quer da peça, é lógico pensar que quanto mais alto for o ponto de fusão do material do eléctrodo, menos quantidade deste material se fundirá e portanto terá menos desgaste.

- **Boa condutividade térmica e elétrica** – como o calor se dá em pontos localizados e em tempos muito curtos, uma boa condutividade fará que o calor, que a descarga concentrou num ponto, se difunda rapidamente pelo resto do eléctrodo. Desta forma não se eleva tanto a temperatura no ponto de descarga, e portanto, fundirá menos quantidade de material do eléctrodo, o que quer dizer que haverá menos desgaste.

Outros aspectos a ter em conta são as **propriedades mecânicas** dos materiais, pois devem ser facilmente maquinados, devem ter um **coeficiente de dilatação** o mais pequeno possível, para não aumentar as medidas do eléctrodo durante o processo e consequente alteração nas medidas da peça. Os materiais devem também ter um **peso específico** baixo, pois por vezes são necessários eléctrodos com grande volume, e ter uma boa **estabilidade dimensional**, pois depois de sofrer tratamentos térmicos alguns materiais têm tensões internas que tem tendência a libertarem-se com o calor produzido durante o processo.

Estes materiais podem dividir-se em dois grupos:

- Materiais metálicos
- Materiais não metálicos

Os materiais mais comuns utilizados no fabrico de eléctrodos dentro do grupo de materiais metálicos são o cobre e o aço.

As vantagens de se utilizar o cobre no fabrico de eléctrodos são:

- O alto rendimento (relação arranque / desgaste alta)
- Estabilidade dimensional
- Baixos valores de desgaste
- Obtenção de acabamentos muito finos

Os inconvenientes são:

- Peso específico elevado
- Fornecido em dimensões muito reduzidas

O material mais usado do grupo dos materiais não metálicos é a grafite.

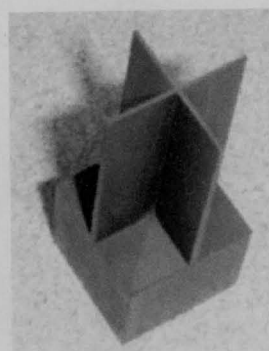
A grafite não é um material no verdadeiro sentido da palavra, e está disponível numa larga variedade de tipos de material (densidades), e também em formas impregnadas de cobre. O seu preço varia de acordo com as características, mas não é barato. Grafite com alta densidade é por vezes usado em acabamentos. A grafite não tem ponto de fusão, mas de sublimação, e por isso suporta elevadas potências de maquinagem com baixo desgaste.

As vantagens de se utilizar grafite no fabrico de eléctrodos são:

- Facilmente maquinável
- Coeficiente de dilatação 4 a 5 vezes o do cobre
- Peso específico baixo ($1,75-1,85 \text{ Kg/dm}^3$)
- Tem grande estabilidade dimensional

Os principais inconvenientes da grafite são:

- Só pode ser obtida por maquinagem a alta velocidade.
- A rugosidade mínima que se pode alcançar esta na ordem dos 27-30 VDI



As operações com electroerosão podem ser tão precisas quanto o eléctrodo utilizado. As técnicas de maquinagem convencional são adoptadas, porém o requerimento de subdimensionamento é muito importante, e detalhes de subdimensionamento deverão ser sempre fornecidos no trabalho de desenho dos eléctrodos.

Devido á necessidade da existência de um espaço entre eléctrodo e peça (gap) e á existência de uma rugosidade na peça, temos que contar com estas distâncias para dimensionar os eléctrodos.

Temos que ter em conta tolerâncias para as diversas contrariedades que possam acontecer durante o processo de electroerosão, como vibrações, fixação do eléctrodo defeituosa, más condições de limpeza, etc. Para isso utiliza-se uma sobre medida de segurança (Sm).

A equação seguinte é utilizada para dimensionar eléctrodos de desbaste.

$$M_e = M_{\text{nominal}} - 2 (R_t + \text{gap} + \text{Sm})$$

M_e – medida do eléctrodo

M_{nominal} – medida nominal

R_t – rugosidade

Para acabamentos a equação sofre algumas alterações:

$$M_e = M_{\text{nominal}} - 2 (R_t + \text{gap}) \quad \text{ou, se não se pretende polir, } M_e = M_{\text{nominal}} - 2 \text{ gap}$$

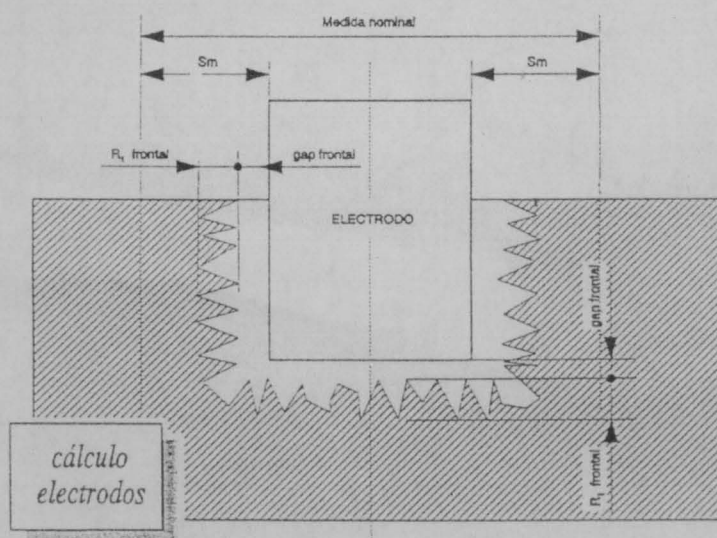


Figura 14 - retirada de "MECANIZADO POR ELECTROEROSION" por José L. Diéguez

Orbitas na operação de electroerosão

A subdimensão dada ao eléctrodo pode ser utilizada em conjunto com um meio auxiliar desenvolvido pelos fabricantes das máquinas. Esse meio auxiliar é a utilização de um movimento orbital dado ao eléctrodo por um mecanismo especial incorporado ou como acessório. O eléctrodo descreve um movimento orbital, alargando assim o seu tamanho efectivo de uma quantidade igual a toda a volta no plano orbital. Se o eléctrodo não sofrer um desgaste inaceitável, e assim uma descaracterização da forma, este alargamento instantâneo desenvolvido pode ser usado, substituindo a necessidade de utilização de outro eléctrodo, para fins de acabamento.

Durante o desbaste o movimento orbital é colocado a zero, mas entrando no estágio de acabamento, o raio orbital é progressivamente incrementado, removendo assim a superfície rugosa, obtendo-se um acabamento superficial de acordo com as condições do gerador de impulsos usadas.

Existem vários tipos de orbitas, como mostram as figuras seguintes.

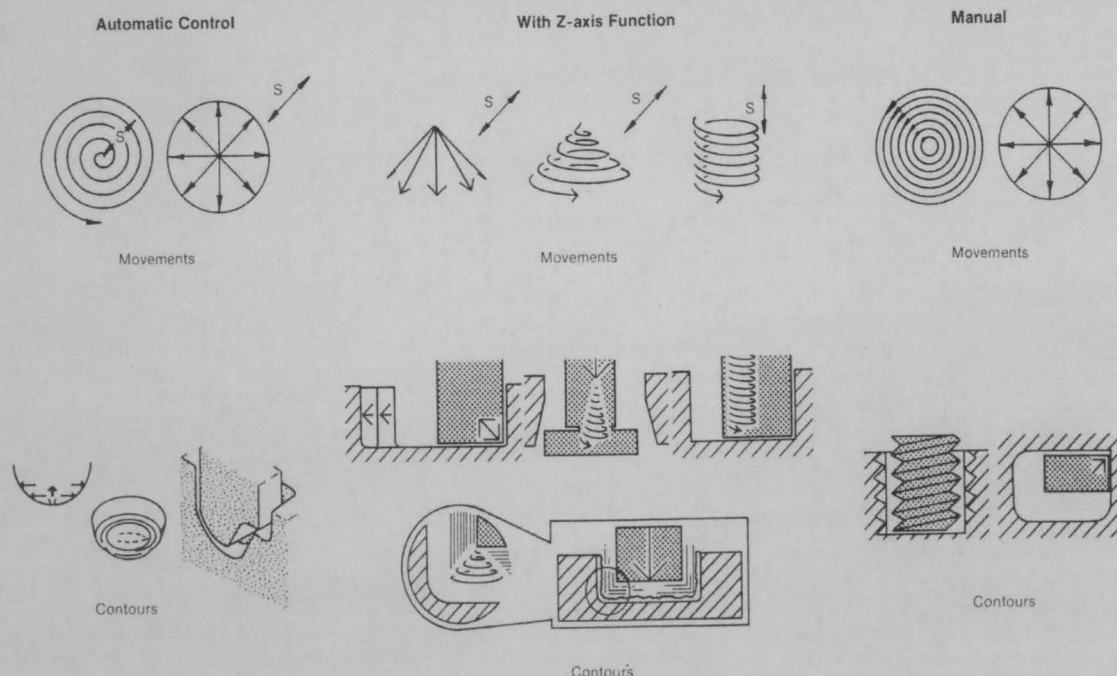


Figura 15 - retirada da página WEB do fabricante ONA

O movimento orbital traduz-se em diversas vantagens, tais como:

- Melhores condições de limpeza, que se traduz no aumento de rendimento do processo.
- Redução de desgaste do eléctrodo o que eleva o grau de precisão.
- Redução do número de eléctrodos necessário a execução do trabalho, permitindo que o eléctrodo com um gap de desbaste seja usado para acabamento.

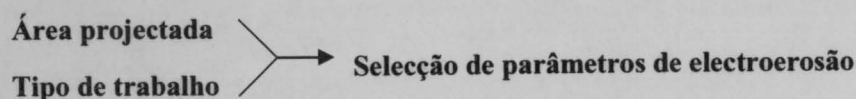
Regimes de corte

Entende-se por regime de corte o conjunto de parâmetros que ditam a velocidade de arranque de material, o desgaste do eléctrodo e a rugosidade superficial. Esse regime é escolhido pelo operador, de acordo com o tipo de trabalho a efectuar e o grau de acabamento pretendido. O operador escolhe o conjunto de parâmetros que permitem executar o trabalho pretendido com menor desgaste do eléctrodo e menor tempo de maquinagem, isto é, procura um compromisso para os vários parâmetros por forma a otimizar o processo.

Os principais parâmetros que definem um regime são a **intensidade de corrente**, o **tempo de impulso** e o **tempo de pausa**. Estes parâmetros são escolhidos de acordo com o tipo de trabalho, a área projectada a maquinar e material da peça.

É com base nestes três factores que vamos definir os regimes de corte.

A área projectada a maquinar em conjunto com o tipo de trabalho condiciona os parâmetros a escolher por parte do operador.



Regra geral, áreas projectadas maiores devem ser maquinadas com valores de intensidade de corrente e tempos de impulso maiores.

Existem tipos de trabalho, como o caso das nervuras e enquinamentos, que logo à partida vão ter uma área projectada a maquinar muito pequena, por vezes difícil de quantificar. Para estes tipos de trabalho o operador tem que estar atento ao rendimento do processo para fazer ajustes na escolha dos parâmetros durante a erosão.

O material da peça vai influenciar a escolha do material do eléctrodo e também a escolha dos parâmetros, uma vez que o rendimento do processo varia para cada par de materiais eléctrodo/peça, tendo o operador que ajustar os parâmetros para os que mais se adequam a cada tipo de materiais.

Podemos dividir os regimes em dois grandes grupos:

- Desbaste
- Acabamentos

O **desbaste** é feito quando existem áreas a maquinar de grandes dimensões, isto é, existe uma grande quantidade de material a remover da peça até atingir a geometria final pretendida.

Para operações de desbaste, interessa boa capacidade de arranque de material em curto espaço de tempo, e para isso utilizam-se grandes intensidades de corrente conjugado com grandes tempos de impulso para se obter um maior arranque de material com um menor desgaste do eléctrodo. Estes tipos de regimes obrigam à execução de eléctrodos com subespessuras maiores, pois o valor da gap aumenta com o aumento da intensidade de corrente.

A geometria obtida com estes parâmetros é um esboço da geometria final, com uma rugosidade bastante elevada e dimensões ainda distantes das dimensões pretendidas. Para aproximar à geometria final, mas ainda com uma rugosidade superficial elevada, que normalmente não é o pretendido, utilizam-se regimes intermédios entre desbaste e acabamento, que são designados por regimes de pré-acabamento. Estes regimes caracterizam-se por gamas de intensidades de corrente e de tempos de impulso intermédias entre os valores de desbaste e de acabamento.

Para se obter a geometria final com a rugosidade superficial pretendida, passa-se a trabalhar com regimes de acabamento, podendo optar-se por duas soluções:

- Escolher um regime com valores de intensidade de corrente e tempos de impulso mais baixos que leve à gap adequada e à rugosidade pretendida e fabricar outro eléctrodo com uma subespessura mais aproximada às dimensões finais da peça.
- Baixar os valores da intensidade e tempos de impulso, em sincronismo com orbitas adequadas, se a máquina assim o permitir, com o intuito de compensar a consequente diminuição da gap e obter a geometria com dimensões e rugosidade superficial pretendidas.

Recuperação do eléctrodo

Na maior parte das vezes, depois de uma operação de desbaste, o eléctrodo sofre algum desgaste e perde a geometria pretendida. Para dar a geometria pretendida á peça com o mesmo eléctrodo, este tem que ser recuperado. Esta recuperação implica tempo de maquinagem do eléctrodo, tempo de pausa da máquina de electroerosão, e consequente baixa de rendimento na produção, o que leva a optar-se mais vezes pela primeira solução, que mesmo tendo como consequência o fabrico de outro eléctrodo o que implica a utilização mais material de eléctrodo, compensa no que diz respeito ao rendimento da produção.

Limpeza na operação de electroerosão

Em todos os regimes temos ainda que contar com as condições de limpeza durante o processo de electroerosão. Estas condições variam de acordo com o tipo de trabalho e/ou tipo de eléctrodo, uma vez que se podem fabricar eléctrodos de maneira a facilitar as condições de limpeza.

Condições de limpeza deficientes levam ao abaixamento do rendimento do processo de maquinagem por electroerosão.

Para contrariar essas condições, o operador pode alterar parâmetros do processo como, o aumento do tempo de pausa e o período de tempo de “jump up” (elevação do eléctrodo durante o tempo de pausa), e/ou alterar os parâmetros do fluido como a pressão e o modo de injeção ou sucção.

Estratégia de erosão

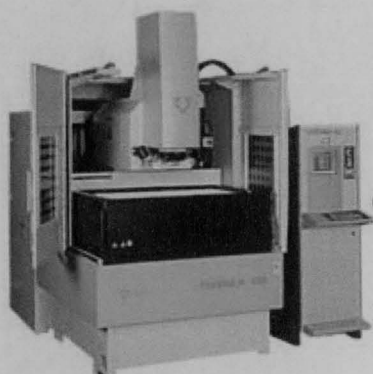
A um conjunto de regimes de corte para o mesmo eléctrodo no processo de electroerosão designa-se por estratégia de maquinagem. Este conceito de estratégia de maquinagem foi introduzido pelos fabricantes nas máquinas de electroerosão, os quais desenvolveram meios para que as máquinas aceitassem a introdução por parte do operador de um conjunto de regimes de corte, que simultaneamente com as orbitas apropriadas permite que se aproxime o mais possível da geometria pretendida com um só eléctrodo. Isto só é possível enquanto o desgaste do eléctrodo se mantiver aceitável, depois terá que se optar por uma das duas soluções apresentadas anteriormente.

Análise dos parâmetros da máquina

Este projecto foi elaborado com base, essencialmente, em dois grupos de máquinas, perfazendo um total de três máquinas de electroerosão. Destas, duas são do mesmo fabricante (ONA) e tem praticamente as mesmas características, sendo a ultima pertencente ao fabricante Mitsubishi.

Especificações das máquinas:

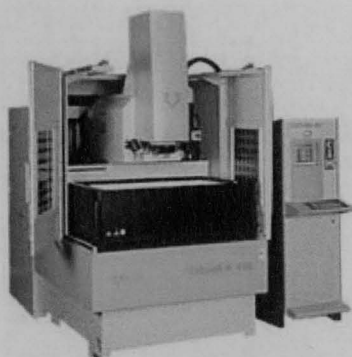
ONA - TECHNO serie "H - 600"



Curso dos eixos X/Y	1000 x 600mm
Curso do porta-eléctrodos	500mm
Distância máxima entre a cabeçal e mesa	800mm
Dimensões internas do tanque (comprimento x largura x altura)	700x1000x600mm
Mesa de trabalho	1200x800mm
Peso admissível na mesa	4000Kg.

Máximo peso do eléctrodo	400 Kg.
"Potência"	60 – 120 Amp.
Carenado Integral	Standard
Filtro ecológico (Mín 10000 horas de trabalho)	Standard
Filtro totalmente automatizado	Standard
Alimentador de eléctrodos	Opcional
Gerador para acabamento superficial até VDI=0	Standard
Controlo simultâneo dos 4 eixos	Eje "C" Opcional
Sistema experto de erosão	Standard
Comando remoto	Standard

ONA - TECHNO serie "H - 700"

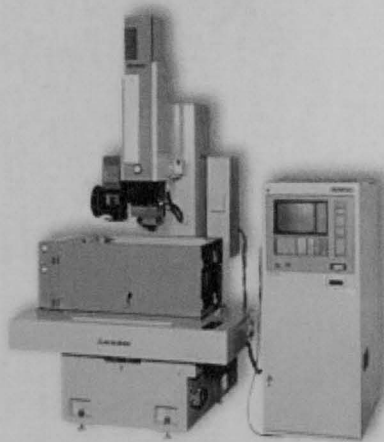


Curso dos eixos X/Y	1500 x 750 mm
Curso do porta-eléctrodos	500 mm
Distância máxima entre a cabeça e mesa	1000 mm
Dimensões internas do tanque (comprimento x largura x altura)	2300x1300x700 mm
Mesa de trabalho	1700 x 1000 mm
Peso admissível na mesa	10000 Kg.
Máximo peso do eléctrodo	400 Kg.
"Potência"	60 – 120 Amp.
Carenado Integral	

Standard

Filtro ecológico (Mín 10000 horas de trabalho)	Standard
Filtro totalmente automatizado	Standard
Alimentador de eléctrodos	Opcional
Gerador para acabamento superficial até VDI=0	Standard
Controlo simultâneo dos 4 eixos	Eje "C" Opcional
Sistema experto de erosão	Standard
Comando remoto	Standard

MITSUBISHI serie "M55 J"



Curso do eixo X	450 mm
Curso do eixo Y	350 mm
Distância máxima entre a cabeça e mesa	600 mm
Dimensões internas do tanque (comprimento x largura x altura)	100x650x410mm
Mesa de trabalho	800 x 600 mm
Peso admissível na mesa	3700Kg.
Máximo peso do eléctrodo	200Kg.
"Potência"	60 – 100Amp.

Tabelas de electroerosão

Para a maquinação de metais por electroerosão os fabricantes sugerem algumas combinações de parâmetros com os respectivos efeitos na velocidade de corte (quantidade de material arrancado), no desgaste volumétrico do eléctrodo e na rugosidade superficial sob a forma de tabelas.

Os valores indicados nessas tabelas resultam de ensaios práticos realizados em condições de laboratório.

Esses valores podem ser ajustados com o fim de obter um maior rendimento, consoante o tipo de trabalho que se estiver a executar. Em electroerosão a experiência do operador determina os ajustes de valores de intensidade, tensão, tempo de impulso, tempo de pausa, tipo de limpeza, polaridade, etc., de acordo com o comportamento dos materiais a maquinar e do eléctrodo, por forma a encontrar as condições que julgue mais adequadas para a aplicação em causa.

As tabelas fornecidas pelos fabricantes são elaboradas, principalmente, em função da área projectada a maquinar, material do eléctrodo e da rugosidade superficial pretendida.

Estas máquinas permitem a criação de estratégias de maquinação, com orbitas desde circulares ou quadradas até orbitas mais complexas, como o caso das orbitas 3D, para compensar a espessura do eléctrodo de regime para regime.

Para que o operador tenha um meio de orientação, os fabricantes destas máquinas também forneceram tabelas de estratégias com as compensações necessárias, elaboradas do mesmo modo que as tabelas de combinações de parâmetros.

Foi com base nestas tabelas, de parâmetros e de estratégias de electroerosão, que foi criada a sistematização do processo de análise de eléctrodos, pretendida com este projecto.

Processo de concepção e fabrico de eléctrodos

O processo de concepção e fabrico de eléctrodos pode ser dividido em três grandes actividades:

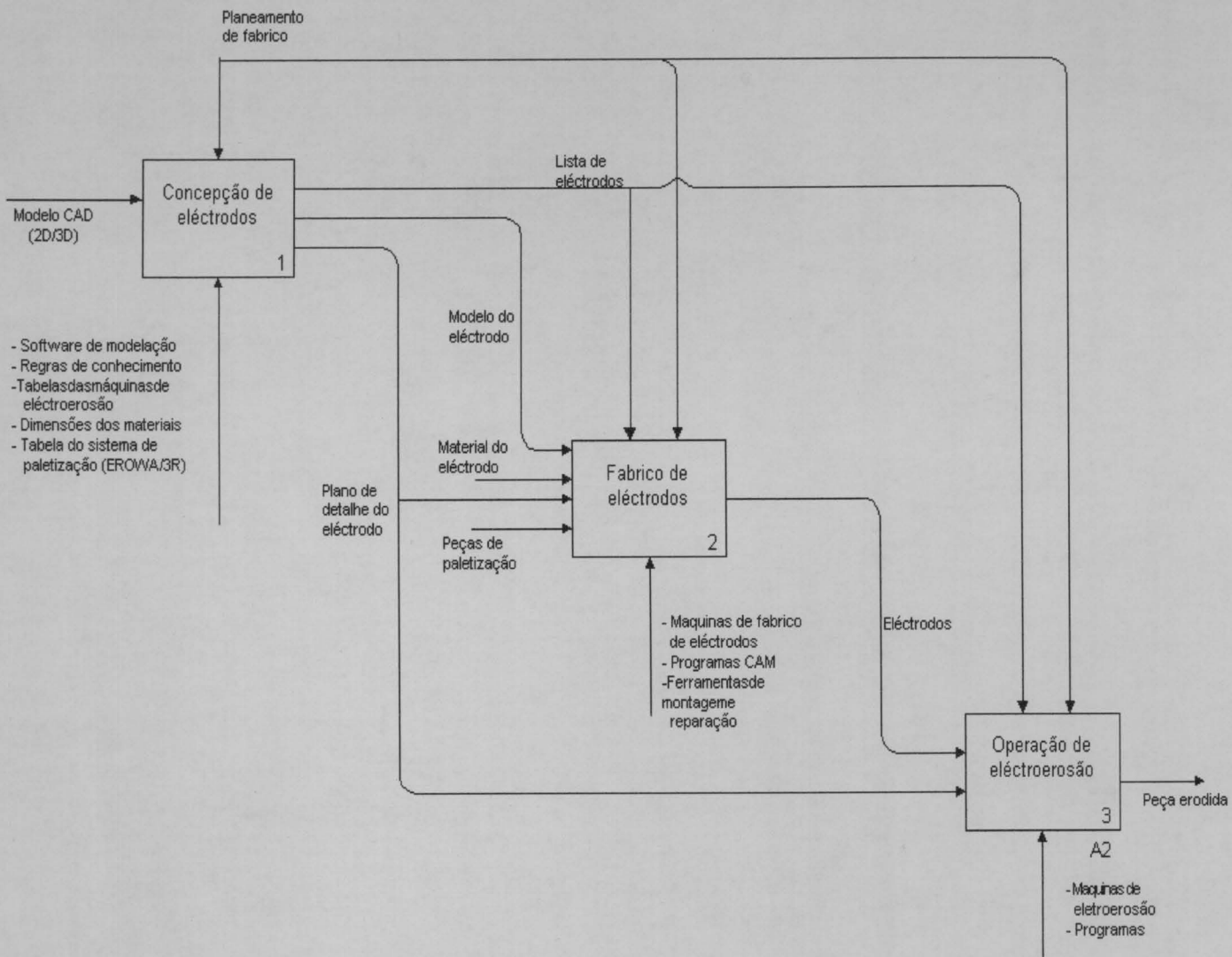
- Concepção de eléctrodos
- Fabrico de eléctrodos
- Operação de electroerosão

Preparação da operação de electroerosão

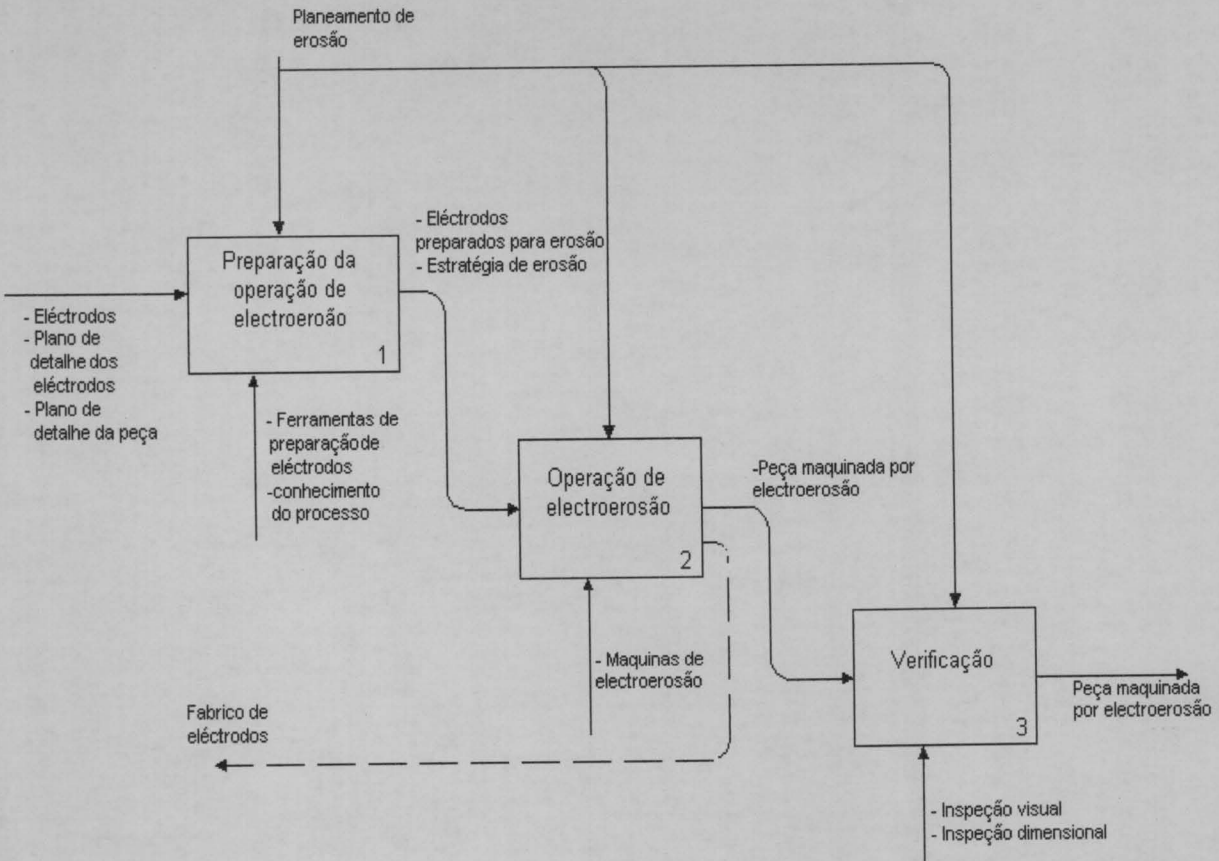
Operação de electroerosão

Verificação

Todas estas actividades estão interligadas como podemos verificar nos seguintes diagramas de blocos (*IDEF0*) em que são especificadas além das actividades descritas as entradas para o sistema assim como o resultado final (saídas).



NODE:	A1	TITLE:	MODELO DO PROCESSO DE ELECTROEROSÃO DE UM COMPONENTE	NO.:
-------	----	--------	--	------



NODE:

A2

TITLE:

DETALHE DA ACTIVIDADE DE OPERAÇÃO DE ELECTROEROSÃO

NO.:

Descrição dos diagramas

Concepção de eléctrodos

A actividade de ***concepção de eléctrodos*** corresponde a toda a fase em que o eléctrodo esta a ser desenvolvido.

Os modelos (3D) e desenhos (2D) são tudo o que temos como dados de entrada para esta fase e com a ajuda de softwares de modelação, tabelas das máquinas de electroerosão, tabelas de paletização e regras de conhecimento, ficam definidos o modelo do eléctrodo, plano de detalhe do eléctrodo e lista de eléctrodos.

Os resultados desta actividade são os documentos de processo:

- Lista de eléctrodos
- Plano de detalhe de eléctrodo

Toda esta actividade tem como controlo o planeamento de fabrico.

Uma vez feita a concepção do eléctrodo, passa-se á actividade de ***fabrico de eléctrodos***, que com o modelo do eléctrodo, material do eléctrodo, plano de detalhe do eléctrodo e peças de paletização desenvolvidos na concepção de eléctrodos executa o fabrico do eléctrodo.

Para o fabrico do eléctrodo os meios disponíveis são as máquinas de fabrico de eléctrodos, programas CAM e ferramentas de montagem e preparação de eléctrodos.

Isto tudo é controlado pelo planeamento de fabrico e pela lista de eléctrodos.

Depois de fabricado o eléctrodo, este passa a integrar a actividade seguinte, ***operação de electroerosão***, juntamente com o plano de detalhe do eléctrodo, para que em máquinas de electroerosão com os programas apropriados se obtenham a maquinagem por electroerosão das peças pretendidas.

No diagrama de detalhe da operação de electroerosão, pode verificar-se a existência de três sub-actividades.

Na primeira sub-actividade, a *preparação da operação de electroerosão*, analisa-se o trabalho do ponto de vista de localização dos eléctrodos e estudo da estratégia a seguir na operação (sequência de eléctrodos na operação de electroerosão), contando para esse efeito com os eléctrodos, o plano de detalhe dos eléctrodos e o plano de detalhe das peças.

Para efectuar a tarefa de preparação dos eléctrodos utilizam-se ferramentas de preparação de eléctrodos e o conhecimento do processo.

Como resultado da preparação obtemos os eléctrodos preparados para electroerosão e as estratégias de electroerosão para cada eléctrodo, com o controlo do planeamento de erosão.

A sub-actividade seguinte é a *operação de electroerosão* propriamente dita, existindo a possibilidade de ser necessário reparar o eléctrodo, devido ao desgaste, ou outros factores, tendo este que retornar á actividade de fabrico de eléctrodos para se proceder a essa reparação (recuperação da forma inicial).

Esta sub-actividade é também controlada pelo planeamento de erosão.

Por fim, a sub-actividade de *verificação*. Nesta sub-actividade faz-se a inspecção visual e dimensional da peça maquinada por electroerosão, obtendo-se assim a peça maquinada por electroerosão.

Em algumas actividades fez-se referencia a um sistema de paletização. Este sistema é um sistema de fixação que permite a automatização do processo de fabrico e electroerosão.

Os eléctrodos são encastrados em peças standard que por sua vez encaixam em peças de suporte apropriadas que são acopladas nas máquinas.

Com este tipo de sistema, as referencias de posicionamento ficam determinadas e os eixos alinhados, eliminando tempos de preparação da operação e permitindo a automatização das operações.

Documentos do processo

O processo de concepção e fabrico de eléctrodos tem que fornecer a documentação necessária para que se identifiquem e registem os eléctrodos, assim como se explicitam os dados do eléctrodo. Para que isso aconteça, o desenvolvimento do método para a sistematização do processo de análise de eléctrodos, além de fornecer ao utilizador dados sobre os parâmetros a utilizar na maquinagem e subespessuras desse eléctrodo, tem também que fornecer a documentação necessária para acompanhar o eléctrodo durante todo o processo, e para ficar com registos desse eléctrodo.

Os documentos existentes e indispensáveis são a folha de eléctrodo e a lista de eléctrodos.

Depois de um breve estudo sobre a documentação necessária e indispensável, optou-se por acrescentar alguns campos á folha de eléctrodo já existente, e manter todos os outros documentos sem quaisquer alterações.

A folha de eléctrodo contém o desenho de eléctrodo elaborado na secção CAD e é o documento enviado para a secção de fabrico do eléctrodo. Esta acompanha o eléctrodo até á sua utilização como ferramenta na secção de electroerosão, pelo que tem que conter informação para estes dois últimos sectores.

A folha de eléctrodo contém a informação necessária ao seu fabrico, e nela estão definidas: o desenho com as respectivas medidas; material a utilizar no fabrico do eléctrodo; e quantidade de eléctrodos a fabricar.

Sendo acrescentado, consoante o tipo de trabalho, um campo indicativo da necessidade de um furo para escape de gases.

As informações contidas na *folha de eléctrodo para a secção de electroerosão*:

- Subespessura dada ao eléctrodo;
- Qual a peça que vai maquinar, e se maquina em conjunto várias peças do molde já montadas ou individualmente;
- Localização exacta onde vai maquinar.

Como complemento à informação dada para a secção de electroerosão, e com base no método desenvolvido para análise sistemática de eléctrodos, acrescentaram-se quais os parâmetros a introduzir, para desbaste e acabamento, pelo operador, que até então era desnecessário pelo facto de ser o operador que com a sua experiência escolhia quais os parâmetros a utilizar.

Como consideramos apenas duas máquinas, e uma vez que quando a informação é acrescentada a folha de eléctrodo não se sabe qual a máquina que vai efectuar o trabalho, foram acrescentados os parâmetros a utilizar para cada uma das máquinas.

Uma lista de eléctrodos, para cada molde, vai também sendo actualizada á medida que se vão fabricando os eléctrodos. Esta lista, que acompanha o molde na secção de electroerosão, tem como objectivo o registo e identificação de cada eléctrodo, e serve também para o operador marcar quais os eléctrodos que já foram utilizados, obtendo assim uma informação de qual a situação em que se encontra o molde nesta secção (se ainda faltam muitos eléctrodos para utilizar ou não).

Pode ainda obter-se documentos com informação de pedidos de material para a fabricação de eléctrodos, contendo este documento a informação de qual o material pedido, as dimensões, e a quantidade.

Descrição do trabalho desenvolvido

Como vimos até agora, o processo de maquinagem por electroerosão não tem um comportamento tão estável como um processo de maquinagem convencional. Existem variações instantâneas do comportamento durante todo o processo de electroerosão provenientes de diversos factores como a limpeza, temperatura ambiente, condições de trabalho, etc.

Para criar um método de sistematização do processo de análise de eléctrodos, optou-se por elaborar uma aplicação informática que torna possível, com base nos factores mais influentes do processo, obter a informação de qual o regime aconselhado para cada uma das máquinas associadas a este projecto.

Para esta aplicação satisfazer as necessidades da empresa, começou por se estudar as seguintes áreas:

- Tipos de trabalhos mais frequentes;
- Tipo de material usados nos componentes;
- Limitações tecnológicas do processo de maquinagem de eléctrodos.

Limitações tecnológicas

A aplicação desenvolvida tem como base os recursos específicos no circuito de fabrico de eléctrodos.

Por vezes é necessário encontrar um compromisso entre estes factores de maneira a fabricar um eléctrodo com as melhores características dentro das possibilidades e mecanismos da empresa. Este tipo de factores introduz limitações que devem ser implementadas na aplicação.

Existem algumas restrições tecnológicas do processo de maquinagem de eléctrodos, que passamos a citar:

Espessura mínima.

Se o eléctrodo tiver partes com espessura mínima menor que 1 mm então o material do eléctrodo deve ser grafite.

Altura máxima para grafite

Se esse eléctrodo tiver uma altura superior a 80 mm, que é a altura máxima permitida para a máquina de fresar grafite.

Maquinado por electroerosão por fio

Se tiver que ser maquinado por electroerosão por fio, então o material escolhido para o eléctrodo terá que ser cobre.

Limitações de material (medidas disponíveis)

Se o eléctrodo ultrapassar um diâmetro de 80 mm, ou medidas superiores a um quadrado de $80 \times 80 \text{ mm}^2$, então o material escolhido deve ser grafite, pois um diâmetro de 80 mm ou um quadrado de $80 \times 80 \text{ mm}^2$ é o limite máximo para encomendas de cobre.

Depois de ultrapassada esta fase, passou a estudar-se o modo de funcionamento das máquinas que integram este projecto.

Especificações das máquinas de electroerosão → criação de tabelas de parâmetros

Constatou-se, como vimos anteriormente, que os parâmetros de ambos os grupos de máquinas são determinados em função:

- Áreas projectadas a maquinar
- Par de materiais do eléctrodo e da peça
- Rugosidade superficial pretendida.

Constatou-se também que optando pelos parâmetros sugeridos pelas tabelas de regimes e estratégias de maquinagem dos fabricantes obtemos melhores resultados comparando com os resultados esperados. Assim optou-se por utilizar as tabelas sugeridas pelos fabricantes, como base para a escolha dos parâmetros.

Para obtermos bons rendimentos utilizando os dois grupos de máquinas, foi feito o cruzamento da informação sugerida por um e por outro fabricante, ajustando os parâmetros de modo a obter como resposta um regime com bom rendimento para ambos os grupos de máquinas e conseguir assim a sistematização do processo.

Para isso foi criada uma estrutura tipo de tabelas de parâmetros, próprias para a aplicação desenvolvida numa ultima etapa deste projecto, como as que podemos ver nas figuras das páginas seguintes.

Tabelas para o par de materiais Cobre – Aço

Máquina: MITSUBISHI serie "M55 J"

Área (mm ²)	Nº Eléctrodos		
	1	2	
25 (5x5)	8000	8006	Desb
		8007	Acab
50 (7x7)	8001	8008	Desb
		8009	Acab
100 (10x10)	8002	8010	Desb
		8011	Acab
200 (14x14)	8003	8012	Desb
		8013	Acab
400 (20x20)	8004	8014	Desb
		8015	Acab
800 (28x28)	8005	8016	Desb
		8017	Acab

VDI	M. Pack	Prog.1	Prog.2	Prog.3	Prog.4	Prog.5	Prog.6
	8000	9627	9948	9951	9952		
	8001	9631	9945	9948	9951	9952	
	8002	9636	9945	9948	9951	9952	
	8003	9641	9941	9945	9948	9951	9952
	8004	9646	9941	9945	9948	9951	9952
	8005	9649	9941	9945	9948	9951	9952
	8006	9626	9945				
	8007	9957	9948	9951	9952		
22	8008	9630	9945				
CUST6F	8009	9957	9948	9951	9952		
	8010	9635	9941	9945			
	8011	9957	9948	9951	9952		
	8012	9940	9941	9945			
	8013	9957	9948	9951	9952		
	8014	9644	9941	9945			
	8015	9957	9948	9951	9952		
	8016	9647	9941	9945			
	8017	9957	9948	9951	9952		
	8000	9627	9948	9951			
	8001	9631	9945	9948	9951		
	8002	9636	9945	9948	9951		
	8003	9641	9941	9945	9948	9951	
	8004	9646	9941	9945	9948	9951	
	8005	9649	9941	9945	9948	9951	
	8006	9626	9945				
	8007	9957	9948	9951			
26	8008	9630	9945				
CUST10F	8009	9957	9948	9951			
	8010	9635	9941	9945			
	8011	9957	9948	9951			
	8012	9940	9941	9945			
	8013	9957	9948	9951			
	8014	9644	9941	9945			
	8015	9957	9948	9951			
	8016	9647	9941	9945			
	8017	9957	9948	9951			

	Progr.	9626	9627	9630	9631	9635	9636
	Ip	2,5	2,3	3,5	2,5	4,5	3,5
	Ti	6,5	6,0	8,0	6,5	9,0	8,0
	Tp	8,0	7,5	8,5	6,5	9,0	5,5
	VDI	36	32	41	36	44	41
	GAP						
	Cons.Ele. [%]	0.2	0.2	0.15	0.2	0.15	0.15
	Veloc.Maq. [mm ³ /min]	3.08	2.05	10.51	6.03	36.92	21.03
VDI 22	ΔZ	88	62	157	88	259	157
	ΔR	110	90	170	110	240	160
VDI 26	ΔZ	78	52	147	78	249	147
	ΔR	100	80	150	100	280	150
VDI 30	ΔZ	69	43	138	69	240	138
	ΔR	100	80	150	100	230	150

Máquinas: ONA - TECHNO serie "H - 700" e ONA - TECHNO serie "H - 600"

Regime de Desbaste - Elet. Cu						
VDI	46	43	37	33	30	28
Sup. Frontal [mm ²]	800	400	200	100	50	<50

	Sub-espessura (mm)						
Usuário 1	0.15	VDI	33	32	31	29	27
		ΔR	0.15	0.105	0.085	0.065	0.05
Usuário 2	0.20	VDI	36	33	31	29	27
		ΔR	0.20	0.12	0.085	0.065	0.05
Usuário 3	0.25	VDI	39	36	33	31	29
		ΔR	0.25	0.16	0.115	0.085	0.065
Usuário 4	0.30	VDI	39	36	33	31	29
		ΔR	0.3	0.2	0.115	0.085	0.005
Usuário 5	0.40	VDI	42	40	39	36	33
		ΔR	0.4	0.32	0.26	0.2	0.115

VDI	42	40	39	36	33	32	31
Ip	10	10	9	8	7	6	6
Ti	800	400	400	200	100	100	50
Tp	100	50	50	50	25	25	13
GAP							
Cons.Ele. [%]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5	0.6	< 0.5	0.7
Veloc.Maq. [mm ³ /min]	200	210	125	65	50	22	25

Tabelas para o par de materiais Grafite – Aço

Máquina: MITSUBISHI serie "M55 J"

Área (mm ²)	Nº Eléctrodos		
	1	2	
100 (10x10)	8000	8003	Desb
		8004	Acab
200 (14x14)	8001	8005	Desb
		8006	Acab
400 (20x20)	8002	8007	Desb
		8008	Acab

VDI	M. Pack	Prog.1	Prog.2	Prog.3	Prog.4	Prog.5	Prog.6	Prog.7
	8000	9594	9981	9982	9983	9984	9989	
	8001	9591	9981	9982	9983	9984	9989	
	8002	9583	9980	9981	9982	9983	9984	9989
	8003	9590	9981					
22	8004	9981	9982	9983	9984	9989		
GRST6A	8005	9586	9980	9981				
	8006	9981	9982	9983	9984	9989		
	8007	9580	9980	9981				
	8008	9981	9982	9983	9984	9989		
	8000	9594	9981	9982	9983	9984		
	8001	9591	9981	9982	9983	9984		
	8002	9583	9980	9981	9982	9983	9984	
	8003	9590	9981					
26	8004	9981	9982	9983	9984			
GRST10A	8005	9586	9980	9981				
	8006	9981	9982	9983	9984			
	8007	9580	9980	9981				
	8008	9981	9982	9983	9984			
	8000	9594	9981	9982	9983			
	8001	9591	9981	9982	9983			
	8002	9583	9980	9981	9982	9983		
	8003	9590	9981					
30	8004	9981	9982	9983				
GRST15A	8005	9586	9980	9981				
	8006	9981	9982	9983				
	8007	9580	9980	9981				
	8008	9981	9982	9983				

	Progr.	9580	9583	9586	9590	9591	9594
	Ip	8,5	7,5	6,5	5,5	5,5	4,5
	Ti	8,4	8,2	8,0	7,5	7,5	7,3
	Tp	10,0	9,5	9,5	9,5	8,0	0,0
	VDI	45	45	45	43	43	42
	GAP						
	Cons.Ele. [%]	0.35	0.35	0.35	0.43	0.43	0.39
	Veloc.Maq. [mm ³ /min]	3.59	217.95	85.90	39.74	78.21	33.21
VDI	ΔZ	446	418	356	306	306	248
22	ΔR	420	390	340	290	290	240
VDI	ΔZ	432	404	342	292	292	234
26	ΔR	410	380	330	280	280	230
VDI	ΔZ	416	338	326	276	276	218
30	ΔR	400	370	320	270	270	220

Máquinas: NA - TECHNO serie "H - 700" e ONA - TECHNO serie "H - 600"

Regime de Desbaste - Elet. Cu			
VDI	43	37	33
Sup. Frontal [mm ²]	400	200	100

	Sub-espessura (mm)						
Usuário 6	0.12	VDI	35	34	31	29	27
		ΔR	0.12	0.09	0.065	0.045	0.03
Usuário 7	0.15	VDI	37	36	33	31	29
		ΔR	0.15	0.105	0.075	0.06	0.045
Usuário 8	0.20	VDI	38	36	33	31	29
		ΔR	0.20	0.12	0.08	0.06	0.045
Usuário 9	0.25	VDI	39	37	36	33	31
		ΔR	0.25	0.15	0.11	0.08	0.06
Usuário 10	0.30	VDI	40	39	37	36	33
		ΔR	0.3	0.22	0.14	0.11	0.08
Usuário 11	0.40	VDI	44	40	39	37	36
		ΔR	0.4	0.3	0.22	0.14	0.11
Usuário 12	0.5	VDI	45	44	40	39	37
		ΔR	0.5	0.4	0.3	0.22	0.14

VDI	45	44	40	39	38	37	36
Ip	12	11	10	9	8	8	7
Ti	400	400	200	200	200	100	100
Tp	50	50	25	25	25	13	13
GAP							
Cons.Ele. [%]	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Veloc.Maq. [mm ³ /min]	320	240	230	140	65	65	42

Descrição da aplicação

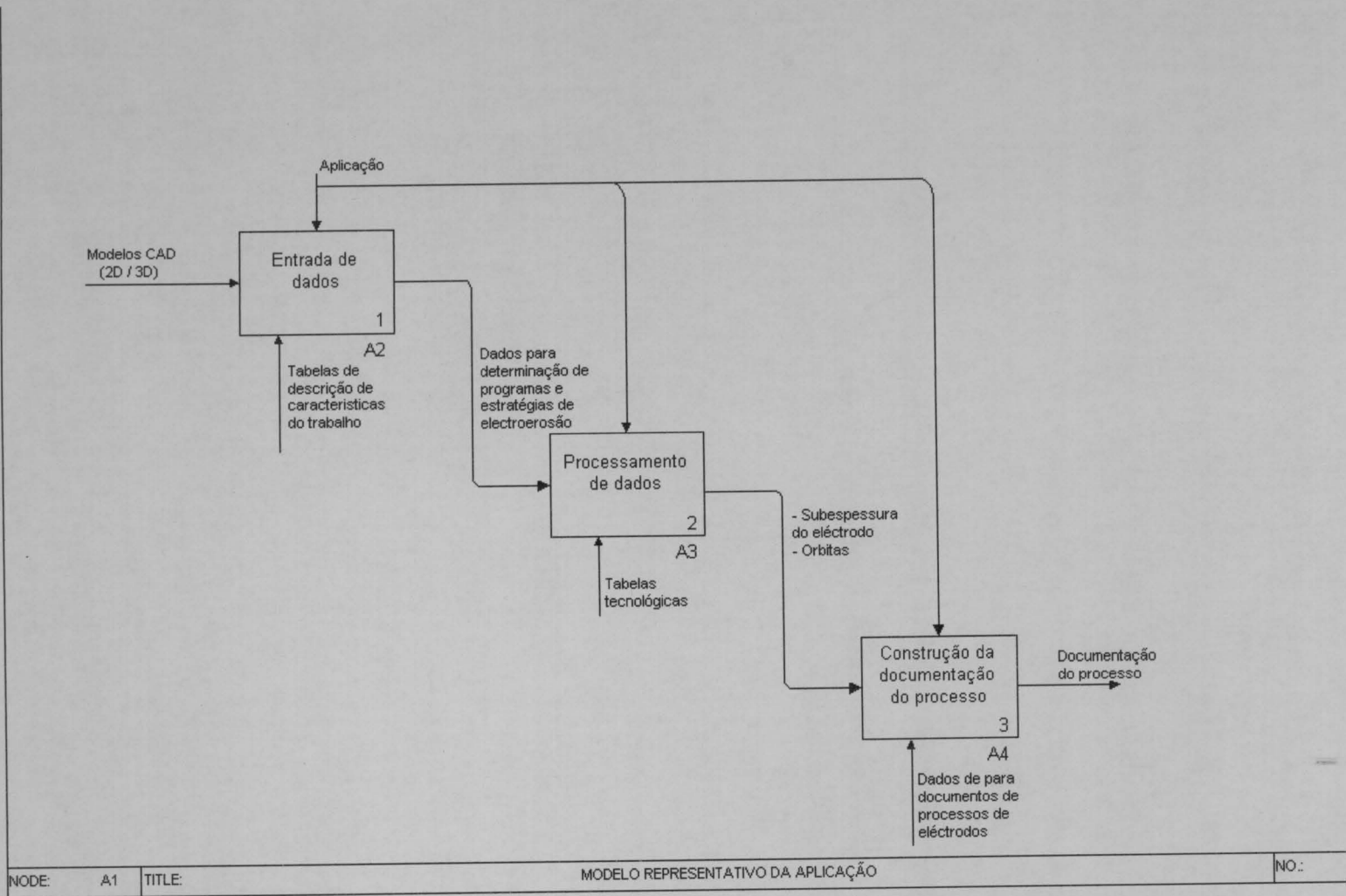
A aplicação foi desenvolvida com o objectivo de sistematizar o processo de electroerosão.

Para melhor se perceber o funcionamento da aplicação, optamos por descreve-la como sendo dividida em três actividades principais (estando estas sub-divididas para detalhar cada actividade principal) com ligações entre cada actividade.

Assim, a aplicação pode ser descrita:

- ***Entrada de dados***
- ***Processamento de dados e saída de resultados***
- ***Construção da documentação do processo***

Estas actividades estão interligadas como passamos a mostrar nos diagramas IDEF0 em que são especificadas as ligações, entradas para a aplicação e resultados obtidos com a aplicação (saídas).



Como mostra o diagrama anterior, a aplicação tem como objecto de análise os modelos 3D e 2D e como mecanismos tabelas de descrição de características do trabalho e tabelas tecnológicas. Estas actividades são controladas pela própria aplicação, e como saída de dados para a construção da documentação de processo.

Entrada de dados

A actividade entrada de dados, é a interface da aplicação com o utilizador, é nesta actividade que os dados são introduzidos e armazenados de acordo com tabelas de descrição do trabalho. para posterior processamento na actividade seguinte.

Nas figuras seguintes apresenta-se alguns exemplos da interface da aplicação para inserção de dados.

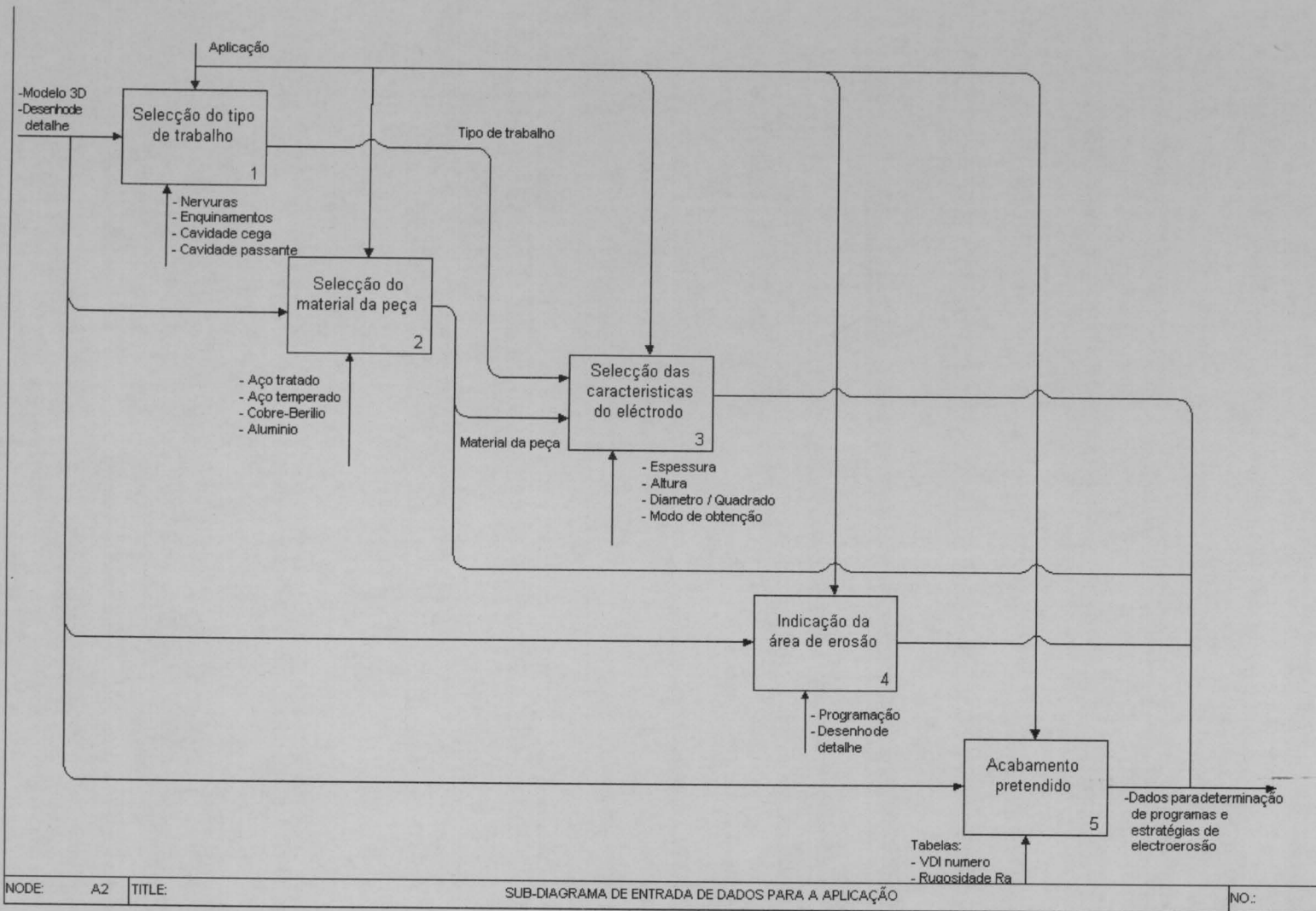
Material da Peça

Aço Tratado
Aço Tratado
Aço Temperado
Aluminio
Cobre-Berilio

Características do Eléctrodo

- ☐ Espessura mim < 1mm
- ☐ Altura máx > 80mm
- ☐ Diâmetro > 80mm
- ☐ Quadrado > 80x80mm
- ☒ Obtido por Elect. por Fio

Para explicitar detalhadamente a *entrada de dados*, temos na página seguinte a representação dessa actividade num sub-diagrama IDEF0



Este sub-diagrama representa o conjunto de dados considerados relevantes para a determinação das características do eléctrodo.

A cada actividade estão associadas listas de opção que são possíveis de seleccionar de acordo com as características apropriadas do trabalho a realizar.

Como entrada de dados existem unicamente os modelos 2D e 3D e a partir da análise desses modelos se pode seleccionar vários tipos de dados, tais como:

- Tipo de trabalho
- Material da peça
- Características do eléctrodo
- Área projectada de erosão
- Acabamento pretendido

Para exemplificar essas escolhas temos as figuras da página 41 mas é conveniente acrescentar as seguintes.

Tipo de Trabalho	Enquinamento
	☐ Cavidade Cega ☒ Cavidade Passante ☐ Nervuras ☐ Enquinamento

Área Proj.de Erosão [mm²]	Altura de Erosão [mm]
100 (10x10) 25 (5x5) 50 (7x7) <input checked="" type="text" value="100 (10x10)"/> 200 (14x14) 400 (20x20) 800 (28x28)	2

Acabamento		
VDI	Ra [μm]	Rmax [μm]
27	2.24	11.19
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		

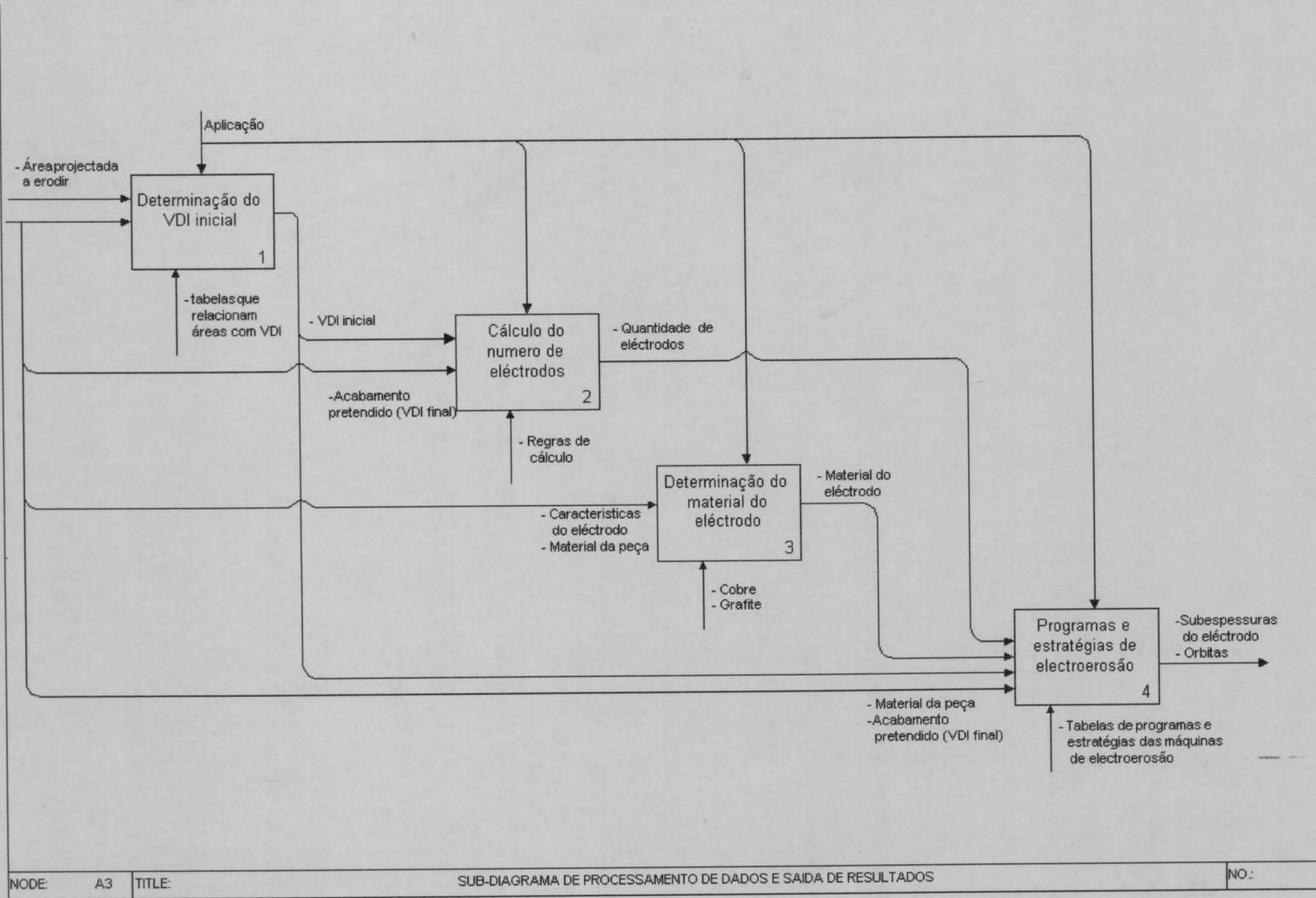
Processamento de dados e saída de resultados

Esta actividade tem como função fazer o processamento dos dados introduzidos na aplicação anterior, fazendo o cruzamento da informação de cada um desses dados em tabelas elaboradas propositadamente para esse fim, com o objectivo de devolver como resultado á saída regimes e estratégias de electroerosão.

Para melhor explicitar detalhadamente estas tarefas, fez-se a divisão desta actividade nas seguintes:

- Determinação do VDI inicial
- Cálculo da quantidade de eléctrodos
- Determinação do material do eléctrodo
- Regimes e estratégias de electroerosão

Estas actividades, bem como as ligações de entradas e saídas estão representadas a seguir por um diagrama IDEF0



Este sub-diagrama representa todas as considerações e cálculos que a aplicação desenvolve até chegar à solução final que apresenta na saída.

Como podemos verificar este sub-diagrama tem como entradas:

- Área projectada
- Acabamento pretendido (VDI final)
- Características do eléctrodo
- Material da peça

Através da área projectada de material a erodir, e segundo tabelas que relacionam VDI possíveis de se obter com determinadas áreas, obtemos a determinação do VDI inicial.

Com este VDI (inicial), juntamente com o acabamento pretendido (VDI final) e segundo regras de cálculo, obtém-se a quantidade de eléctrodos que é necessário fabricar.

As características do eléctrodo e o material da peça são processados em tabelas apropriadas para se obter qual o material do eléctrodo.

Com o material para o eléctrodo, a quantidade de eléctrodos, material da peça e acabamento pretendido como entradas, processa-se segundo tabelas de regimes e estratégias apropriadas obtendo como resultado regimes, estratégias e a subespessura do eléctrodo e orbitas associadas a essas estratégias.

A figura seguinte mostra um resultado possível que se obteve introduzindo dados correspondentes a um certo tipo de trabalho:

Material: Cobre	Quantidade: 2		Desbaste	Acabamento
			Sub-espessura:	0.4 0.1
Furo de escape de gases: SIM				

	Desbaste	Acabamento			
MITSUBISHI:	8014	8015			
	Progr.	Progr.			
	9941	9948			
	9945	9948			

ONA: Usuário 5	
Desbaste	
VDI inicial 42	VDI final 31
Acabamento	
VDI inicial 31	VDI final 27

Concepção da documentação do processo

Esta actividade, depois dos dados serem processados na actividade anterior, e estarem já definidos regimes e estratégias a utilizar no trabalho pretendido, tem como objectivo a identificação dos dados e introdução destes nos seguintes documentos:

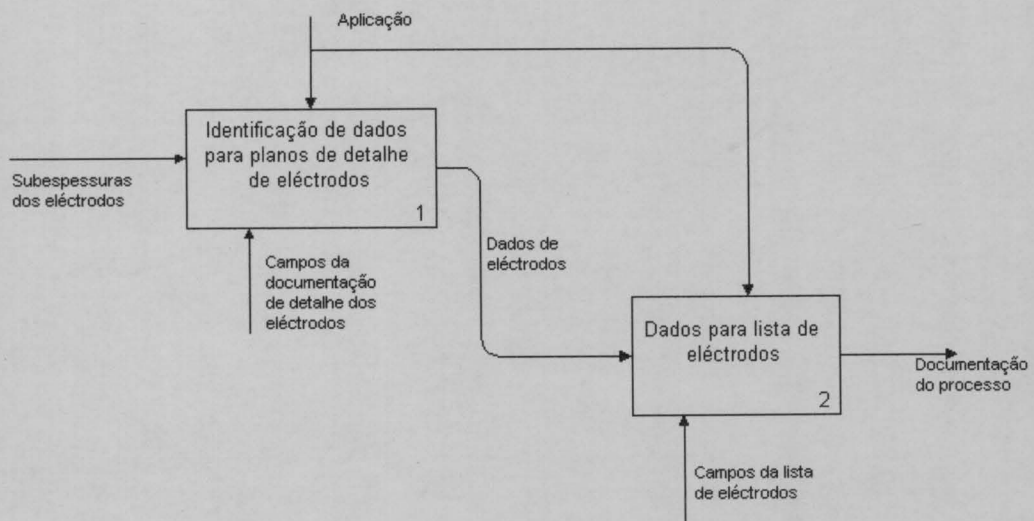
- Plano de detalhe do eléctrodo
- Lista de eléctrodos

A figura seguinte mostra um exemplo de dados que fazem parte do plano de detalhe do eléctrodo e da lista de eléctrodos que podem ser inseridos nestes documentos.

 SOARMOLDES							
Eléctrodo nº	308	Ordem Nº		Material	COBRE	Quantidade	2
Peça nº	200		25534				
					Desbaste	Acabamento	
				Subespessura	0.25	C.1	
MITSUBISHI:	Desbaste	Acabamento					
	E012	8013					
	Progr.	Progr.		ONA:	Usuário 3		
		9957		Desbaste			
	9941	9948		VDI inicial	39	VDI final	31
	9945			Acabamento			
				VDI inicial	31	VDI final	27
				Furo para escape de gases	SIM		

Figura 16 - representa parte de uma folha de eléctrodo, em que não está na imagem representado o resto da folha que seria o espaço em branco onde se insere o desenho de detalhe do eléctrodo.

Para explicitar e detalhar esta actividade apresenta-se na página seguinte o diagrama de blocos (IDEF0) correspondente.



NODE:	A4	TITLE:	SUB-DIAGRAMA DE CONSTRUÇÃO DA DOCUMENTAÇÃO DO PROCESSO	NO.:
-------	----	--------	--	------

Exemplos práticos.

Para exemplificar o funcionamento e comentar os resultados obtidos, elaboraram-se alguns exemplos demonstrativos com a aplicação desenvolvida.

Como exemplo, usamos o caso real representado na figura seguinte, podendo assim comparar os resultados obtidos pela aplicação com os obtidos pelo processo utilizado na empresa.

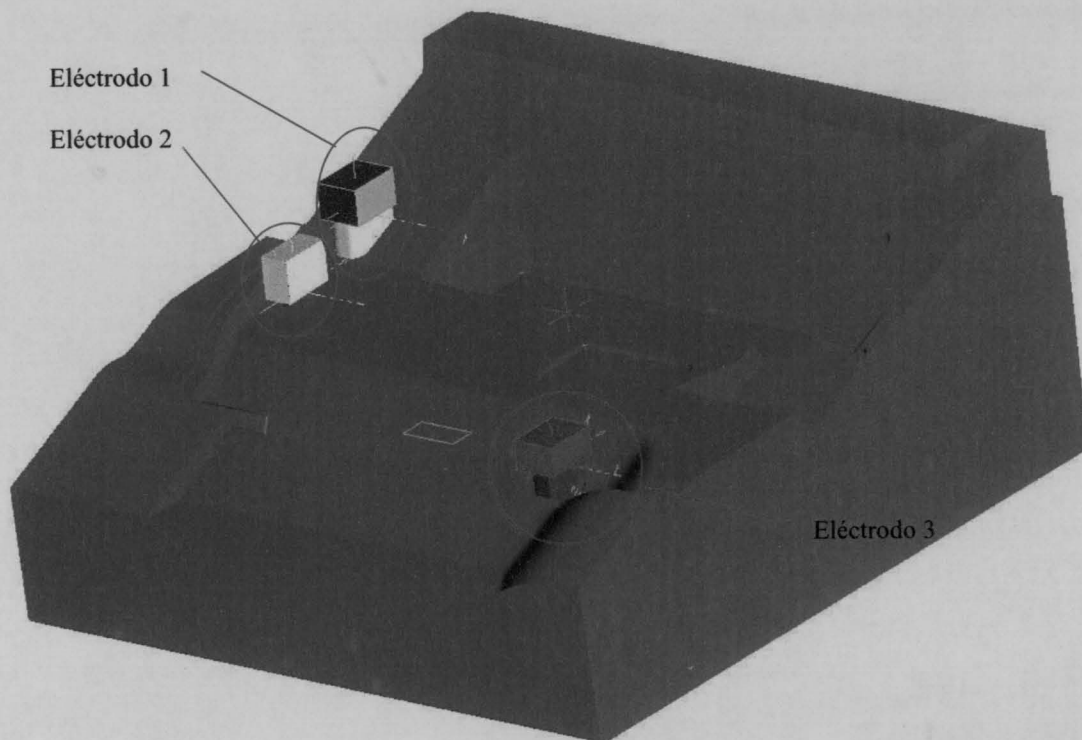


Figura 17 - representa uma cavidade (a azul-claro) e os eléctrodos nas respectivas posições de maquinagem.

Para introduzir os dados na aplicação, temos que analisar as áreas projectadas a maquinar por electroerosão por cada eléctrodo.

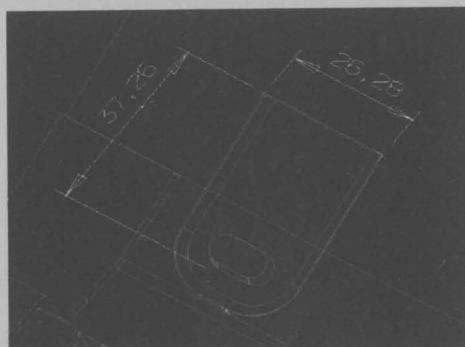
Análise dos modelos (3D/2D)

Esta análise não é muito rigorosa, por ainda não existirem na empresa meios tecnológicos que nos permita determinar as áreas de material deixado pela maquinagem convencional.

Pretende-mos, então, apenas saber em que intervalo de valores está a área projectada a maquinar por electroerosão, e para isso faz-se a medição directamente no modelo (2D e/ou 3D).

Contando com a experiência e os conhecimentos de maquinagem convencional e dos recursos tecnológicos da empresa por parte do utilizador da aplicação, este introduz na aplicação a área que lhe parece mais aproximada com a que ficou por maquinar por maquinagem convencional, que é a mesma área que tem que ser maquinada por electroerosão.

As figuras seguintes mostram as medições das áreas em causa.



Figuras 18 e 19 - áreas onde vão maquinar os eléctrodos 2 e 1 respectivamente.



Figura 20 - da área onde vai maquinar o eléctrodo 3

Depois de analisadas as *áreas a maquinar por electroerosão*, o utilizador tem ainda que analisar o *tipo de trabalho* que pretende, *material para a peça*, *características do eléctrodo* e *rugosidade superficial final* pretendida (acabamento).

Inserção de dados

Feita essa análise, o utilizador introduz os dados na aplicação. Para o nosso exemplo temos:

Eléctrodo 1

Tipo de trabalho – Enquinamento

Material da peça – Aço tratado

Características do eléctrodo –

Acabamento – VDI 27

Área projectada de erosão – maior que 65 mm²

Material da Peça Aço Tratado ▼		Acabamento	
Tipo de Trabalho Enquinamento ▼		VDI	Ra [µm] R _{max} [µm]
		27 ▼	2,24 11,19
Área Proj.de Erosão [mm²] Altura de Erosão [mm]		Características do Eléctrodo	
100 (10x10) ▼ 2 ▼		☐ Espessura min < 1mm	
		☐ Altura máx > 80mm	
		☐ Diâmetro > 80mm	
		☐ Quadrado > 80x80mm	
		☐ Obtido por Elect. por Fio	

Figura 21 – representa os dados referentes ao eléctrodo 1 inseridos na aplicação.

Material da Peça Aço Tratado ▼		Acabamento					
Tipo de Trabalho Cavidade Cega ▼		VDI 27 ▼	<table border="1"> <tr> <th>Ra [µm]</th> <th>R_{max} [µm]</th> </tr> <tr> <td>2,24</td> <td>11,19</td> </tr> </table>	Ra [µm]	R _{max} [µm]	2,24	11,19
Ra [µm]	R _{max} [µm]						
2,24	11,19						
<table border="1"> <tr> <th>Área Proj.de Erosão [mm²]</th> <th>Altura de Erosão [mm]</th> </tr> <tr> <td>100 (10x10) ▼</td> <td>2 ▼</td> </tr> </table>		Área Proj.de Erosão [mm ²]	Altura de Erosão [mm]	100 (10x10) ▼	2 ▼	Características do Eléctrodo	
Área Proj.de Erosão [mm ²]	Altura de Erosão [mm]						
100 (10x10) ▼	2 ▼						
		☐ Espessura mín < 1mm ☐ Altura máx > 80mm ☐ Diâmetro > 80mm ☐ Quadrado > 80x80mm ☐ Obtido por Elect. por Fio					

Figura 23 - representa os dados referentes ao eléctrodo 3 inseridos na aplicação

Resultados

Para os dados inseridos, mostra-se nas figuras seguintes a resposta devolvida pela aplicação.

Eléctrodo 1

Folha de eléctrodos			
Material: Cobre		Quantidade: 1	
Furo de escape de gases:		Sub-espessura: 0,15	
Acabamento		ONA: Usuário 1	
MITSUBISHI:	8002		
	Progr.		
	9636		
	9945		
	9948		
Acabamento		VDI inicial 33 VDI final 27	
VDI inicial		VDI final	

Figura 24 – representa a os regimes e estratégia que a aplicação devolve como resposta aos dados inseridos. A aplicação mostra também qual a sub espessura a dar ao eléctrodo.

Eléctrodo 2

Folha de eléctrodos			
Material:		Cobre	Quantidade: 1
Furo de escape de gases:			
Acabamento		Sub-espessura: 0,1	
MITSUBISHI:	8001	ONA: Usuário 1	
	Progr.	Acabamento	
	9631	VDI inicial	31
	9945		VDI final
	9948		27
		VDI inicial	VDI final

Figura 25 - representa a os regimes e estratégia que a aplicação devolve como resposta aos dados inseridos. A aplicação mostra também qual a sub espessura a dar ao eléctrodo

Eléctrodo 3

Folha de eléctrodos			
Material:		Cobre	Quantidade: 1
Furo de escape de gases:		SIM	
Acabamento		Sub-espessura: 0,15	
MITSUBISHI:	8002	ONA: Usuário 1	
	Progr.	Acabamento	
	9636	VDI inicial	33
	9945		VDI final
	9948		27
		VDI inicial	VDI final

Figura 25 - representa a os regimes e estratégia que a aplicação devolve como resposta aos dados inseridos. A aplicação mostra também qual a sub espessura a dar ao eléctrodo

Comparação de resultados

Os resultados obtidos com a aplicação são idênticos aos apresentados na documentação da empresa. Apenas para o eléctrodo numero três os resultados não coincidem com os apresentados na documentação da empresa porque a área projectada a maquinar por electroerosão introduzida na aplicação não corresponde á área que efectivamente existe na peça. Este factor leva a que a aplicação calcule os parâmetros em função de uma área que não corresponde á realidade, mas sim á área indicada. Assim sendo, pode dizer-se que a aplicação funciona como o esperado, devolvendo valores otimizados como resposta.

Como os valores da sub-espessura a dar ao eléctrodo são calculados em função dos dados introduzidos e não como se faz na empresa, que se escolhe os regimes em função da sub-espessura dada pelo projectista dos eléctrodos, com a aplicação consegue-se sistematizar e otimizar os regimes e estratégias de acordo com os trabalhos a executar.

Implementação

A aplicação informática desenvolvida permite a sistematização do processo de electroerosão, tendo em conta a área projectada de material a maquinar, tipo de trabalho e tipo de material. Podendo assim, a partir do conhecimento da área, obter parâmetros e estratégias de maquinagem para os dois tipos de máquinas de electroerosão estudados, de modo a obter os resultados esperados com bom rendimento para ambos os tipos de máquinas.

Esta aplicação permite a inserção de novos dados, para possibilitar a adição e/ou edição de vários tipos de máquinas de electroerosão, tipos de trabalhos e restrições impostas pela empresa, embora seja necessário o conhecimento do funcionamento da aplicação e da linguagem em que foi programada para proceder a estas alterações.

Com a tentativa de implementar a aplicação surgiram algumas dificuldades, destacando-se a dificuldade de medir as áreas projectadas de material a erodir em trabalhos como enquinamentos e nervuras. Como a aplicação tem por base a área projectada de material a erodir, essa dificuldade leva a hesitações de implementação no que diz respeito a trabalhos desta natureza. Uma medição errada da área projectada de material a erodir, pode levar a resultados muito diferentes dos esperados ou a uma redução de rendimento nestes tipos de trabalhos.

Quanto aos restantes tipos de trabalhos, desbaste, pré-acabamento, e outros com áreas de material a erodir bem definidas, este método de sistematização revela-se muito fiável.

Para além da sistematização do processo este método permite controlar melhor a produção, ao possibilitar uma estimativa do tempo de maquinagem por electroerosão de acordo com um rendimento da máquina estimado, e facilita também o trabalho do operador que até aqui contava apenas com a sua experiência para a realização destes trabalhos.

Conclusão

Este projecto veio melhorar o processo de produção e concepção de eléctrodos, utilizando o conhecimento do processo através da aplicação informática desenvolvida para esse efeito.

Com a sistematização todos os intervenientes passam agora a poder regular as suas tarefas pela aplicação desenvolvida, deixando assim de se fazer sentir de forma significativa a diferença de conhecimentos entre pessoal dos vários sectores.

Para além desta uniformização de conhecimentos e regras impostas, a aplicação desenvolvida para a concepção e fabrico de eléctrodos permite também a sistematização e rentabilização do processo de electroerosão propriamente dito. Para isso, a aplicação, engloba também uma base de dados, criada a partir das tabelas comerciais dos fornecedores de algumas das máquinas existentes na empresa, permitindo a elaboração de regimes e estratégias de maquinagem por electroerosão para cada tipo de trabalho pretendido pelo utilizador.

Estes regimes e estratégias elaborados pela aplicação para as máquinas em causa, permitem que as regras do trabalho a efectuar não sejam apenas ditadas pela experiência do operador, que vai executar o trabalho, mas tenham também em conta os resultados optimizados da aplicação desenvolvida.

Para que sejam ultrapassadas as dificuldades encontradas na implementação, nomeadamente no cálculo das áreas a maquinar por electroerosão, propõe-se para um futuro desenvolvimento, a integração desta aplicação com programas CAD que nos permitam fazer medições e cálculos com exactidão.

Pode também ser desenvolvida nesta aplicação formas de calcular o tempo que um trabalho pode demorar a maquinar por electroerosão, tendo em conta o rendimento médio da máquina para os regimes e estratégias aplicados nesse trabalho.

Bibliografia

Publicações:

José Duarte R. Marafona

Tecnologia e aplicações da Electroerosão

- *Processos de electroerosão por penetração (Diesinking) e fio (Wire)*
2001

José L. Diéguez

MECANIZADO POR ELECTROEROSION

- *Aplicações de las tecnologías de eliminación de material por
ELECTROEROSION*

Publicações técnicas – ONA electroerosion.

TEORIA Y PRATICA DE LA ELECTROEROSION

Paginas WEB consultadas:

www.ona-electroerosion.com

www.mitsubishi-world.com

www.sodick.com/

<http://edmtechnologies.net>

www.advanced-edm.com

www.edmtt.com

www.edmsupply.com

www.idef.com

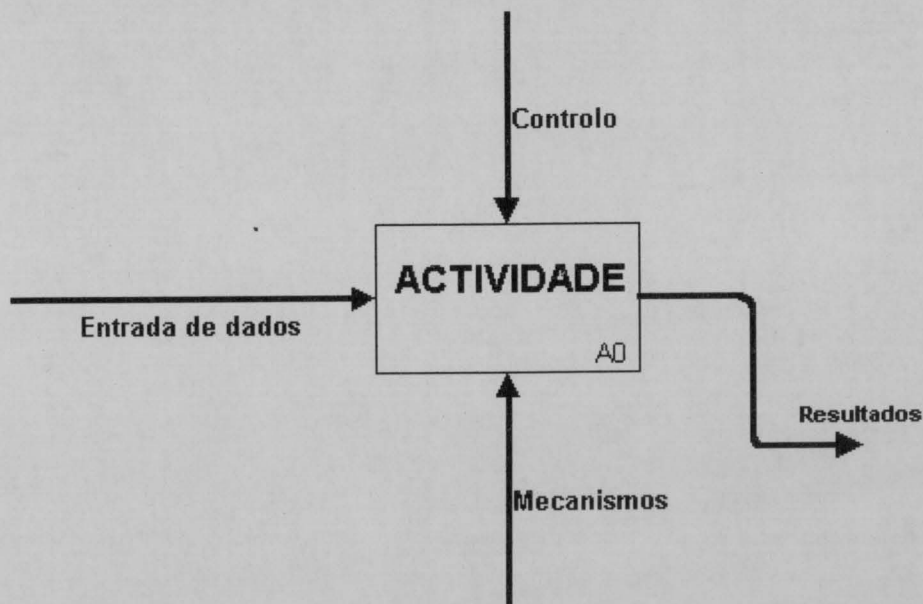
ANEXO

Diagramas IDEF0

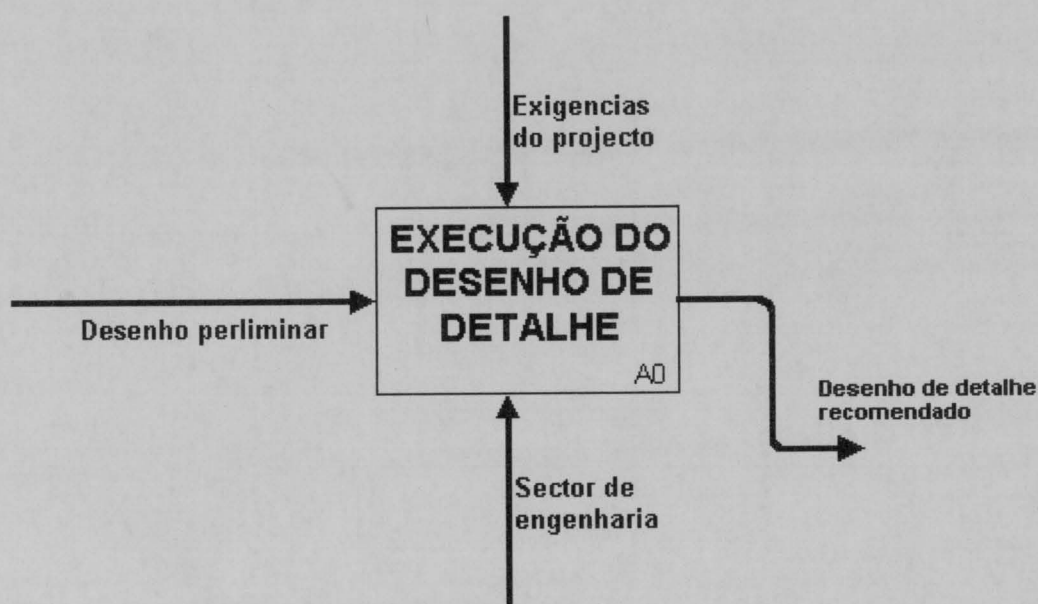
Este tipo de diagramas tem como principais características os seguintes aspectos:

1. É detalhado e expressivo, capaz de representar uma grande variedade de operações detalhadas de uma empresa a todo o nível.
2. É uma linguagem coerente e simples, possibilitando a expressão de forma rigorosa e precisa, e promovendo a consistência da interpretação.
3. Realça a comunicação entre analistas, colaboradores e usuários com a facilidade da aprendizagem e da sua ênfase na exposição hierárquica do detalhe.

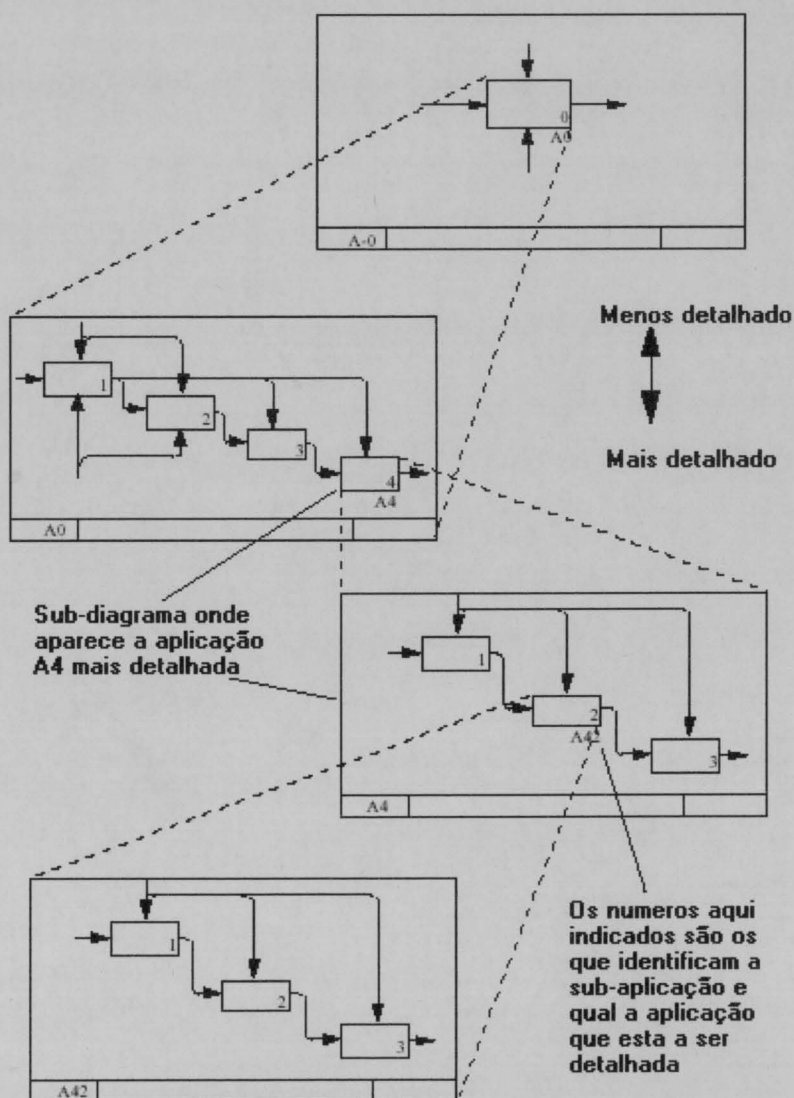
A figura seguinte mostra como se deve interpretar este tipo de diagramas.



Apresenta-se agora um simples exemplo de uma aplicação possível para este tipo de linguagem:



Estes diagramas permitem ligações entre aplicações, respeitando certas regras de representação, permitindo assim representar facilmente varias operações detalhadamente. Apresentam-se na página seguinte exemplos de ligações entre aplicações e modelos de como se pode apresentar mais detalhadamente certas aplicações usando sub-diagramas.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000091217