



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Concepção e Desenvolvimento do Produto

***Estudo e Otimização do Processo de Modelação de
Eléttodos para Eletroerosão (EDM)***

Kateryna Voloshyna

Leiria, *Julho de 2013*



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Concepção e Desenvolvimento do Produto

***Estudo e Otimização do Processo de Modelação de
Eléttodos para Eletroerosão (EDM)***

Kateryna Voloshyna

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Fernando Couceiro de Sousa Neves, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação da Doutora Irene Sofia Carvalho Ferreira, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Julho de 2013

À Minha Família

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Doutor Carlos Fernando Couceiro de Sousa Neves e Doutora Irene Sofia Carvalho Ferreira, pela paciência e dedicação demonstrados durante a orientação desta tese de Mestrado.

Ao meu amigo e colega de trabalho Marco Ruivo que me ajudou na escolha de tema desta tese e sempre se mostrou disponível para esclarecer as minhas dúvidas.

Aos meus amigos e colegas Pedro Bispo e Nuno Marques por se encontrarem disponíveis com novas ideias e sugestões, e me apoiaram durante o meu percurso profissional quando o tempo livre era escasso.

À empresa Schunk Portugal e em particular ao Hélio Franco, pelo esclarecimento das minhas questões e rapidez na resposta.

A toda a minha família e em particular aos meus pais, ao meu namorado Tiago, que me apoiou durante esta longa viagem, estando sempre ao meu lado e à minha amiga Ângela que fazia longas viagens para, apesar de tudo, estar por perto quando eu precisava.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG – IPL).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Quando se trata do fabrico de moldes, o processo de eletroerosão é uma componente indispensável. Este processo aplica-se à maior parte de moldes produzidos para a injeção de matéria plástica, sendo tipicamente aplicado nos elementos moldantes do molde, ou seja, aqueles que irão entrar em contacto direto com a matéria plástica. Normalmente, quanto mais complexa é a geometria da peça a moldar, maior é a quantidade de áreas contidas na zona moldante que terão de ser acabadas através de eletroerosão, pois as peças mais complexas têm maior tendência a conter quinas vivas na sua geometria e pormenores que sejam impossíveis de maquinar por fresagem, entre outros tipos de geometrias típicas que requerem acabamento através de eletroerosão. No entanto, este processo requer uma grande preparação antes da eletroerosão propriamente dita. Em primeiro lugar, é necessário modelar e fabricar a ferramenta a utilizar na eletroerosão, o eléctrodo. Como todos os eléctrodos são diferentes, a sua modelação torna-se um processo moroso, complexo e muito dependente do know-how do desenhador. Contudo, através da criação de uma série de regras que possam guiar o desenhador durante a modelação de eléctrodos, será possível tornar o processo de modelação mais rápido e menos dependente da experiência profissional de cada modelador (especialmente importante para modeladores inexperientes). Tendo por base este objetivo, ou seja, desenvolver um conjunto de regras empíricas com o intuito de apoiar a modelação de eléctrodos, foram analisadas neste trabalho várias peças, escolhidas como representativas, de tamanhos de moldes e complexidades diferentes, por forma a poder identificar as regras necessárias à modelação de eléctrodos. Posteriormente, estas foram organizadas num fluxograma para auxiliar o modelador aquando da modelação dos eléctrodos. Com a base nas regras definidas e com o intuito de validar as mesmas, o fluxograma resultante foi aplicado a uma nova peça tendo-se concluído que este tem um efeito positivo quer na diminuição da complexidade inerente à modelação dos eléctrodos, pois o desenhador segue as regras definidas, quer no tempo despendido, quer na quantidade de eléctrodos modelados.

Palavras-chave: modelação, eletroerosão, sistematização, eléctrodo, regras.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is a very important process in the manufacturing of plastic injection tools. This process is extensively applied to plastic injection tools and usually in the molding components of the tool, those surfaces that will directly contact the plastic material. Usually, if the tool has a complex geometry, more areas are eroded by EDM since complex tools have more sharp edges and geometries which are impossible to mill. However, EDM requires an extensive preparation work. First, it is necessary to develop and design, the tools used in spark erosion: the electrodes. All electrodes are different from each other and this process can take considerable time, this time depending strongly on the experience of the draftsman. Nevertheless, it is possible to create rules to help the draftsman to model electrodes. This way, the computer aided design process will be faster, simpler and independent of the draftsman experience. This thesis has the goal to develop empirical rules, which will help the draftsman design electrodes. To do that, some different molding parts of plastic injection tools with various degrees of complexity were analyzed, in order to identify the common spots to do the rules. Then, these rules were organized in a flowchart. In order to see if this flowchart is valid, it was applied in a new molding part and it was seen that the flowchart helps to reduce the drawing complexity, drawing time and the quantity of modeled electrodes.

Key-Words: modeling, electrical discharge machining, systematization, electrode, rules.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice de Figuras

FIGURA 1 – EXEMPLO DE UM MOLDE. ADAPTADO DE MEUSBURGER 2012 [1].	5
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA IMERSÃO DOS PLATINADOS.	8
FIGURA 3 – CIRCUITO RESISTIVO CAPACITIVO DOS LAZARENKOS PARA EDM. ADAPTADO DE [2].	8
FIGURA 4 – DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE EDM DO HAROLD STARK, VICTOR HARDING E JACK BEAVER. ADAPTADO DE [2].	9
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA EDM COM MOVIMENTOS VERTICAIS. ADAPTADO DE [2].	10
FIGURA 6 – ETAPAS COMUNS DE MAQUINAÇÃO DE UMA PEÇA DE AÇO.	18
FIGURA 7 – TIPOS DE GEOMETRIA IMPOSSÍVEIS DE ACABAR POR FRESAGEM SEGUNDO <i>DING ET. AL.</i> (2002) [33].	19
FIGURA 8 – OS CONSTITUINTES GENÉRICOS DE UM ELÉTRODO.	21
FIGURA 9 – ESQUEMA DE BASES/ <i>HOLDERS</i> DE ELÉTODOS DA EROWA. ADAPTADO DE [36].	22
FIGURA 10 – EXEMPLO DE ELÉTRODO QUE PODE SER COLOCADO NA BASE DE 120 MM DE COMPRIMENTO COM RASGO DE 30 MM.	22
FIGURA 11 – EXEMPLO DE <i>HOLDER</i> COM EXTENSÃO DE ALTURA PARA 270 MM.	23
FIGURA 12 – PEÇA 1.	24
FIGURA 13 – CANTO NA GEOMETRIA DA PEÇA (A), ELÉTODOS PARA ERODIR ESSA ÁREA (B).	25
FIGURA 14 – EROSIÃO DE UM CANTO CHANFRADO.	26
FIGURA 15 – ÁREA COM 0.39 MM DE LARGURA POR ERODIR (A); ELÉTRODO PARA MAQUINAR A ÁREA EM QUESTÃO (B).	26
FIGURA 16 – PERFIL EM CORTE DA CAIXA DO POSTIÇO (A); ELÉTRODO PARA A MAQUINAÇÃO DESSA ÁREA (B).	27
FIGURA 17 – PEÇA 2: CAVIDADE DE UM MOLDE PARA UMA PEÇA DE UM CORTA-RELVA.	28
FIGURA 18 – ÁREA DA PEÇA COM 3,00 X 3,00 X 1,00 MM (A); ELÉTRODO PARA A ZONA EM QUESTÃO (B).	29
FIGURA 19 – QUINA VIVA DENTRO DE UM <i>RIB</i> (A); ELÉTRODO PARA A SUA MAQUINAÇÃO (B).	29
FIGURA 20 – EXEMPLO DE UM <i>RIB</i> .	29
FIGURA 21 – ELÉTRODO FORA DO COMUM.	30
FIGURA 22 – ZONA DA PEÇA QUE TEM DE SER DEFINIDA POR DOIS ELÉTODOS.	31
FIGURA 23 – ELÉTODOS PARA A MAQUINAÇÃO DA ÁREA ACIMA DESCRITA.	31
FIGURA 24 – (A) ELÉTRODO COM SUPORTE ESPECIAL; (B) ÁREA DE ALTURA ELEVADA; (C) ELÉTRODO PARA A SUA ELETROEROSÃO.	32
FIGURA 25 – EXEMPLO DE UM <i>RIB</i> EM “L” QUE TEM DE SER ERODIDO POR DOIS ELÉTODOS DIFERENTES.	33
FIGURA 26 – EXEMPLO DE UM <i>RIB</i> COM ELEVADA PROFUNDIDADE.	33
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO DE ACABAMENTOS DA FRESAGEM COM A DE ELETROEROSÃO (A). ELÉTRODO MODELADO PARA O PLANO INCLINADO (B).	34
FIGURA 28- ELÉTRODO COM QUINAS VIVAS.	34
FIGURA 29 – EXEMPLO DE UMA ÁREA A ERODIR COM O RAIOS DE FUNDO DE 1,00 MM E PROFUNDIDADE DE 300,00 MM.	35
FIGURA 30 – EXEMPLO DE QUINAS VIVAS NA ZONA MOLDANTE.	35
FIGURA 31 – ELÉTODOS PARA A ELETROEROSÃO DA ÁREA INDICADA NA FIGURA 30.	36
FIGURA 32 – (A) QUINA VIVA NA PARTE EXTERIOR DA “JANELA”; (B) ELÉTRODO PARA A EROSIÃO DA “JANELA”, AS SETAS INDICAM AS ARESTAS.	36
FIGURA 33 – ÁREA VIZINHA A DA “JANELA” COM A DEMONSTRAÇÃO DE 2 ELÉTODOS PELOS QUAIS FOI ERODIDA.	37
FIGURA 34 – (A) PEQUENAS ÁREAS DA PEÇA; (B) ELÉTRODO PARA A ÁREA 1 E 2; (C) ELÉTRODO PARA A ÁREA 3.	38
FIGURA 35 – (A) ÁREA DE AJUSTAMENTO; (B) ELÉTRODO PARA A ÁREA INDICADA.	38
FIGURA 36 – (A) ÁREA PLANA À ELEVADA PROFUNDIDADE; (B) ELÉTRODO PARA A SUA ELETROEROSÃO.	39
FIGURA 37 – FOLGA NO ELÉTRODO.	39
FIGURA 38 – PEÇA 3.	40
FIGURA 39 – (A) REPRESENTAÇÃO DAS ÁREAS ERODIDAS PELO PRIMEIRO ELÉTRODO DA PEÇA 3; (B) ELÉTRODO 1, POSIÇÃO 1.	41

FIGURA 40 – ELÉTRODOS 2 E 3 DA POSIÇÃO 1, CONSEQUENTEMENTE.....	41
FIGURA 41 – ELÉTRODO 4 DA PEÇA 3, POSIÇÃO 1.....	42
FIGURA 42 – ELÉTRODO 5 DA PEÇA 3, POSIÇÃO 1.....	42
FIGURA 43 – ELÉTRODO 6 DA PEÇA 3, POSIÇÃO 1.....	43
FIGURA 44 – SEGUNDA POSIÇÃO DE ELETROEROSÃO DA PEÇA 3.....	43
FIGURA 45 – ELÉTRODO 1 E 2 DA PEÇA 3, POSIÇÃO 2, EM SOBREPOSIÇÃO COM A PEÇA DE AÇO.....	44
FIGURA 46 – ELÉTRODO 3 DA PEÇA 3, POSIÇÃO 2.....	44
FIGURA 47- PEÇA 4	45
FIGURA 48 – ELÉTRODO GERAL DA POSIÇÃO 1 E POSIÇÃO 2 DA PEÇA 4, CONSEQUENTEMENTE.....	46
FIGURA 49 – A) ELÉTRODO 3 DA PEÇA 4; B) ELÉTRODO 4 DA PEÇA 4.	46
FIGURA 50 – PEÇA DE VALIDAÇÃO DAS REGRAS DE MODELAÇÃO DE ELÉTRODOS.....	50
FIGURA 51 – ELÉTRODO 1 PARA A ELETROEROSÃO DE LINHA DE JUNTA E DA QUINA VIVA DA ZONA MOLDANTE.....	51
FIGURA 52 – (A) ZONA DEFINIDA PELO SEGUNDO ELÉTRODO; (B) ELÉTRODO 2, NECESSÁRIO PARA A DEFINIÇÃO DE QUINAS VIVAS NA ZONA MOLDANTE.	53
FIGURA 53 – (A) ÁREA DEFINIDA PELO ELÉTRODO 3; (B) ELÉTRODO 3.....	54
FIGURA 54 – (A) ÁREAS ERODIDAS PELO ELÉTRODO 4; (B) ELÉTRODO 4.	55
FIGURA 55 – (A) ÁREAS ERODIDAS PELO ELÉTRODO 5; (B) ELÉTRODO 5.	55
FIGURA 56 – (A) ELÉTRODO 5 E 6, EM QUE O ELÉTRODO 6 É ESPELHADO A PARTIR DO ELÉTRODO 5; (B) ELÉTRODO 5.	56
FIGURA 57 – (A) ZONAS ERODIDAS PELO ELÉTRODO 11 E 12; (B) ELÉTRODO 11.....	56

Índice de Quadros

TABELA 1 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PROGRAMA DE CAD INTELIGENTE DESENVOLVIDO POR LEE ET. AL (2009) [35]. ..	15
TABELA 2 – MEDIDAS DAS BARRAS DE GRAFITE <i>STANDARD</i> [39].	53

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Siglas

CAD – Computer Aided Design

CNC – Controlo Numérico Computorizado

EDM – Electrical Discharge Machining (maquinação por descarga elétrica)

UCS – User Coordinate System

WEMD – Wire Electrical Discharge Machining

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE QUADROS	XI
LISTA DE SIGLAS	XIII
ÍNDICE.....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO	5
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DE EDM.....	7
2.2 EDM E SEUS VÁRIOS TIPOS.....	10
2.3 AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAÇÃO DOS ELÉTRODOS.....	13
3. METODOLOGIA UTILIZADA	17
4. ANÁLISE DE CASOS DE ESTUDO E A SUA GENERALIZAÇÃO	21
4.1 PEÇA 1.....	24
4.2 PEÇA 2.....	27
4.3 PEÇA 3.....	40
4.3.1 A PRIMEIRA POSIÇÃO.....	40
4.3.2 A SEGUNDA POSIÇÃO.....	43
4.4 PEÇA 4.....	45
5. REGRAS DE MODELAÇÃO DE ELÉTRODOS	47
5.1 AS REGRAS	47
5.2 VALIDAÇÃO DAS REGRAS	50
5.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	57
6. CONCLUSÃO.....	59
BIBLIOGRAFIA	61
ANEXO 1	65

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

O processo de fabrico de moldes para a injeção de matéria plástica é composto por várias fases produtivas inerentes à produção dos seus diversos componentes. Tipicamente, o processo de fabrico de moldes para a injeção de matéria plástica começa pelo seu projeto, programação, seguindo de fresagem, eletroerosão e todos os restantes processos de maquinação necessários para a produção dos componentes do molde, acabando na montagem e ajustamento. Esta tese ir-se-á debruçar, em particular, sobre o processo de eletroerosão por penetração, também conhecido por EDM¹. Este processo tem um papel indispensável no fabrico de moldes pois somente através de EDM se conseguem maquinar (i.e. erodir) as partes mais pormenorizadas das peças de aço que depois ficarão impressas nas peças de plástico. Como o mercado cada vez exige produtos mais complexos, acabamentos cada vez melhores, peças cada vez com maior número de detalhes e com design mais inovador e minucioso, as peças de plástico também se tornam cada vez mais complexas de moldar e com maior quantidade de pormenores que são impossíveis de maquinar através de processos convencionais de corte por arranque de aparas, tais como a fresagem. Embora a maquinação por fresagem tenha evoluído bastante, existem sempre detalhes nas peças a maquinar que só conseguem ser obtidos por eletroerosão. De facto, a eletroerosão é considerada um processo de elevada precisão e de alta qualidade superficial pois o eléctrodo, ferramenta utilizada por EDM, não entra em contacto direto com a peça a maquinar, transmitindo apenas choques elétricos o que permite a obtenção de detalhes dificilmente conseguidos pelos processos de maquinação convencional. Desta forma, para o processo de eletroerosão, não importa a dureza do material a maquinar, o que lhe adiciona bastantes vantagens, importando apenas a condutividade térmica da ferramenta e do material a erodir. Tal como foi referido anteriormente, um aspeto essencial na eletroerosão é a modelação e o fabrico da ferramenta a utilizar pela EDM, o eléctrodo. Cada eléctrodo é único e tem de ser modelado especificamente para a área da peça que se pretende erodir. Assim, é necessário que o modelador de eléctrodos saiba exatamente a localização de cada eléctrodo para poder modelá-lo da melhor forma possível. Por esta razão, o processo de modelação de eléctrodos torna-se bastante moroso e complexo, tendo de existir um elevado nível de comunicação entre o programador da máquina

¹ EDM é acrónimo de *Electrical Discharge Machining*.

CNC, que é quem define as áreas que deverão ser erodidas, e o modelador de elétrodos, o que se torna uma tarefa bastante complexa principalmente quando a carga de trabalho é bastante elevada. No entanto, considera-se que poderá existir uma forma alternativa de modelar elétrodos, sustentada em regras empíricas no sentido de que, mesmo que o modelador seja inexperiente na área de moldes, este consiga identificar facilmente as áreas que deverão ser erodidas, assim como, quais as geometrias a incluir nos elétrodos. Para tal, é necessário definir à priori uma lista das ferramentas que se encontram em stock da empresa e que são utilizadas nos centros de maquinaria e adotar uma série de regras de modelação de elétrodos. A formulação destas regras e a sua validação é o objetivo central deste trabalho de investigação. É importante referir que as regras recolhidas por esta abordagem se aplicam apenas a peças de tamanho máximo de 896 x 896 mm.

1.2 Objetivos do trabalho

Face à situação de ausência de regras sistematizadas que possam facilitar o processo de modelação de elétrodos sem necessidade de recorrer a nenhuma ferramenta externa, entendeu-se importante conseguir sistematizar as regras de modelação de elétrodos e transformá-las num procedimento comum que permita ao modelador desenhar elétrodos de uma forma quase automática minimizando erros, desperdícios de material e reduzindo tempos de processamento. Este é o objetivo central desta dissertação de mestrado. Para tal, irão ser analisadas quatro peças de diferentes tamanhos, geometrias, funções e complexidades, de forma a conseguir identificar o maior número de regras possível para que estas abranjam a maior quantidade de peças possível. Procurar-se-á que esta sistematização seja uma fonte de conhecimento para modeladores pouco experientes na área e que queiram aprender rapidamente a técnica de modelação de elétrodos, tornando-os assim mais independentes dos seus colegas (mais experientes ou formadores).

1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado em seis capítulos, onde no primeiro é efetuada uma introdução ao tema de eletroerosão e explicadas de forma sucinta as principais motivações e objetivos do trabalho desenvolvido. O segundo capítulo descreve com maior detalhe o processo de eletroerosão, a sua evolução e as diversas tentativas da sua automação através de diferentes métodos. Inclui-se ainda neste capítulo o estado da arte ao nível de trabalhos desenvolvidos por outros autores ao nível de automação do processo de modelação de elétrodos para eletroerosão.

No terceiro capítulo descreve-se a metodologia utilizada durante a análise das peças de aço escolhidas para a identificação das regras empíricas. É ainda abordada neste capítulo uma breve descrição do tipo de peças que é normalmente erodido através de eletroerosão.

O quarto capítulo descreve toda a análise das peças de aço selecionadas, incluindo uma explicação detalhada do porquê da aplicação de cada eletrodo nas áreas a erodir, assim como das regras inerentes à modelação dos eletrodos que lhe irão dar origem.

O conjunto das regras definidas encontra-se descrito no quinto capítulo, onde estas se encontram organizadas de acordo com as zonas que irão erodir e suas características. Foi ainda desenvolvido um fluxograma com o propósito de resumir e sistematizar as regras de forma a constituir uma orientação ao processo de modelação de eletrodos.

Ainda neste capítulo se verifica a validade das regras definidas através da sua aplicação a um caso prático. Assim, é analisada uma peça seguindo o fluxograma e adotando as regras estabelecidas por forma a modelar os eletrodos necessários para se proceder a eletroerosão dos detalhes impostos pela geometria da peça em estudo.

Por fim, o sexto capítulo descreve as principais conclusões a retirar do trabalho desenvolvido e sustentado pelos resultados obtidos na validação. É ainda feita uma comparação entre os eletrodos modelados de acordo com a metodologia proposta e os definidos pela via convencional. São, também, apontadas diversas linhas de trabalhos futuros que se possam realizar no sentido de continuar a evoluir nesta área.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

2. Caracterização do processo de Eletroerosão

A eletroerosão, também conhecida por maquinação por descarga elétrica (EDM), é um dos processos mais utilizados para a fabricação de moldes. O molde é a ferramenta utilizada para moldar diferentes tipos de materiais, como plásticos, cerâmicos ou metais. Apesar da abrangência da utilização de moldes, neste trabalho ir-se-á tratar apenas de moldes para a injeção de matéria plástica. Este tipo de moldes é tradicionalmente constituído por várias chapas de aço que, em conjunto, compõem o lado fixo do molde, lado do qual, geralmente é injetada a matéria-prima, e o lado móvel, lado onde se situam os componentes que promovem a extração da peça. Estas duas grandes partes são separadas pela linha de junta que define a área onde a peça de plástico é dividida (Figura 1).

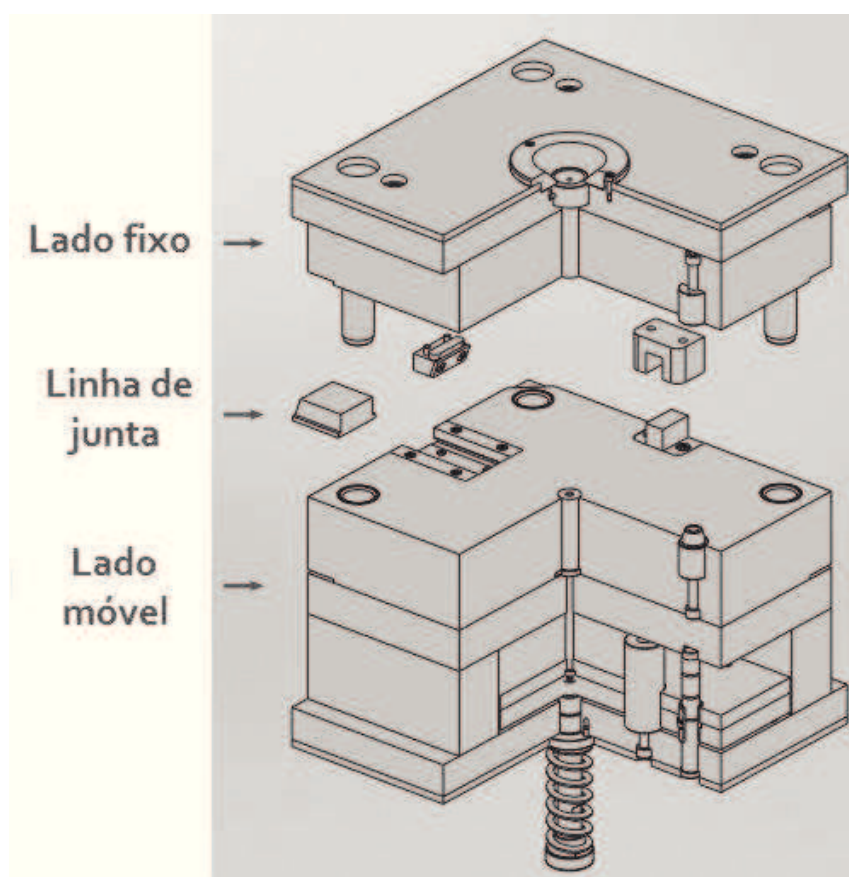


Figura 1 – Exemplo de um molde. Adaptado de Meusbürger 2012 [1].

As chapas metálicas que moldam a peça de plástico são designadas por bucha e cavidade, em que a cavidade fica do lado fixo do molde e a bucha do lado móvel (tipicamente). Outros componentes que podem compor o molde são os elementos móveis e balancés. Estes componentes são necessários quando a peça contém áreas negativas, ou seja, quando a sua

orientação se opõe ao sentido de abertura do molde e sem as quais seria impossível obter peças de plástico para as mais variadas aplicações, desde a medicina até a indústria automóvel. Um dos componentes que também se utiliza nos moldes são os postigos. Os postigos são cópias de uma parte da zona moldante e são colocados nas áreas que sofrem maior desgaste ou nas que podem ter maior tendência a danificar com a utilização. Assim, por forma a evitar problemas de futuro são utilizados postigos, pois estes são mais baratos de substituir que toda a zona moldante. Outra aplicação dos postigos surge aquando da utilização do mesmo molde para a injeção de diferentes versões da peça de plástico, que diferem uma das outras apenas numa zona específica da zona moldante.

Dado que as buchas, as cavidades, os elementos móveis e os postigos são os componentes do molde com geometrias mais complexas, de maior rigidez e que exigem melhor acabamento que os restantes componentes não standard, estes são geralmente maquinados por eletroerosão. É importante salientar que, quando estes componentes chegam ao sector de eletroerosão, já se encontram praticamente no seu estado final o que obriga a que o processo de eletroerosão seja de elevado rigor, dado que qualquer erro poderá acarretar custos elevados. Daí a necessidade de criação de regras no processo e a sistematização do mesmo de forma a minimizar erros. Contrariamente aos restantes processos de maquinação, a dureza do material não tem importância para o processo de eletroerosão, pois o material é removido com o auxílio de energia térmica. Assim, este processo é influenciado apenas pela condutividade térmica do material a ser maquinado. A energia térmica é gerada em forma de descarga elétrica e promove a remoção das partículas de material. A descarga controlada ocorre entre o eléctrodo e a peça, ambas envolvidas num líquido, chamado dielétrico ou líquido eletrolítico. De forma a remover o material, dando a forma pretendida à peça, a geometria do eléctrodo (ferramenta utilizada na eletroerosão) é estabelecida a partir do perfil negativo da peça que se pretende maquinar [2]. Dado que neste processo a ferramenta não entra em contacto direto com a peça, as vibrações não se transmitem e as peças não sofrem tensões mecânicas. Por esta razão, este processo é utilizado na produção da área de moldes, ferramentas, aeroespacial, automóvel e até para produzir componentes cirúrgicos [3]. Salienta-se que o eléctrodo não pode entrar em contacto com a peça pois sem o espaço entre eles não há possibilidade de ocorrerem descargas elétricas. Esse espaço é normalmente designado por gap. O processo de EDM consiste numa série de descargas elétricas que formam um fluxo de corrente pulsada com a frequência de cerca de 240 MHz entre o eléctrodo e a peça a erodir. Como resultado dessas descargas elétricas, tal como referido anteriormente, partículas microscópicas de material da peça são removidas e “expulsas” com a ajuda do líquido dielétrico através do

espaço existente entre a peça e o eletrodo. Além disso, este líquido desempenha ainda o papel de catalisador durante a maquinação da peça, pois dadas as elevadas temperaturas da descarga, o dielétrico na zona da erosão transforma-se em vapor. Desta forma, ocorre uma acumulação de vapor que é impossibilitado de sair do espaço entre a peça e o eletrodo. Apenas quando o eletrodo é elevado, ocorre uma libertação violenta de vapor juntamente com os microcomponentes de aço, o que contribui para maior potência da descarga e melhor limpeza durante o processo de erosão [4].

2.1 Evolução histórica de EDM

A eletroerosão tem estado em contínuo desenvolvimento a partir do momento em que foi possível obter o controlo sobre as descargas elétricas geradas entre o eletrodo e a peça. Anteriormente, desde que o químico inglês Joseph Priestly descobriu as capacidades eletroerosivas da faísca e das descargas elétricas (1770) até ao controlo das descargas, o processo não parecia ter grandes hipóteses de sucesso [5].

Contudo, com a necessidade de desenvolver um processo que permitisse a maquinação de materiais potencialmente complicados de maquinar por processos correntes, o processo de EDM foi considerado bastante promissor e a explorar. A grande evolução deste processo ocorreu praticamente em simultâneo na União Soviética e nos Estados Unidos da América aquando do início da Segunda Guerra Mundial [2].

Na União Soviética, dada a escassez de materiais caros, foi estabelecida como necessidade o desenvolvimento de um processo que permitisse dar maior longevidade às peças do distribuidor dos motores dos veículos militares (platinados), feitas em tungsténio e que entravam em corrosão com grande facilidade. Para resolver este problema, o governo outorgou esta tarefa aos professores Doutor Boris Lazarenko e Doutora Natalya Lazarenko da universidade de Moscovo [2]. O objetivo dos seus trabalhos seria a eliminação das descargas elétricas entre os platinados. Para esse efeito os Lazarenkos tentaram mergulhar os platinados em óleo. Foi então observado que o óleo não eliminava a descarga elétrica, mas permitia que as descargas e a corrosão fossem controladas e regulares. A Figura 2 ilustra o esquema de imersão dos platinados. Contudo, as suas tentativas falharam face ao objetivo central do seu trabalho, pois não conseguiram aumentar a vida útil das peças pretendidas por recurso à imersão dos pontos de ignição (platinados). Em alternativa, os Lazarenkos decidiram investigar a possibilidade de remoção controlada de metal, através do uso da descarga elétrica. Em 1943, estes conseguiram desenvolver o processo, cuja construção era semelhante ao circuito elétrico de ignição do automóvel. O sistema EDM dos Lazarenko era composto por

resistências e condensadores, sendo conhecido por circuito resistivo capacitivo para EDM, e que serviu de base para os futuros desenvolvimentos nesse ramo [2]. A Figura 3 descreve esquematicamente a construção do sistema desenvolvidos pelos Lazarenkos.

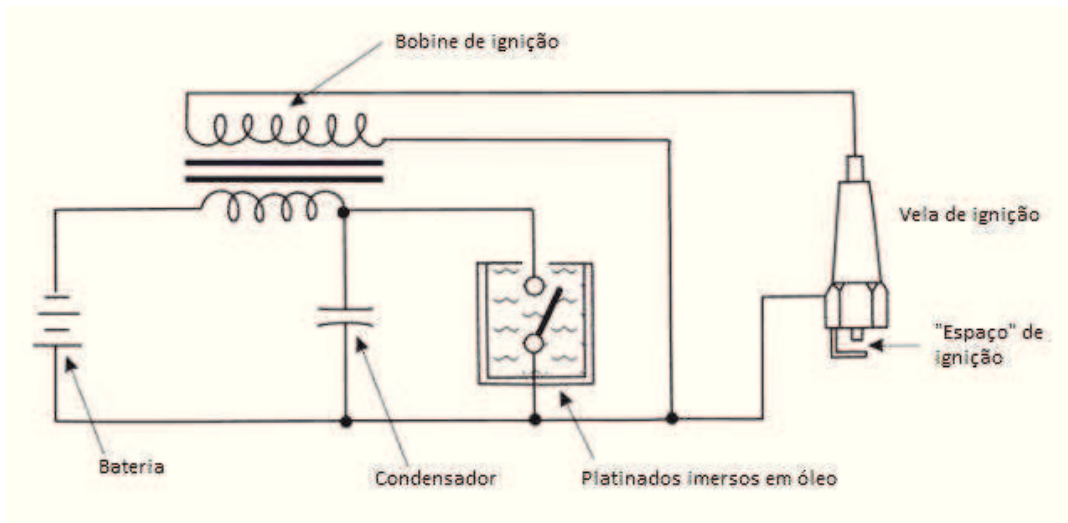


Figura 2 - Representação esquemática da imersão dos platinados.

Este processo de desenvolvimento foi continuado, tendo como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema que permitisse manter o gap entre o elétrico e a peça durante o ciclo de maquinação. Durante a Segunda Guerra Mundial foram produzidas muitas máquinas de eletroerosão que funcionavam com o princípio desenvolvido pelos Lazarenko [2]. Estas máquinas eram usadas para trabalhar metais difíceis de maquinar pelos métodos convencionais, tais como o tungstênio e ligas de carboneto de tungstênio, de forma prática e eficaz. Como resultado do sucesso conseguido, e que culminou com seu reconhecimento mundial, muitas máquinas japonesas e europeias foram construídas com base nesse princípio.

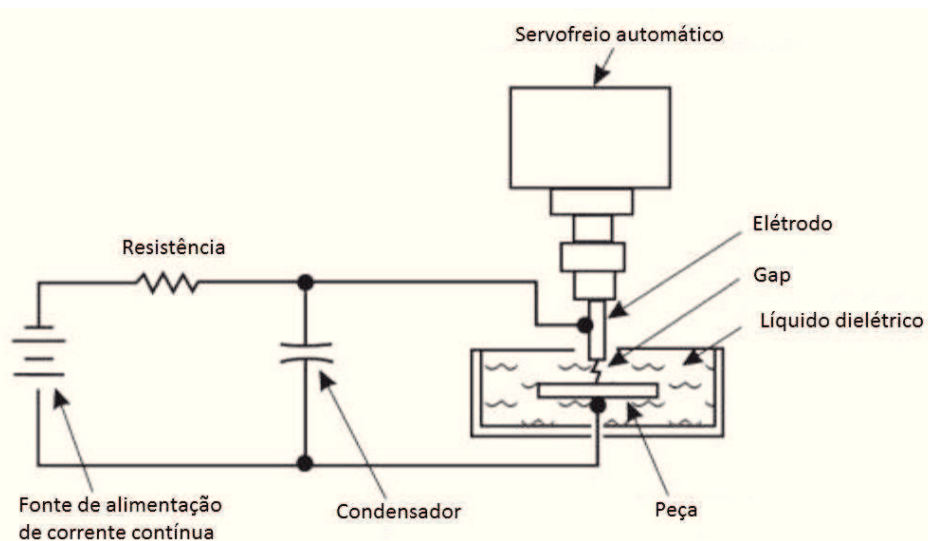


Figura 3 – Circuito resistivo capacitivo dos Lazarenkos para EDM. Adaptado de [2].

Por sua vez, nos Estados Unidos da América, e aproximadamente ao mesmo tempo que os Lazarenkos, uma empresa de fabrico de válvulas hidráulicas e peças em alumínio para aviões, detetou a necessidade de desenvolvimento de processos de maquinação que permitissem remover do aço, machos e brocas partidas. De facto, era corrente a existência de incidentes na produção, envolvendo machos e brocas partidas, e que envolviam elevados custos de substituição das peças estragadas. Então, de forma a aproveitar as peças nas quais tinham ficado presas as brocas ou machos partidos, a três empregados da empresa, – Harold Stark, Victor Harding e Jack Beaver – tiveram a tarefa de descobrir uma maneira de os retirar das peças [2]. Victor Harding, engenheiro eletrotécnico, teve a ideia de utilizar descargas elétricas para erodir as brocas e os machos do corpo das válvulas. Assim, inicialmente foi usada uma ferramenta elétrica para produzir descargas elétricas. Esta funcionava por exposição da broca ou do macho partido, preso na peça metálica, ao eléctrodo da ferramenta, e de seguida, esta era removida em pequenas partes. Contudo, este processo revelou-se bastante moroso, o que o tornou sem qualquer valor prático para “salvar” peças de aeronáutica. Com o intuito de melhorar a velocidade do processo, foi então criada uma versão mais potente da ferramenta que se encontra ilustrada esquematicamente na Figura 4.

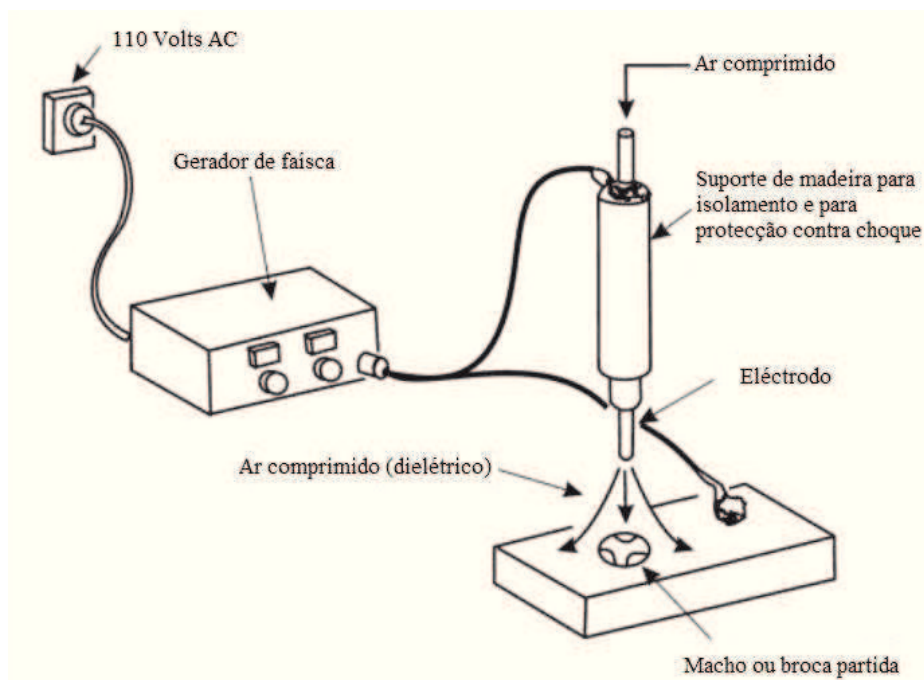


Figura 4 – Dispositivo experimental de EDM do Harold Stark, Victor Harding e Jack Beaver. Adaptado de [2].

Esta nova ferramenta encontrava-se apta a remover as ferramentas danificadas das peças. No entanto, tinha o problema de remoção das limalhas do orifício originado, pois a utilização do ar comprimido para o efeito revelou-se pouco eficiente e bastante limitado. Assim, após inúmeras experiências, chegou-se a conclusão que a água podia ser utilizada como

refrigerante, o que otimizou o processo até ao ponto de ser prático para a sua aplicação na indústria. Posteriormente, o processo foi automatizado de forma a permitir movimentos verticais do eléctrodo. Assim, na presença da corrente, o eléctrodo era eletrizado, o que o puxava para cima e causava descarga eléctrica. Depois da descarga, a corrente era desligada automaticamente, dado que o circuito se encontrava aberto e o eléctrodo perdia o seu magnetismo, o que o fazia descer até se aproximar ao máximo possível da peça. Quando o eléctrodo se aproximava da peça, o circuito fechava e, assim, se iniciava um novo ciclo de descarga (ver Figura 5).

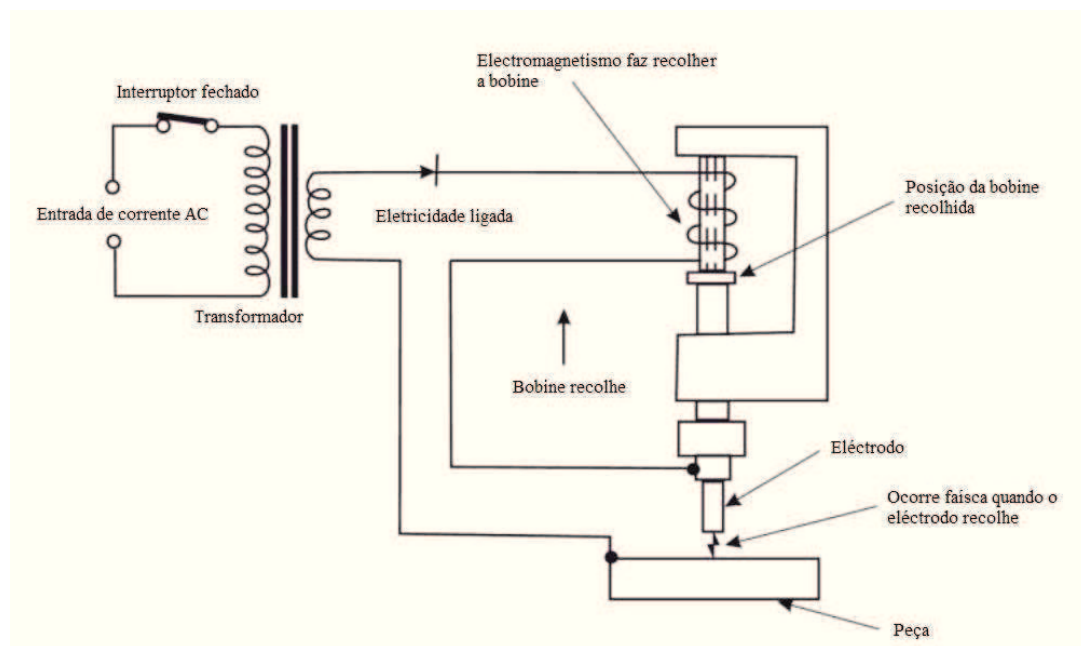


Figura 5 – Representação esquemática do sistema EDM com movimentos verticais. Adaptado de [2].

Desde então, os desenvolvimentos ao processo de EDM nunca mais pararam. Houve uma grande evolução no processo quando foi descoberto o Controlo Numérico Computorizado (CNC²), o que proporcionou substancial melhoria da qualidade da maquinação, pois o CNC permitiu a realização automática das operações de maquinação (desde a inserção dos eléctrodos na máquina até a obtenção de peças polidas e completamente finalizadas). Estes avanços resultaram na utilização intensiva do processo de EDM na indústria dados os benefícios económicos conseguidos. Em paralelo, estes avanços despertaram igualmente grande interesse na sua investigação.

2.2 EDM e seus vários tipos

Tal como referido anteriormente, para erodir uma peça, a energia eléctrica é convertida em energia térmica através de descargas efetuadas em série entre a peça e o eléctrodo, imersos em

² CNC é acrónimo de Controlo Numérico Computorizado.

líquido dielétrico [6]. O líquido dielétrico deve ser controlado para permitir a melhor condutividade e criar o melhor ambiente para o processo de EDM. A faísca deve ser controlada para evitar atingir uma área da peça que não se deseje erodir [7]. A faísca gera energia térmica que irá criar um canal de plasma entre o cátodo e o ânodo (a peça e o eletrodo) a temperaturas entre os 8000 a 12000 °C [8, 7], no entanto, em certos casos pode chegar aos 20000 °C [9]. Estas temperaturas irão induzir a superfície do material de cada polo ao aquecimento extremo e, conseqüentemente derretê-la em pequenas partículas. Se o pulso de corrente direta que ocorre a uma taxa aproximada de 20000-30000Hz, é desligado, o canal de plasma é interrompido. Isto causa um decréscimo de temperatura e permite que o líquido dielétrico lave o material danificado com temperaturas extremas da superfície dos polos [10]. Calcula-se que o volume de material removido por cada descarga se encontra entre 10^{-6} e 10^{-4} mm³, sendo que a taxa de material removido é geralmente entre 2 e 400 mm³/min dependendo da aplicação em causa [3]. O processo de EDM possui alta precisão, pois a descarga elétrica ocorre apenas na forma do eletrodo [11].

Conforme as necessidades da indústria, os diferentes tipos de materiais e tipos de maquinação durante a história de eletroerosão foram desenvolvidas diferentes formas de aplicação de EDM. Uma dessas variantes é eletroerosão por fio ou WEDM³. Esta tem a vantagem de maquinar materiais condutivos, de elevada força e resistentes à temperatura, com formas e perfis complexos [12]. Como o nome indica, este tipo de eletroerosão utiliza um fio contínuo que passa pela peça. Este processo é controlado por um microprocessador que elimina a necessidade de elaborar eletrodos, como no processo tradicional de EDM.

Outra variante do processo de eletroerosão é o processo de maquinação híbrida. Este tipo de processo tem um grande interesse acadêmico e industrial no seu desenvolvimento, porque inclui maquinação de alta rotação, retificação, EDM e maquinação por laser [13]. O processo de maquinação híbrida utiliza processos de remoção de material convencional e não convencional tirando partido das vantagens de cada um. Existem alguns estudos que combinam maquinação ultrassônica e eletroerosão [14, 15]. Kremer, et al (1991) mostram que a maquinação ultrassônica tem um bom acabamento e uma taxa de remoção de material muito baixa, mas se for combinada com EDM, consegue-se uma maior eficiência e uma taxa de remoção de material mais elevada. As vibrações ultrassônicas criam mais turbulência e cavitação, o que ajuda à lavagem de material derretido dos polos e menos material líquido volta a re-solidificar nas superfícies. O stress térmico residual e as microfissuras na superfície

³ WEMD é acrônimo de *Wire Electrical Discharge Machining*.

também são reduzidos com a maquinação ultrassônica. Em resumo estas duas técnicas combinadas têm uma alta eficiência e deixam uma boa integridade na superfície [16].

Também é possível utilizar eletroerosão para a criação de texturas. Esta técnica tem duas ramificações: a descarga elétrica de textura [17] e a descarga elétrica de desgaste [18]. A primeira serve para criação de textura em aços laminados e folhas de alumínio e a segunda para fabricar ferramentas de diamantes policristalinos.

Visto que a eletroerosão é um método de maquinação bastante preciso e confiável, este é popular mundialmente. A aplicação comum de EDM é para a produção de moldes de injeção de plástico, cavidades de fundição, cavidades de aço endurecido e cavidades forjadas. No entanto, esta pode ser usada para outras aplicações, como, por exemplo, partes de motores, o que inclui as pás do compressor de ligas de titânio e super-alumínios baseados em níquel.

A EDM tem muitas vantagens sobre outras técnicas de maquinação devido à capacidade de criar partes complexas e difíceis, com tolerâncias apertadas. É possível maquinar aços extremamente duros que quebram ao impacto, mesmo em peças de pequena escala. Este método não produz deformação pois não existe contacto direto entre o eletrodo e a peça, logo a peça maquinada não ganha rebarba no fim de acabada. Este processo é bastante demorado e os eletrodos são diferentes para cada área a erodir em particular, mas as vantagens do EDM ultrapassam claramente as desvantagens [19].

Recentemente, devido à redução de tamanho dos produtos, a micro-EDM tem sido uma técnica de maquinação bastante utilizada. Esta é capaz de criar orifícios de 40 μm de diâmetro [20]. Para além disso, micro-EDM, tal como EDM convencional tem a possibilidade de trabalhar em aços com elevados níveis de dureza, eliminando assim, os problemas de variação dimensional após o tratamento [21]. Outra aplicação de micro-EDM consiste no desenvolvimento de eletroerosão em trajetória, para ter a possibilidade de se criar os canais de refrigeração para os moldes ou distribuidores. Existem algumas tentativas de fazer EDM em trajetória, mas esta técnica necessita de ferramentas especiais e/ou mecanismos de controlo complexo para efetuar os movimentos da trajetória dos eletrodos [22, 23, 24].

Novos avanços em EDM possibilitaram o seu uso na cerâmica. A cerâmica é conhecida como um dos materiais não condutores, mas são frequentemente maquinados por maquinação ultrassônica e maquinação por laser – baseado em métodos de eletroerosão. O mesmo autor faz referência a maquinação híbrida, em que obteve bons resultados na maquinação de carboneto de boro (B_4C) e carboneto de silício cerâmico sem óxido (SiSiC) [25]. Mas este

tipo de eletroerosão tem muitas limitações porque o material apresenta uma resistência muito baixa [26, 27].

O processo de EDM foi testado com alguns materiais compósitos, tais como espumas metálicas, com a aplicação de EDM rotacional, utilizando um elétrodo tipo disco [28].

A eletroerosão tem sido alvo de muita investigação, mas o grande avanço nas pesquisas deu-se com o aparecimento do CAD (Computer Aided Design). Este sistema possibilitou a criação de geometria em 3D, como elétrodos, as suas fixações e a peça a ser maquinada. Ou seja, o CAD possibilitou a simplificação da peça e simplificou o seu fabrico [29]. Os mais recentes desenvolvimentos em sistemas de CAD/CAM simplificaram a fabricação de elétrodos, pois assim é possível selecionar os parâmetros de maquinação antes de efetuar a mesma [30].

Outra inovação feita por Yeo, et. al. (1999) [31] foi o desenvolvimento de um processo de planificação para maquinação “verde”. Este sistema toma em consideração o impacto ambiental, como energia e desperdício e o impacto na produção tradicional, como taxa de produção e qualidade. O interesse em pesquisas para prototipagem rápida também tem crescido. Fabricação rápida de elétrodos é caracterizada em aproximação direta e indireta [21]. A fabricação direta usa o modelo macho/positivo, enquanto a indireta utiliza o modelo de cavidade negativo/fêmea. Também tem sido estudada a sinterização seletiva a laser de pós metálicos que serve para a produção de positivos/machos elétrodos, que são compostos por um cobre não eletrolítico e cobre galvanizado para melhorar o acabamento da superfície e da condutividade do elétrodo poroso [32].

2.3 Automação do processo de modelação dos elétrodos

Como já foi referido, a ferramenta utilizada na eletroerosão é designada por elétrodo. Este apresenta o perfil negativo da peça a gravar, logo, cada elétrodo é único e tem de ser modelado especificamente para a zona a erodir. Ao nível de produção de moldes a modelação de elétrodos torna-se uma tarefa sempre diferente, pois não existem dois elétrodos iguais, o que a torna bastante morosa e complexa. Neste sentido, a criação de regras a seguir durante a modelação de elétrodos, de forma a permitir maior grau de automação deste processo poderá ser uma vantagem competitiva importante para vencer os desafios atuais da indústria de moldes. Adicionalmente, a criação destas regras poderá ser uma forma de sistematizar o conhecimento desta atividade com vista a reduzir o tempo de formação de novos desenhadores de elétrodos. Existem atualmente algumas evoluções neste sentido. A título de exemplo, Ding, et. al. (2002) [33] identificou a necessidade da automação do processo de

modelação dos eléctrodos, dado que este consumia bastante tempo durante o processo de produção de um molde. Neste sentido, o seu trabalho consistiu no desenvolvimento de um programa computacional que permite a criação automática do eléctrodo tendo por base a seleção da área a erodir. O eléctrodo que é criado por este processo inclui o suporte (holder) indicado para as dimensões do eléctrodo e a colocação automática do referencial no eléctrodo em relação à máquina de eletroerosão (USC⁴). Em 2004, Mahajan, et. al. [34] refere que embora os programas de modelação da altura já se encontrem capazes de construir eléctrodos simples quando indicadas as zonas a erodir, quando se trata de peças mais complexas, tais como as peças com elevado número de zonas a erodir e com elevada complexidade geométrica, estes programas tornam-se praticamente inúteis visto que a metodologia de design dos eléctrodos é diferente. Segundo estes autores, isto acontece porque a quantidade de combinações de diferentes eléctrodos para uma peça mais complexa é maior e é necessário encontrar a melhor solução, o que normalmente, advém do know-how do próprio desenhador/modelador. Assim, a solução apresentada por estes investigadores consiste no desenvolvimento de um programa que modela, para uma dada peça, eléctrodos para todas as possibilidades de erosão possíveis baseando-se no conhecimento dos modeladores. Para tal, o conhecimento dos modeladores foi organizado em regras. Com base nas regras definidas, o desenhador selecciona o método de erosão pretendido baseando-se, por exemplo, nos tempos de erosão e nos custos que daí advêm. Por método pode se entender, por exemplo, a escolha por parte de modelador da aplicação de um eléctrodo geral (o que erode toda a zona moldante de uma vez só) ou a repartição da zona moldante em diferentes eléctrodos. Por sua vez as regras definidas baseiam-se no facto de que a geometria de cada eléctrodo está relacionada com os custos da eletroerosão. De facto, existe uma relação entre a quantidade e a complexidade de eléctrodos, pois quanto maior a complexidade destes menor a sua quantidade (i.e. poderá optar por modelar mais eléctrodos e mais simples em vez de apenas um e de geometria complexa). Neste sentido, a modelação de eléctrodos é normalmente realizada por pessoas experientes que empiricamente estabelecem a melhor relação entre a quantidade e a complexidade dos eléctrodos. Uma outra abordagem desenvolvida com o intuito de conseguir a automação de EDM surgiu em 2008, quando Lee et. al. [35] desenvolveram um software inteligente de CAD⁵ para a modelação de eléctrodos para os moldes de injeção. Este software baseia-se na separação das áreas da peça em pequenos segmentos até conseguir obter um eléctrodo de fácil execução. Para tal, aplicam-se várias regras de modelação baseadas em

⁴ UCS é acrónimo de *User Coordinate System*.

⁵ CAD é acrónimo de *Computer Aided Design*.

linhas e pontos de união entre as superfícies. Para validar o software desenvolvido, estes autores efetuaram testes numa vasta gama de peças, e chegaram à conclusão de que a ferramenta desenvolvida consegue melhorar o desempenho da modelação de eléctrodos em pelo menos 50% e tem potencial para atingir os 85%. O desempenho da ferramenta foi calculado através da comparação do número de clicks, da quantidade de ficheiros processados e do tempo despendido durante a utilização de um programa usual e do programa de CAD “inteligente” desenvolvido. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Avaliação do desempenho de programa de CAD inteligente desenvolvido por Lee et. al (2009) [35].

Dados do desempenho	Sem o uso de uma ferramenta de CAD inteligente	Com a ferramenta de CAD inteligente			Melhoria (%)
		Automação	Modificação	Total	
Nº de clicks	120	10	35	45	62.5
Quantidade de ficheiros processados	38	0	12	12	68.4
Tempo (min)	42.5	5	14	19	55.3

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

3. Metodologia utilizada

Este trabalho seguirá uma abordagem teórica sobre o método de modelação de eléctrodos e irá esquematizá-lo com base no know-how existente. Para tal, serão analisadas peças de aço que foram erodidas por forma a identificar um conjunto de regras que prestem auxílio aos futuros desenhadores na modelação de eléctrodos. As peças foram escolhidas e classificadas de acordo com a sua complexidade, tamanho e quantidade de eléctrodos a aplicar. É importante salientar que, cada eléctrodo é único e, por isso, a análise tem de ser feita olhando para todas as variáveis que influenciam a sua modelação. Essas variáveis podem ser, por exemplo, o tamanho de grafite que servirá para produzir o eléctrodo, as ferramentas que irão maquinar essa grafite e até o posicionamento do eléctrodo na peça. Neste sentido, quando se trata de modelação de eléctrodos para proceder à eletroerosão, não se pode considerar o eléctrodo como uma ferramenta isolada, mas sim como uma ferramenta que trabalha em conjunto com outras (outros eléctrodos). Dado que cada eléctrodo é único, cada vez que se modela, tem de ser definido um programa de maquinação individual da grafite, tendo em conta as várias ferramentas que existem e, em especial, as que se encontram dentro do stock da empresa. É de referir ainda, que a peça a maquinar através de eletroerosão, face às suas características específicas, tais como, a maior complexidade geométrica, terá de ser maquinada por uma série de processos que antecedem a eletroerosão. Neste sentido, é importante analisar logo, desde o início, quais as peças de um molde que têm maior tendência a serem erodidas. Tipicamente, estas peças são a bucha, a cavidade, os posições, os elementos móveis, os balancés, as barras extratoras ou os extratores, pois são elementos que replicam a forma da peça a moldar em negativo, sendo responsáveis em parte pela qualidade da peça de plástico obtida. Contudo, os elementos móveis, balancés e extratores podem ser adquiridos praticamente no seu estado final (existem muitos fabricantes destes acessórios normalizados para a indústria de moldes), sendo que apenas se torna necessário definir a zona moldante. De facto, dada a relação preço/qualidade dos componentes normalizados, muitos fabricantes de moldes optam por comprar estes componentes em vez de os fabricar nas próprias instalações. Relativamente à bucha e à cavidade, por norma estes componentes são feitos de raiz nas empresas tendo que passar por vários processos de maquinação até se encontrarem no seu estado final. Genericamente, as etapas de fabrico que envolvem a maquinação de uma peça moldante do molde para a injeção de plástico encontram-se esquematizadas na Figura 6. Portanto, quando

a peça chega à etapa de eletroerosão o seu custo já é bastante elevado e havendo um erro durante a eletroerosão da mesma, tal implica custos ainda maiores. Como tal, para identificar as regras associadas aos processos de decisão inerentes ao processo de modelação de eléctrodos, o modelador tem de ter em mente que o trabalho que está a ser realizado é de elevada responsabilidade. Também, o modelador tem de ter em conta todos os custos que a modelação de um eléctrodo implica, como, por exemplo, a maquinação do eléctrodo, o preço da grafite, o tempo de eletroerosão e a quantidade total de eléctrodos por peça de aço.

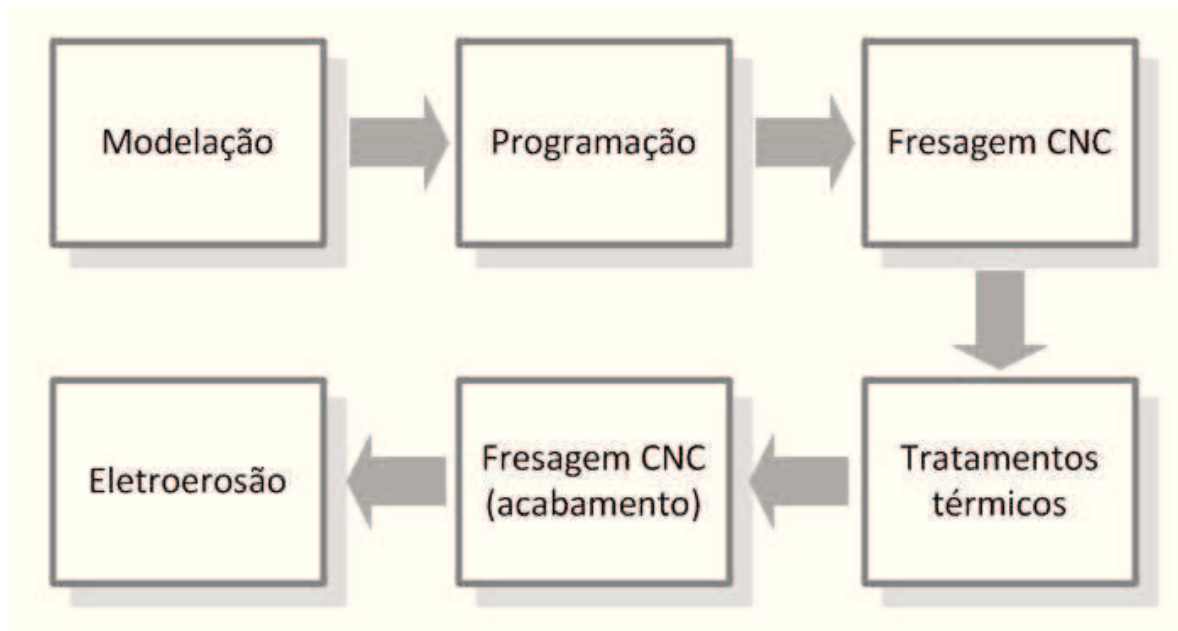


Figura 6 – Etapas comuns de maquinação de uma peça de aço.

Dado que o objetivo principal deste trabalho se prende com a modelação de eléctrodos, será apenas considerada a análise de peças após a finalização de sua fresagem. Portanto, o processo de eletroerosão é o último a aplicar na peça em avaliação. Esta abordagem da modelação de eléctrodos difere da aplicada por Lee et al. (2009) [35], pois este encara a peça de aço como se esta fosse apenas erodida. Esta é a grande desvantagem desse trabalho, pois o eléctrodo não pode ser considerado como uma peça isolada, uma vez que este é uma ferramenta em contínua interação com a peça a erodir e as ferramentas que o vão maquinar. Assim, durante a sua modelação é necessário ter atenção, por exemplo aos raios e aos cantos da peça de aço, para que quando efetuada a maquinação do eléctrodo este seja o mais fácil e simples de maquinar com as ferramentas da empresa. Por essa razão, considera-se que a ferramenta desenvolvida por Lee et al. (2009) [35] se revela bastante prática, mas não explica qual será o seu comportamento caso a peça contenha um raio. Já Ding et. al.(2002) [33]

apresenta uma abordagem completamente diferente, pois sempre que fala em eletroerosão considera uma peça já maquinada, tal como neste trabalho. Estes autores identificam quatro diferentes tipos de geometrias impossíveis de obter através da fresagem e para as quais será necessário proceder à modelação de eléctrodos (ver Figura 7). Contudo, estas geometrias têm de ser identificadas pelo modelador que é propenso a erro, o que vem reforçar, mais uma vez, a necessidade de criação de regras empíricas para a modelação de eléctrodos, sendo este o objetivo principal deste trabalho.

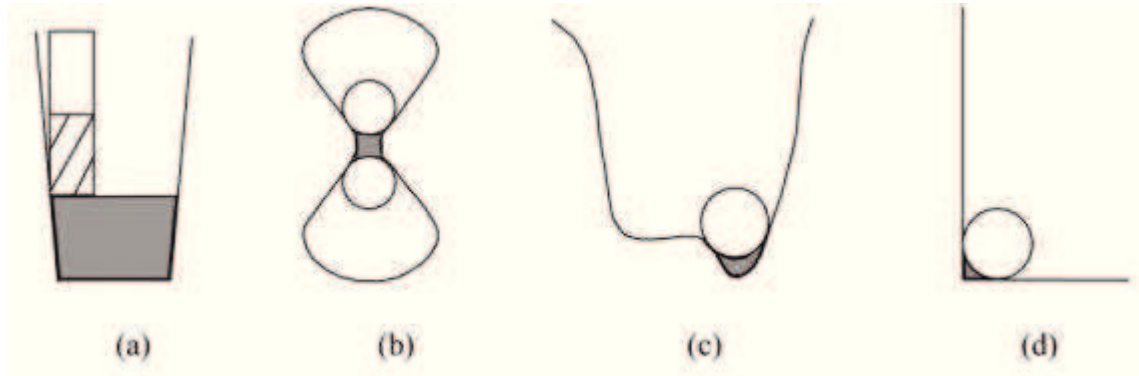


Figura 7 – Tipos de geometria impossíveis de acabar por fresagem segundo *Ding et. al.*(2002) [33].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4. Análise de casos de estudo e a sua generalização

Sendo o eléctrodo a ferramenta utilizada na eletroerosão é necessário entender a sua constituição e funcionamento por forma a conseguir modelá-lo. A Figura 8 identifica os constituintes genéricos de um eléctrodo. Assim, este é geralmente, composto pelo eléctrodo propriamente dito – parte que vai efetuar a eletroerosão e que replica as formas da peça de aço, o blank que é uma extensão do eléctrodo, também feita em grafite, que tem como função reforçar o eléctrodo e fazer com que este encaixe numa base standard, base essa que é designada por holder. O blank vai definir o tamanho do bloco da matéria-prima que teremos que encomendar e maquinar, sendo que é preferível utilizar blocos de medidas normalizadas, como, por exemplo 25 X 25 mm, ou 30 X 30 mm.

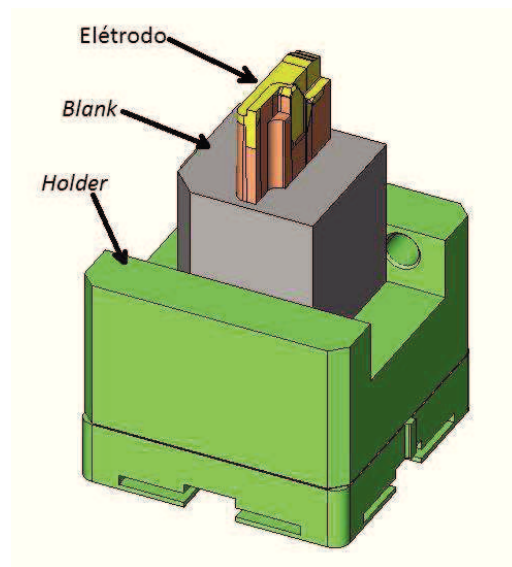


Figura 8 – Os constituintes genéricos de um eléctrodo.

O tamanho do holder varia de acordo com as dimensões do blank e tem as medidas necessárias para qualquer tipo de eléctrodo. Existem dois grande fornecedores principais de acessórios para a eletroerosão que também produzem holders, a Erowa e a System 3R. A Erowa apresenta as mais variadas soluções para holders (Figura 9).

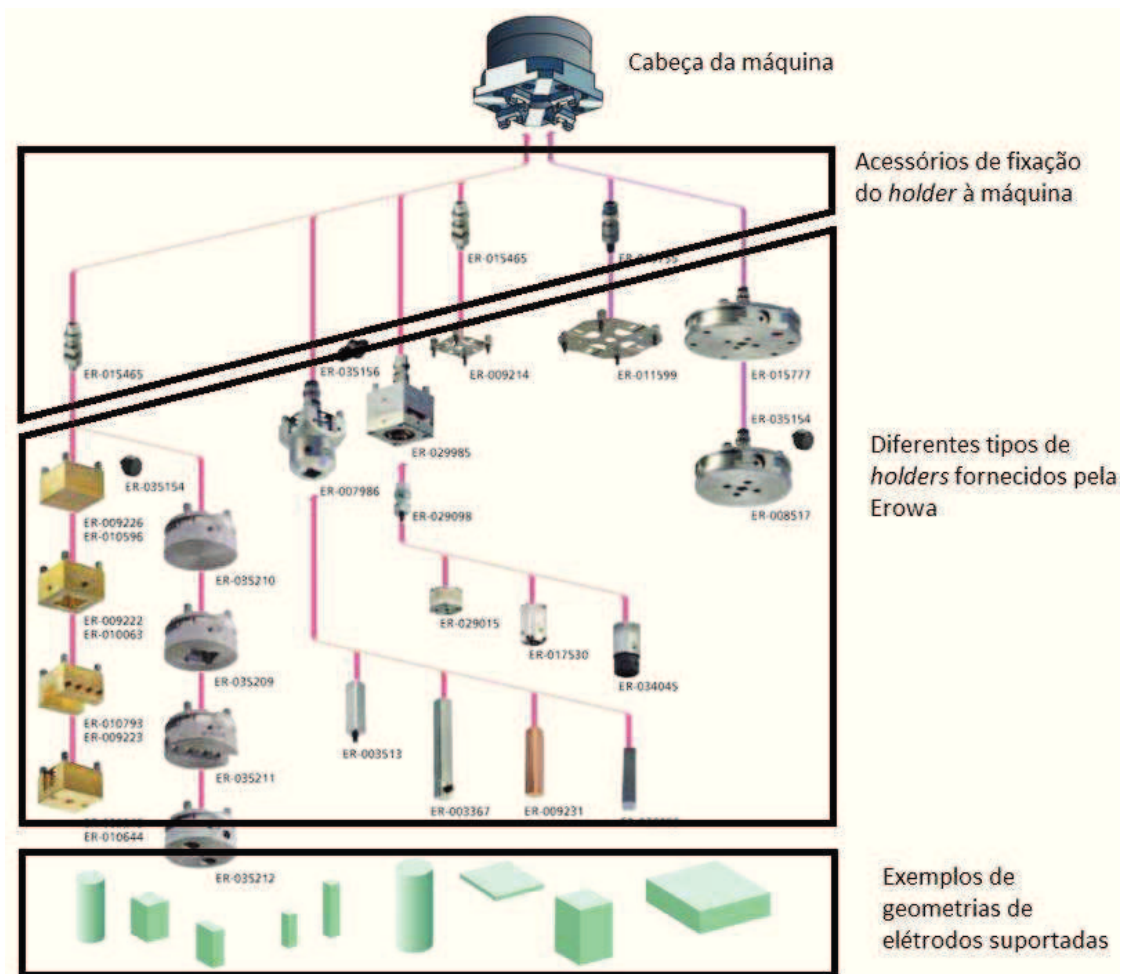


Figura 9 – Esquema de bases/holders de elétrodos da Erowa. Adaptado de [36].

Esta figura apresenta um esquema facultado pelo fornecedor Erowa, ilustrando diferentes tipos e tamanhos de holders disponíveis no mercado [36]. A System 3R disponibiliza também varios holders adequados para diferentes tamanhos de elétrodos, desde 25 X 25 mm até as bases de comprimento de 120 mm com rasgo de 30 mm que permitem a erosão de elétrodos com tamanho superior a 30 X 120 mm (Figura 10).

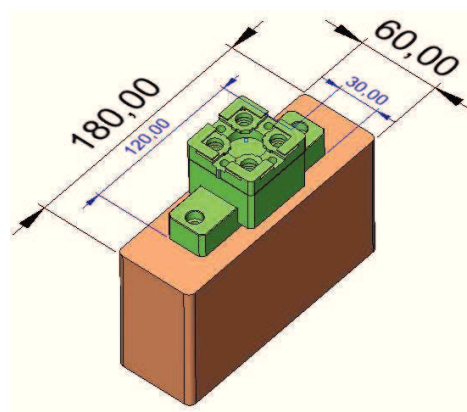


Figura 10 – Exemplo de elétrodo que pode ser colocado na base de 120 mm de comprimento com rasgo de 30 mm.

Estes fornecem também bases para extensão em altura dos elétrodos por forma a possibilitar eletroerosões profundas, até o máximo de 270 mm (Figura 11).

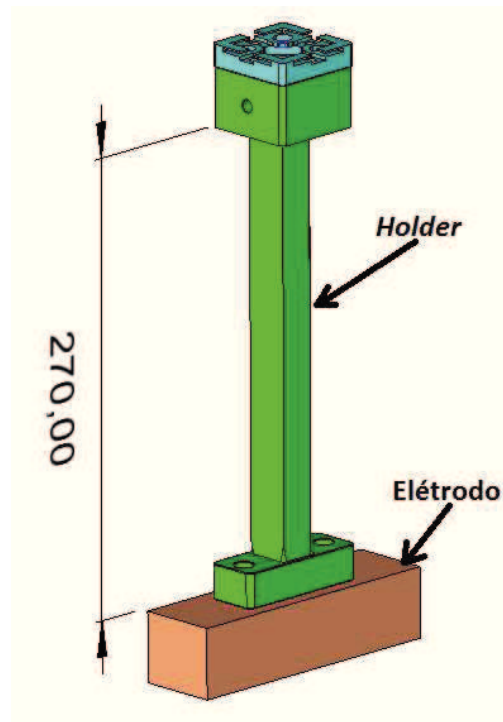


Figura 11 – Exemplo de *holder* com extensão de altura para 270 mm.

Na modelação, cada holder tem associado um ponto situado no seu topo e ao centro para, no fim da colocação do holder no elétrodo, adicionar UCS que o vai posicionar relativamente à peça a erodir e à máquina de eletroerosão, considerando que estamos a trabalhar no eCimatron [37]. É importante referir ainda que os elétrodos descritos nesta abordagem são uma cópia exata da zona moldante (réplica inversa da geometria). Não há necessidade de se preocupar com o gap dos elétrodos durante a sua modelação, pois este apenas é considerado aquando da maquinação do elétrodo e, posteriormente, durante a programação da máquina de eletroerosão.

Como já foi referido, a metodologia utilizada neste trabalho passou pela seleção de um conjunto de peças a maquinar através de eletroerosão de forma a identificar as regras associadas à identificação das áreas que têm de ser maquinadas por eletroerosão e a modelação dos elétrodos para as mesmas. Assim, abaixo serão descritas as peças de moldes que foram consideradas. Para cada uma delas será então descrito o processo de modelação de elétrodos e extraídas as regras adotadas, que serão posteriormente numeradas e descritas no capítulo seguinte. De forma a simplificar a visualização, os elétrodos serão representados a amarelo, as áreas de ajustamento a branco e as áreas moldantes a azul ou cor-de-rosa.

Quando se refere a ferramentas de maquinação de elétrodos é importante ter em consideração a série de ferramentas da marca comercial Hitachi de referência D-EPDR e D-EPDB, pois estas referências representam as ferramentas diamantadas que são próprias para a maquinação de grafite. No entanto podem ser utilizados outros tipos de ferramenta para aço temperado, mas estas terão muito maior desgaste, pior qualidade de acabamento e, portanto um custo mais elevado para a empresa que consegue manter uma máquina de eletroerosão em contínuo funcionamento [38].

Também é importante referir que todas as regras apresentadas de seguida apenas se aplicam às peças de tamanho máximo de 896 x 896 x 100 mm (comprimento x largura x altura). Isto acontece porque a estratégia de maquinação e o processo de fabrico de um molde de tamanho superior a 896 x 896 mm, como por exemplo o molde para para-choques de um carro, é bastante diferente de um molde de tamanho inferior.

4.1 Peça 1

A peça representada na Figura 12 ilustra uma cavidade de um molde. Esta peça vai produzir duas peças de plástico por cada ciclo de injeção. As áreas que irão entrar em contacto direto com a matéria plástica estão representadas a azul e são chamadas zonas moldantes. As áreas com as quais irão entrar em contacto elementos funcionais do molde estão representadas a branco e são conhecidas por áreas de ajustamento. Dado a sua importância, os elétrodos que irão erodir as áreas de ajustamento devem ser modelados em primeiro lugar⁶.

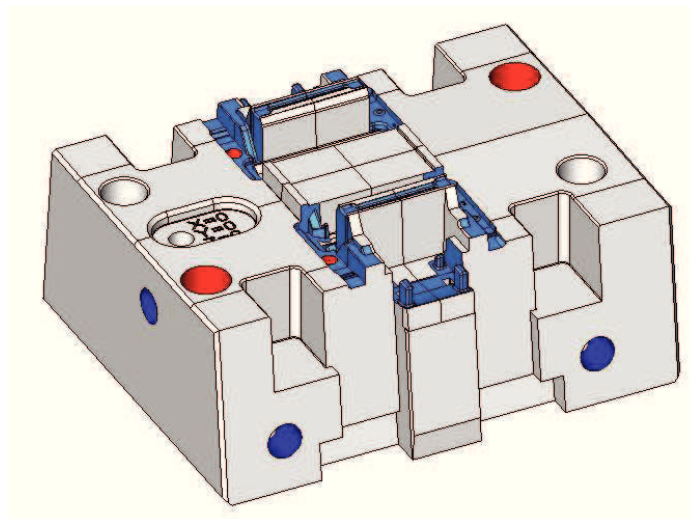


Figura 12 – Peça 1.

⁶ Regra 14

As áreas da peça que contêm cantos em quina viva devem ser acabadas através de eletroerosão e, portanto, devem ser isolados num elétrodo⁷. Um exemplo deste tipo de geometria de peça está mostrado na Figura 13 (a) e pode ser maquinado através de eletroerosão por recurso ao elétrodo da Figura 13 (b). As setas nas figuras indicam o canto em causa.

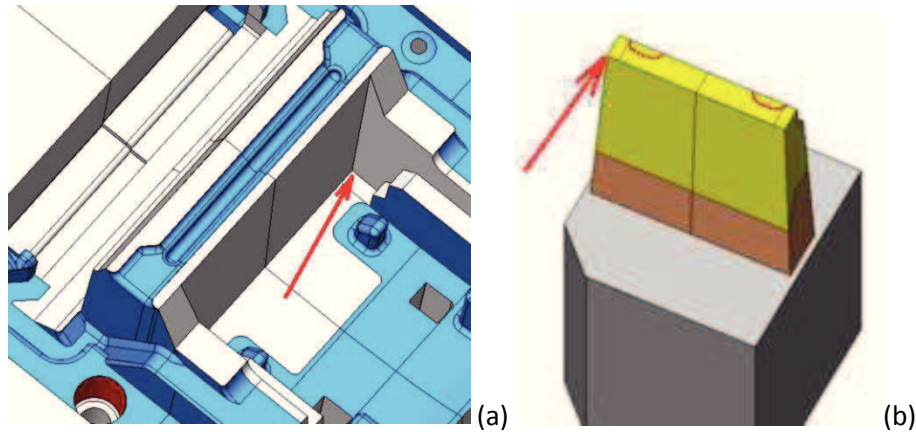


Figura 13 – Canto na geometria da peça (a), elétrodos para erodir essa área (b).

Dado que é impossível maquinar através de fresagem os cantos da zona de ajustamento da cavidade, fazendo o negativo das superfícies que os compõem, ou seja o elétrodo, esta tarefa torna-se bastante fácil e simples de maquinar na grafite.

No elétrodo representado na Figura 13 (b) é possível destacar que este erode tanto a zona de ajustamento, onde se encontra contida a quina viva por erodir, como também, contempla uma área da zona moldante, destacada pela linha vermelha. Isto pode acontecer quando estas áreas se encontram alinhadas no mesmo plano. Também pode acontecer que a zona moldante adjacente contenha uma área que se pretenda erodir e assim, o elétrodo que serviu para erodir a zona de ajustamento pode conter a zona moldante, visto que estas se encontram no mesmo plano⁸.

Quando as tolerâncias da peça são reduzidas e a peça contém duas áreas ligadas através de um chanfro, deve-se fazer um elétrodo para as áreas e um outro para a eletroerosão do chanfro⁹. Consideram-se tolerâncias reduzidas aquelas que numa peça de tamanho inferior a 200 X 150 X 200 (mm) são inferiores a 0,01 mm, numa peça de tamanho entre 200 X 150 X 200 (mm) até 1000 X 1000 X 400 (mm) sejam inferiores à 0,1 mm e numa peça de tamanho superior que 1000 X 1000 X 400 (mm) sejam inferiores à 0,5 mm. Um exemplo deste tipo de situação

⁷ Regra 2

⁸ Regra 8

⁹ Regra 5

está demonstrado na Figura 14 (a), onde as áreas representadas a rosa e verde são as que podem ser incluídas no mesmo eletrodo e o chanfro indicado pela seta deve ser isolado num eletrodo à parte. Assim o eletrodo para a erosão das áreas cor-de-rosa e verde terá o aspeto representado na Figura 14 (b) e o eletrodo para a maquinação do chanfro será como o da Figura 14 (c).

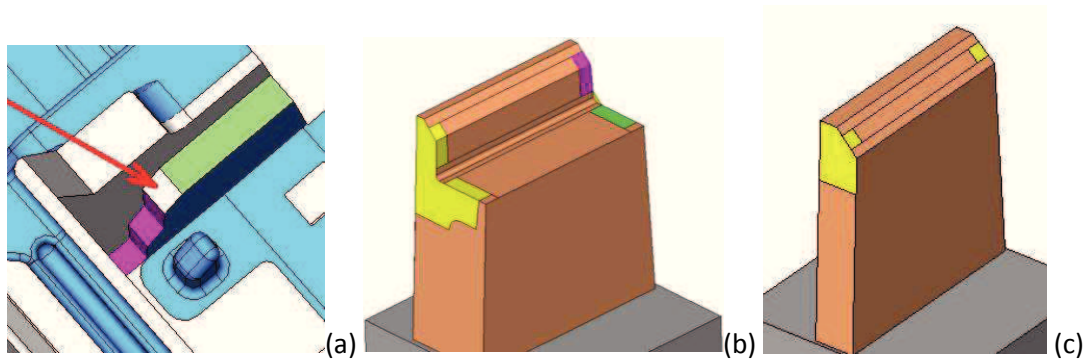


Figura 14 – Erosão de um canto chanfrado.

Outro tipo de eletrodo é necessário quando a área a ser maquinada é muito fina, como apresentado na Figura 15 (a). Nestes casos é necessário reforçar estruturalmente o eletrodo para que este não se quebre durante sua produção¹⁰. Esta área tem 0,39 mm de largura e 20,00 mm de comprimento. Partindo do princípio que para área de erosão é sempre necessário utilizar pelo menos dois eletrodos, um para desbaste e outro para acabamento, este eletrodo pode ser reforçado juntando estes dois eletrodos num só¹¹. Esta junção irá resultar no eletrodo representado na Figura 15 (b). É importante referir que esta junção apenas é possível quando a geometria da peça o permite. Isto significa que o modelador tem que ter cuidado ao duplicar uma geometria no mesmo eletrodo para que o duplicado não entre em conflito com as áreas vizinhas da peça a erodir.

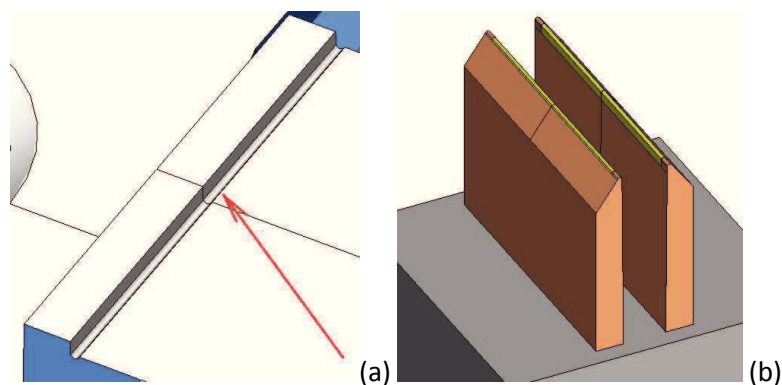


Figura 15 – Área com 0,39 mm de largura por erodir (a); eletrodo para maquinar a área em questão (b).

¹⁰ Regra 9

¹¹ Regra 4

Outro exemplo de aplicação de EDM revela-se na abertura de pequenas caixas para a colocação de postigos¹². A Figura 16 (a) mostra o exemplo de uma destas caixas que tem 2,00 mm de largura e 6,00 mm de profundidade, dimensões bastante complicadas de obter por maquinação através de métodos tradicionais. No entanto não é impossível de se realizar através de fresagem, mas seria necessário comprar uma ferramenta específica para este caso, o que se revela muito mais dispendioso do que fazer um eléctrodo. Também, como já referido anteriormente, é possível incluir um eléctrodo de desbaste e um de acabamento no mesmo eléctrodo¹³, (ver Figura 16 (b)).

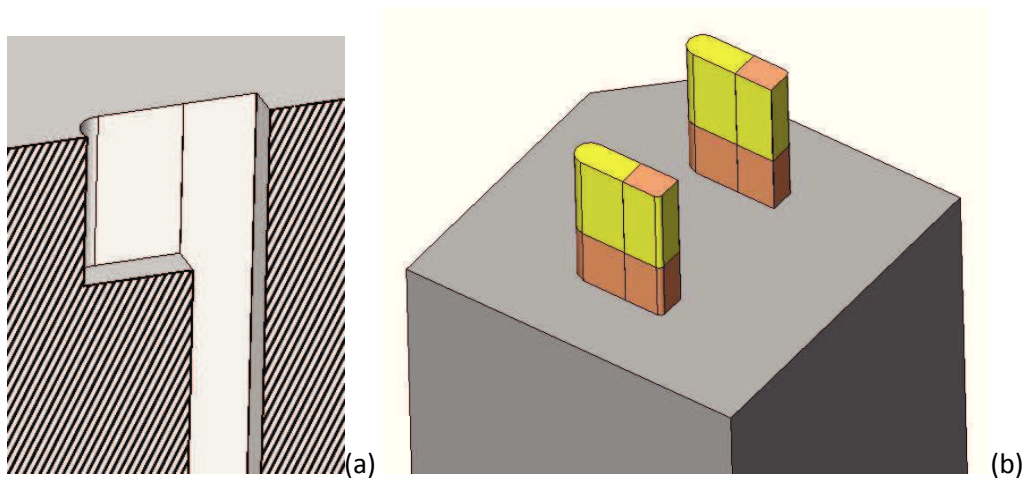


Figura 16 – Perfil em corte da caixa do postigo (a); Eléctrodo para a maquinação dessa área (b).

4.2 Peça 2

Trata-se de uma cavidade de um molde com dimensão de 1196 X 980 mm que permitiu a injeção de uma peça para um corta-relva (Figura 17). Para a sua eletroerosão foram necessários 55 eléctrodos. Contudo, na modelação destes eléctrodos não se seguiu a regra da modelação dos eléctrodos de ajustamento em primeiro lugar. Esta peça destaca-se pela elevada quantidade de eléctrodos, pois esta contém zonas com profundidades acima dos 100 mm. Esta característica dificulta bastante a sua maquinação através de fresagem por arranque de aparas, pelo que essas zonas tiveram de ser maquinadas por eletroerosão praticamente na sua totalidade.

¹² Regra 3

¹³ Regra 4

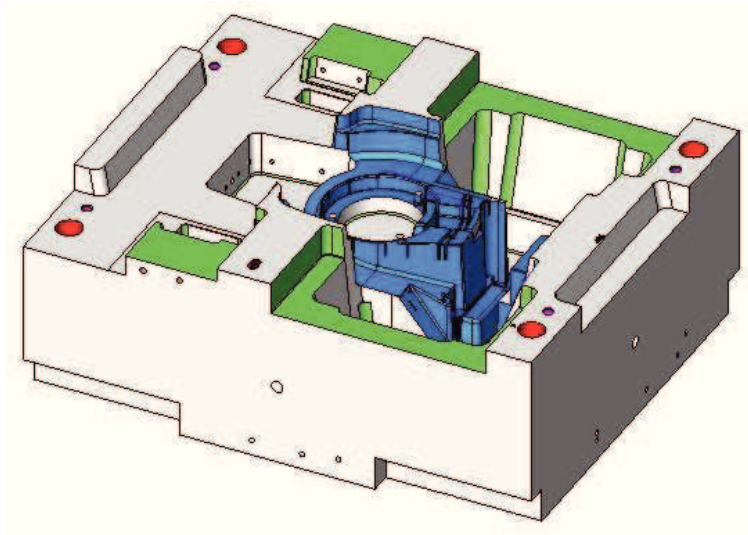


Figura 17 – Peça 2: cavidade de um molde para uma peça de um corta-relva.

Esta regra de modelação de eléctrodos de ajustamento em primeiro lugar não foi seguida pois quando se começou a modelação de eléctrodos, os de ajustamento não eram necessários, por ausência de elementos móveis, balancés ou posições no molde. A ausência de eléctrodos de ajustamento também se pode justificar com a possibilidade de maquinar todas as caixas para as partes funcionais do molde através da fresagem, o que normalmente acontece nos moldes grandes, pois geralmente os “elementos” que os compõem são também de grande dimensão. Assim, nestes casos, o processo de modelação de eléctrodos começa pelos eléctrodos para a zona moldante.

Neste caso, não existe nenhuma ordem específica de modelação de eléctrodos. Portanto, apenas quando os eléctrodos estão a ser modelados é que se decide quais é que irão ficar no início e quais os eléctrodos que ficam para o final da eletroerosão da peça. Cabe ao modelador a opção da escolha de ordem e lógica de modelação dos eléctrodos e a conseguinte ordem de eletroerosão da peça de aço. O eléctrodo apresentado na Figura 18 (a) erode um pormenor da peça, existindo mais seis eléctrodos semelhantes. Houve necessidade da utilização de eletroerosão nesta zona pois a área a erodir é bastante reduzida (3,00 X 3,00 X 1,00 mm) e em quina viva. O eléctrodo para esta área terá a seguinte apresentação, veja Figura 18 (b).

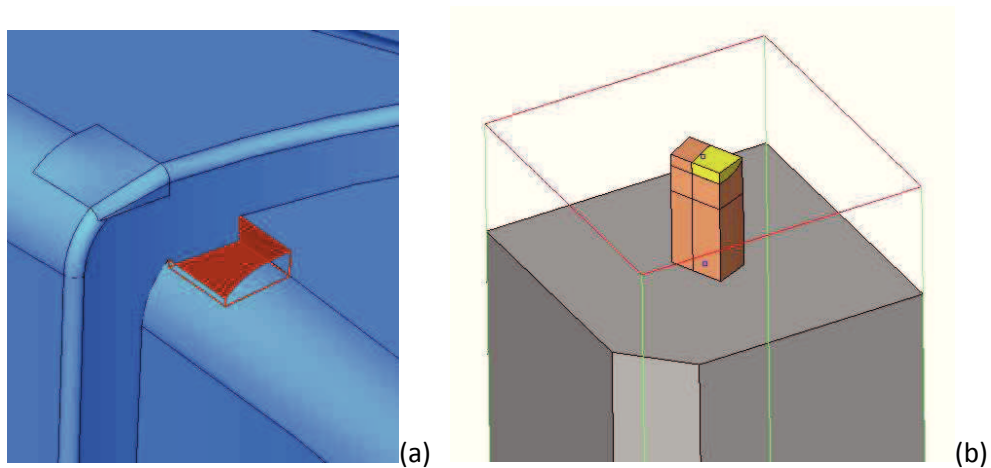


Figura 18 – Área da peça com 3,00 X 3,00 X 1,00 mm (a); Eléctrodo para a zona em questão (b).

Outro exemplo de zona onde tem de se aplicar um eléctrodo para a sua eletroerosão são os ribs que sejam possíveis de maquinar por fresagem, mas cujas quinas vivas são impossíveis de acabar através de maquinação convencional (veja-se o exemplo da Figura 19 (a)). O eléctrodo para esta parte da peça terá que ser modelado da maneira indicada na Figura 19 (b).

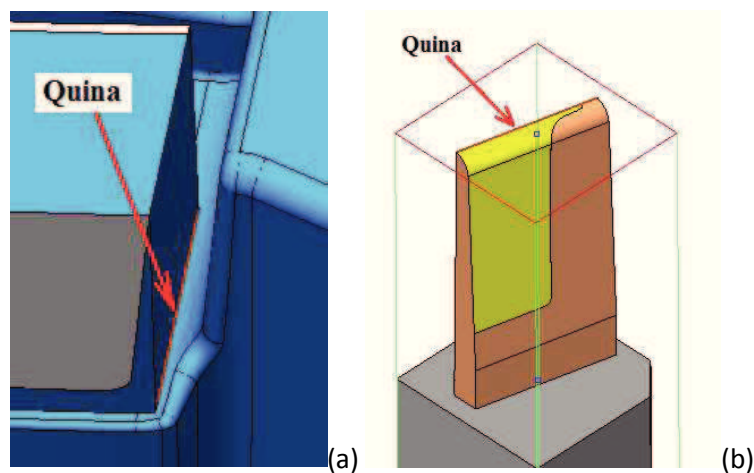


Figura 19 – Quina viva dentro de um *rib* (a); Eléctrodo para a sua maquinação (b).

Ribs são áreas justas na peça de aço que se refletem, geralmente, em reforços da peça de plástico. O exemplo de um *rib* está representado na Figura 20.

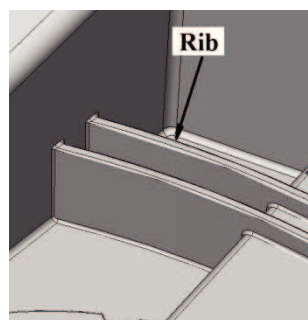


Figura 20 – Exemplo de um *rib*.

Por vezes, existe a possibilidade da junção de dois elétrodos que, teoricamente seriam impossíveis de juntar devido à geometria da peça¹⁴. Esta regra aplica-se quando as tolerâncias da peça o permitem. Este é o caso do eléctrodo apresentado na Figura 21, que envolve duas quinas vivas impossíveis de maquinar na grafite. Mas como as tolerâncias da peça nessa zona não são muito rigorosas e permitem a criação de raios nessa área, será uma boa oportunidade de poupança de grafite e de tempo de erosão. Desta maneira as arestas que estão modeladas no programa de modelação CAD irão ficar com um raio igual ao da ferramenta adequada para a maquinação deste tipo de geometria que se encontra em stock da empresa.



Figura 21 – Eléctrodo fora do comum.

Áreas de peças como a apresentada na Figura 22 podem ter como opção a modelação de elétrodos de ajustamento seguido por um eléctrodo para a zona moldante (pois não faria sentido aplicar um eléctrodo sem aplicar o outro). Caso aplicássemos apenas um dos elétrodos a peça não ia ficar totalmente acabada. Assim, esta zona da peça tem de ser erodida, obrigatoriamente, por dois elétrodos porque a área de ajustamento liga-se à área moldante através de uma quina viva¹⁵.

¹⁴ Regra 17

¹⁵ Regra 6

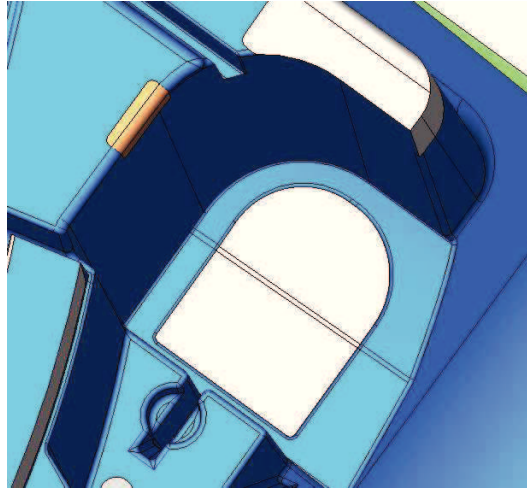


Figura 22 – Zona da peça que tem de ser definida por dois eléttodos.

Os eléttodos para esta zona da peça terão que ter as formas apresentadas na Figura 23 (a) e (b). O primeiro eléttodo (a) destina-se à zona de ajustamento e segue a curva das suas superfícies de forma a não entrar em contacto com a área moldante¹⁶. O segundo eléttodo (b) está modelado de maneira a não tocar na área de ajustamento, saindo para cima no sentido dos raios¹⁷.

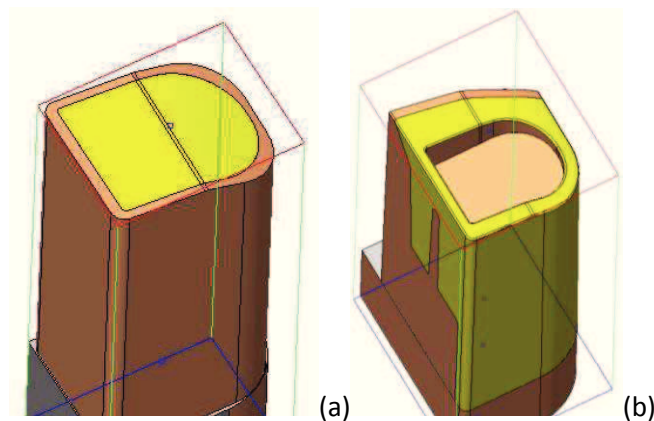


Figura 23 – Eléttodos para a maquinação da área acima descrita.

Nos casos em que é impossível maquinação uma parte da peça devido à sua profundidade também se aplicam eléttodos¹⁸. Estas profundidades podem variar entre 100 e 350 mm segundo os holders comuns disponíveis à venda no mercado. Os eléttodos têm de ter a altura da peça ou então serem seguros à máquina por suportes especiais. Um exemplo deste tipo de área está apresentado na Figura 24 (a). Esta parte da peça tem uma altura de aproximadamente 164 mm e no fundo tem um raio de 1 mm, o que complica bastante os parâmetros de

¹⁶ Regra 15

¹⁷ Regra 16

¹⁸ Regra 22

maquinação. O eléctrodo para erodir esta área terá assim uma altura de 205 mm (Figura 24 (b) e (c)).

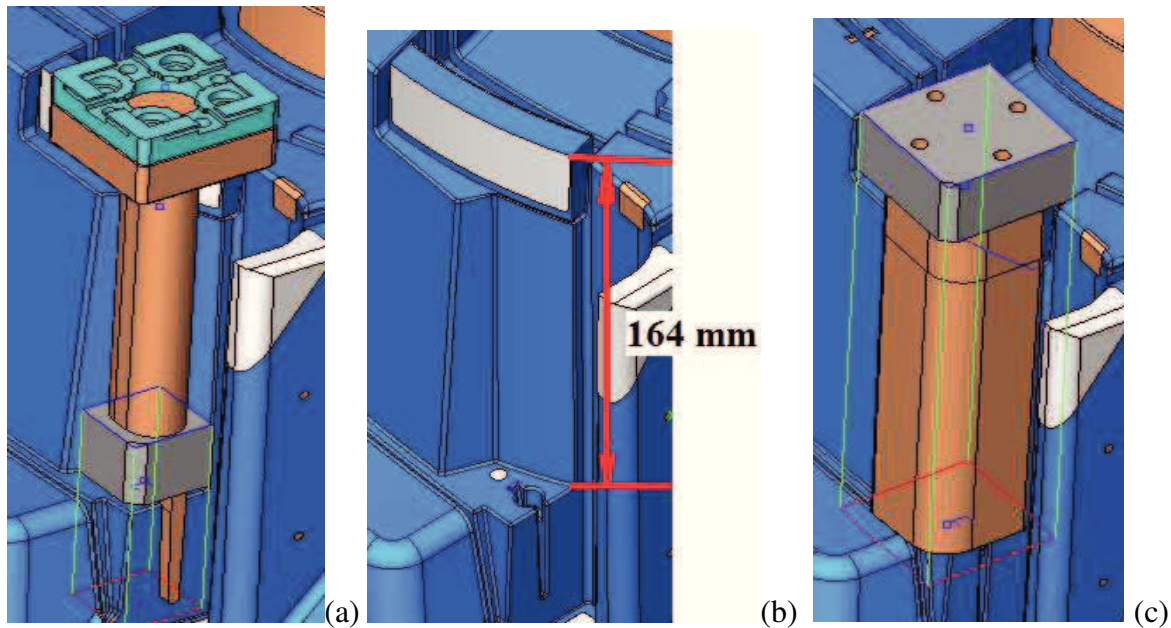


Figura 24 – (a) Eléctrodo com suporte especial; (b) Área de altura elevada; (c) Eléctrodo para a sua eletroerosão.

No caso de se optar por um suporte (holder) com características que permitam a erosão na área em questão, este teria de ser aplicado da mesma forma que o da Figura 24 (a). No caso específico desta figura, apresenta-se um eléctrodo para erosão de um rib. Os ribs com largura entre 0,5 a 5,00 mm de largura e com profundidade superior a 10,00 mm são maquinados através de eletroerosão, pois são áreas de difícil acesso para as ferramentas de fresagem¹⁹.

As áreas em “L” com grande profundidade, desde 35mm, e com largura entre 0,5 a 5,00 mm que estejam ligadas com um raio igual ou inferior a 2,00 mm têm de ser erodidas por dois eléctrodos diferentes. Caso quiséssemos definir esta zona apenas por um eléctrodo a ferramenta a usar seria uma de raio de 1 mm e 60 mm de altura. Mas como esta ferramenta, de momento não se encontrava em stock da empresa, é preferível dividir este eléctrodo em dois em alternativa a adquirir uma ferramenta nova muito particular e com pouco uso (ver Figura 25)²⁰.

¹⁹ Regra 24

²⁰ Regra 12

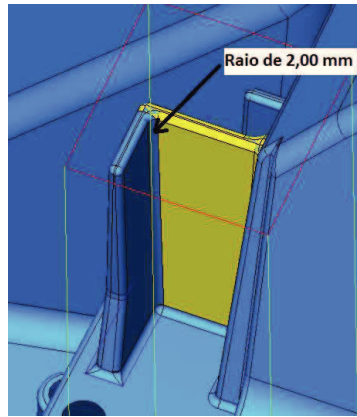


Figura 25 – Exemplo de um *rib* em “L” que tem de ser erodido por dois elétrodos diferentes.

Os ribs de difícil acesso com elevada profundidade têm de ser erodidos²¹. O rib demonstrado na Figura 26 tem 86,00 mm de profundidade e aproximadamente 2,00 mm de largura e encontra-se a uma profundidade aproximada de 193,00 mm do topo da chapa. Isto quer dizer que a ferramenta para maquinar este rib teria de ter um comprimento de cerca de 200 mm e um raio de 0,50 mm o que a iria tornar muito frágil. Desta forma, chega-se à conclusão que não existe forma de maquinar este rib, senão por eletroerosão através de holders especiais que têm extensões até 270,00 mm.

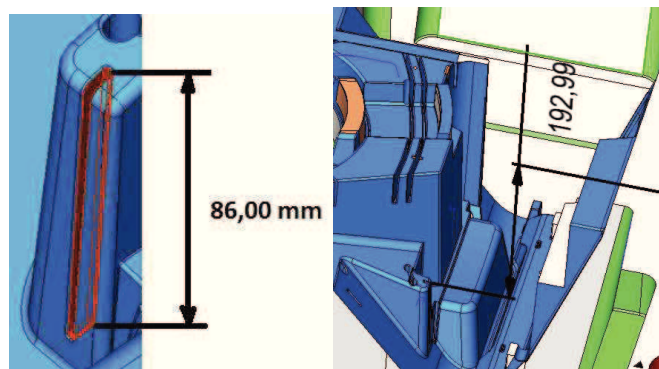


Figura 26 – Exemplo de um *rib* com elevada profundidade.

Quando não se consegue dar um acabamento exigido pelo cliente num plano inclinado da peça, essa área tem de levar um elétrodo de acabamento para a finalizar de forma a conseguir a rugosidade pretendida ou para aplicar uma textura através de eletroerosão (Figura 27(a)). Isto acontece porque nem sempre é possível dar um bom acabamento superficial através da fresagem, portanto é necessário acabar esse plano através da eletroerosão²². O elétrodo modelado para o acabamento desta superfície apresenta-se na Figura 27 (b).

²¹ Regra 24

²² Regra 8

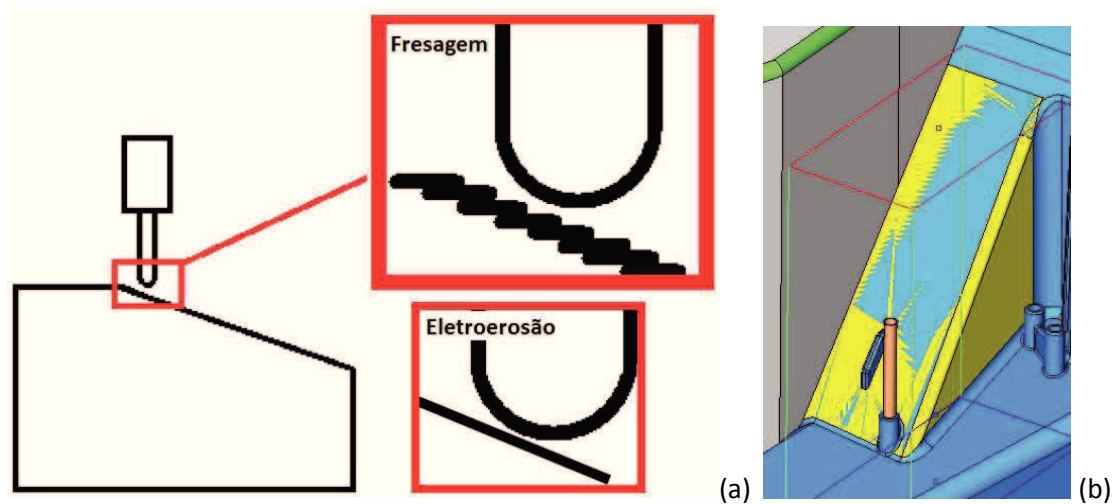


Figura 27 – Comparação de acabamentos da fresagem com a de eletroerosão (a). Eléctrodo modelado para o plano inclinado (b)

Outro eléctrodo que foi modelado para esta peça, foi colocado num sítio impossível de acabar através da fresagem, pois esta zona contém quinas vivas na sua geometria e está ligada às áreas adjacentes através de quinas vivas²³ (Figura 28).

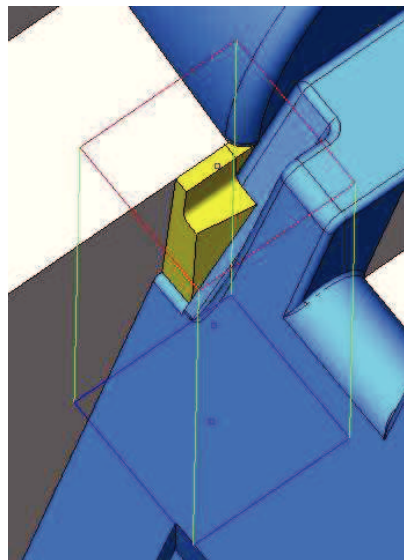


Figura 28- Eléctrodo com quinas vivas.

Outro exemplo de aplicação de eléctrodo numa área com raio reduzido (1,00 mm) e a grande profundidade (aproximadamente 300,00 mm) encontra-se apresentada na Figura 29. Esta área é de difícil acesso pois a ferramenta que maquinará esse raio deveria trabalhar a uma profundidade equivalente a 300,00 mm. Uma ferramenta com estas características não existe dentro do stock da Hitachi e mesmo que exista à venda no mercado por outros fornecedores, esta tem um preço muito mais elevado do que modelar e obter um eléctrodo que permita erodir

²³ Regra 2

esta área. Ou seja, tipicamente, para a maquinação de apenas uma cavidade, a compra de ferramentas específicas para fresagem de uma área pouco comum não se justifica²⁴.

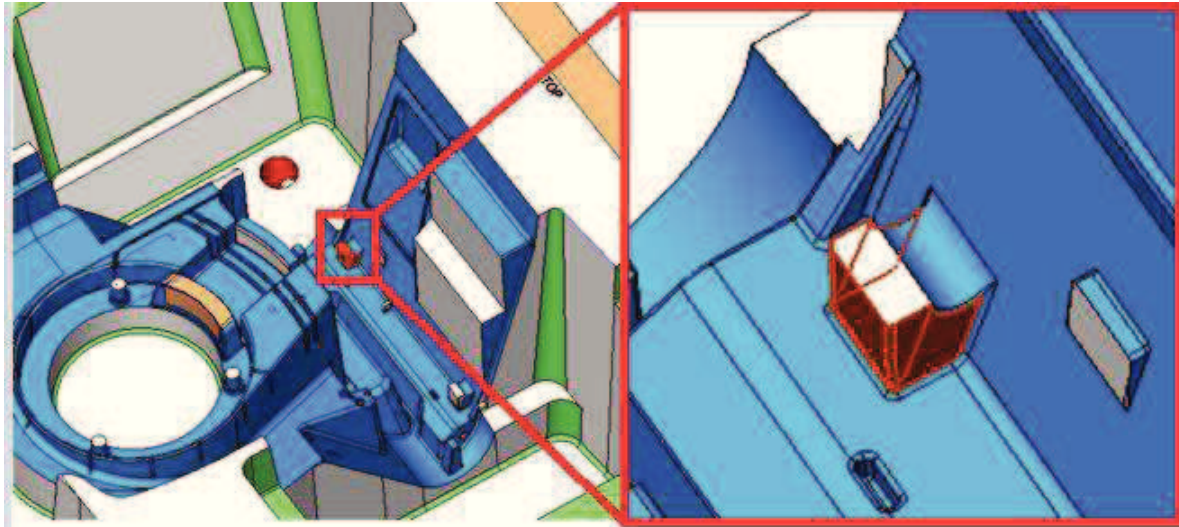


Figura 29 – Exemplo de uma área a erodir com o raio de fundo de 1,00 mm e profundidade de 300,00 mm.

As quinas vivas da área moldante têm de ser definidas através da eletroerosão²⁵. Um exemplo de eléctrodo que define as quinas vivas encontra-se representado na Figura 30. As quinas a serem definidas através da eletroerosão estão delineadas a linha vermelha. No entanto, estas quinas foram definidas por dois eléctrodos diferentes, isto deve-se ao facto da caixa que, pela sua posição na zona moldante, teve também de ser definida através de eletroerosão.

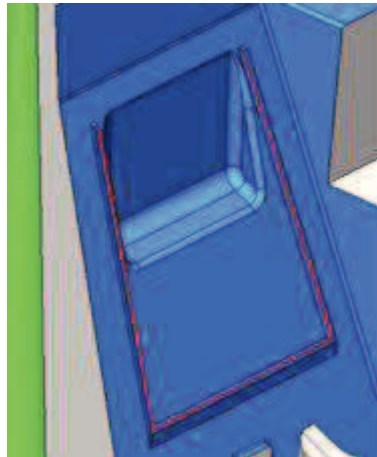


Figura 30 – Exemplo de quinas vivas na zona moldante.

Portanto, para definir esta área em específico, os eléctrodos foram modelados da forma que se demonstra na Figura 31. É de referir que estas imagens representam a zona moldante em negativo.

²⁴ Regra 21

²⁵ Regra 2

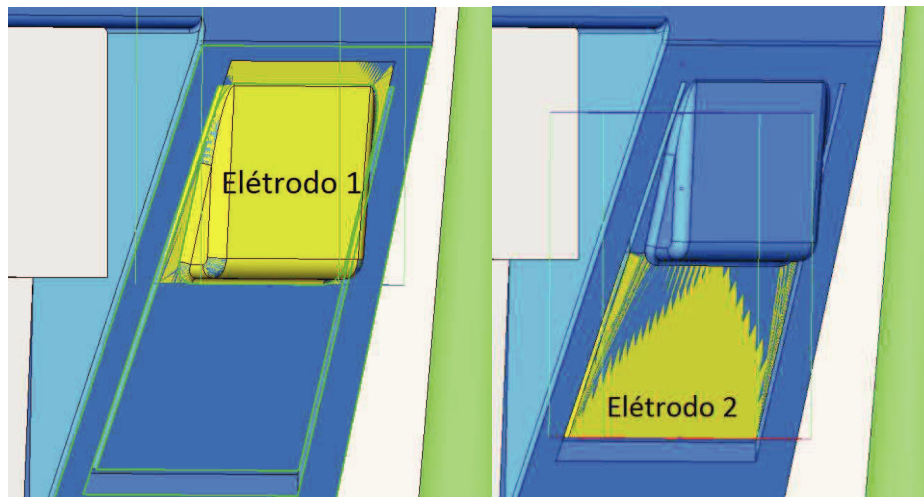


Figura 31 – Eléttodos para a eletroerosão da área indicada na Figura 30.

Na mesma área da peça, também existe uma quina viva na parte exterior da “janela”, ver Figura 32 (a). No entanto, esta área teve de ser erodida por três eléttodos diferentes. Estes eléttodos tiveram de ser construídos de uma forma especial – visando apanhar os dois lados da “janela”. Pois, caso quiséssemos construir um eléttodo para cada lado da “janela” este teria de ter um comprimento aproximado de 200 mm²⁶. Desta forma obtemos dois eléttodos para definir a “janela” ao comprimento e um outro para a parte de baixo. Assim, conseguimos obter 3 eléttodos de tamanho médio (140.00 X 50.00 X 150.00 mm) e conseguimos erodir as áreas requeridas. Um dos eléttodos para as áreas laterais está representado na Figura 32 (b), onde as setas indicam as arestas do eléttodo que irão erodir as quinas vivas na “janela” da peça.

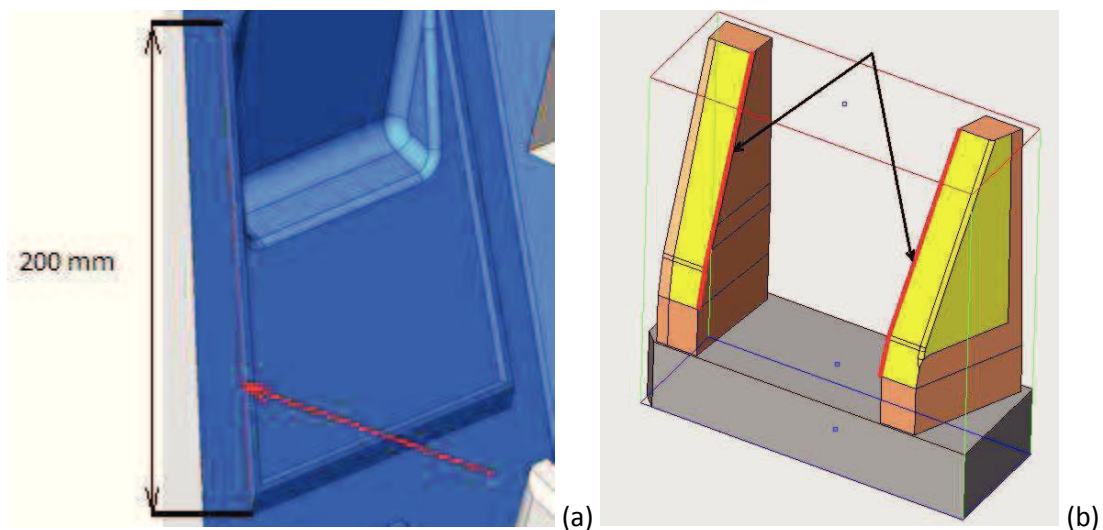


Figura 32 – (a) Quina viva na parte exterior da “janela”; (b) eléttodo para a erosão da “janela”, as setas indicam as arestas.

²⁶ Regra 11

Uma situação semelhante acontece numa área da peça, vizinha à da “janela”. Esta área encontra-se localizada à mesma profundidade da peça que a área da “janela” e portanto foi erodida de uma forma semelhante. Ou seja, em vez de ser erodida por apenas um eletrodo foi erodida por dois²⁷. Consegue-se observar a sua localização junto com os eletrodos pelos quais foi erodida na Figura 33.

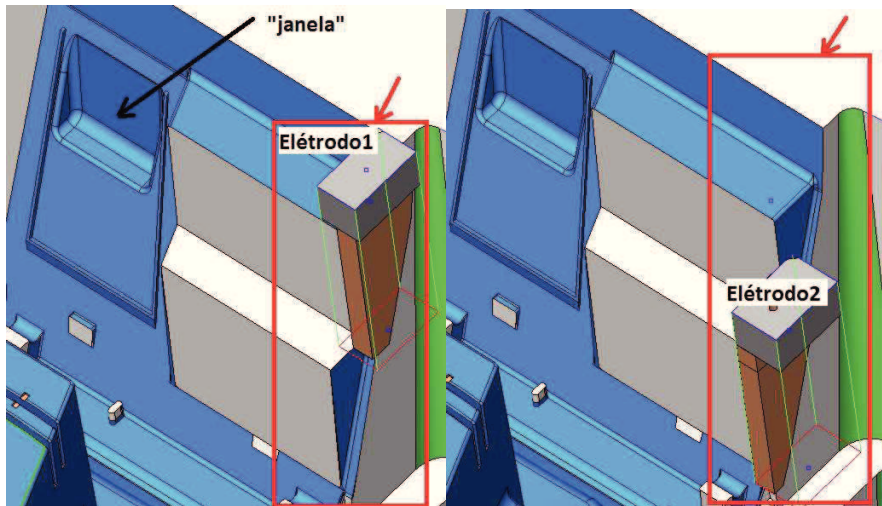


Figura 33 – Área vizinha a da “janela” com a demonstração de 2 eletrodos pelos quais foi erodida.

As pequenas áreas da peça têm de ser erodidas à parte, por eletrodos dedicados só e exclusivamente a essas áreas²⁸. No entanto as áreas 1 e 2 indicadas na Figura 34 (a) podem ser erodidas por um eletrodo com exatamente a mesma geometria, pois estas áreas são iguais. Normalmente, eletrodos para a definição de pormenores na peça, cujo tamanho seja igual ou inferior a 24,00 X 24,00 (mm), são modelados de maneira a serem colocados nas bases de 25,00 X 25,00 (mm). Estes eletrodos tanto servem para a definição de caixas, como das pequenas saliências, como se mostra na Figura 34 (a) em que o 1 indica uma caixa e o 3 uma pequena saliência. Os eletrodos para estas áreas serão diferentes e encontram-se ilustrados na Figura 34 (b) para as áreas 1 e 2 e Figura 34 (c) para a área 3.

²⁷ Regra 11

²⁸ Regra 19

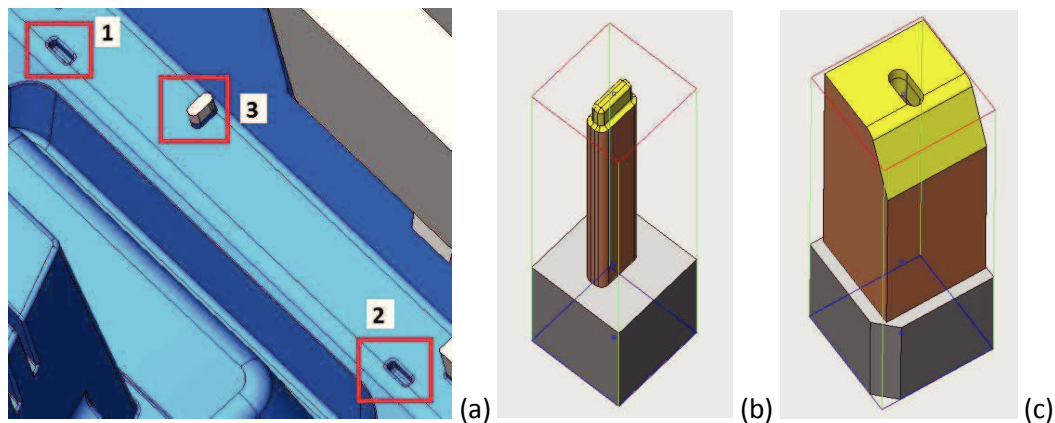


Figura 34 – (a) Pequenas áreas da peça; (b) Eléctrodo para a área 1 e 2; (c) Eléctrodo para a área 3.

Tal como já se referiu anteriormente, os eléctrodos para esta peça não foram modelados segundo a regra de modelação de eléctrodos de ajustamento em primeiro lugar. Por conseguinte, no meio de todos os eléctrodos para a zona moldante da peça, encontramos agora um eléctrodo que define uma área de ajustamento. Em condições normais, em que a modelação é efetuada segundo as regras internas, este eléctrodo teria de fazer parte dos primeiros eléctrodos modelados para a peça. Este não cumprimento das regras, também se pode dever à falta de atenção do modelador, alteração da peça por parte do cliente, a um erro de modelação detetado posteriormente ou então devido a uma estratégia de maquinação escolhida pelo programador. A área de ajustamento para a qual foi adicionado o eléctrodo encontra-se demonstrada na Figura 35 (a) e o eléctrodo modelado para a sua eletroerosão na Figura 35 (b).

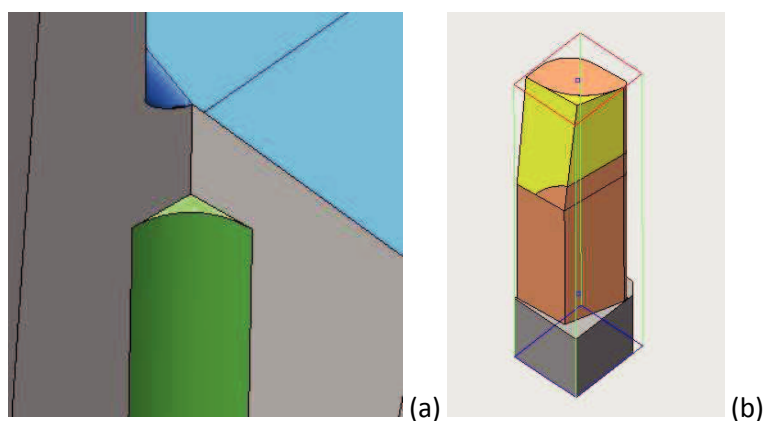


Figura 35 – (a) Área de ajustamento; (b) Eléctrodo para a área indicada.

Para definição de áreas que não foram maquinadas devido, por exemplo, à sua profundidade e que não apresentam elevada complexidade, podem ser erodidas por apenas um eléctrodo²⁹. Estas áreas podem ter, em média, entre 150,00 mm a 350,00 mm em comprimento e no mínimo 15,00 mm de largura, sendo que a área erodida pelo eléctrodo representado na Figura

²⁹ Regra 23

36 (a) é de 275,00 mm de comprimento por 24,00 mm de largura. Desta forma é possível que o elétrodo modelado tenha a dimensão de 281,00 X 34,00 (mm). Este elétrodo encontra-se apresentado na Figura 36 (b).

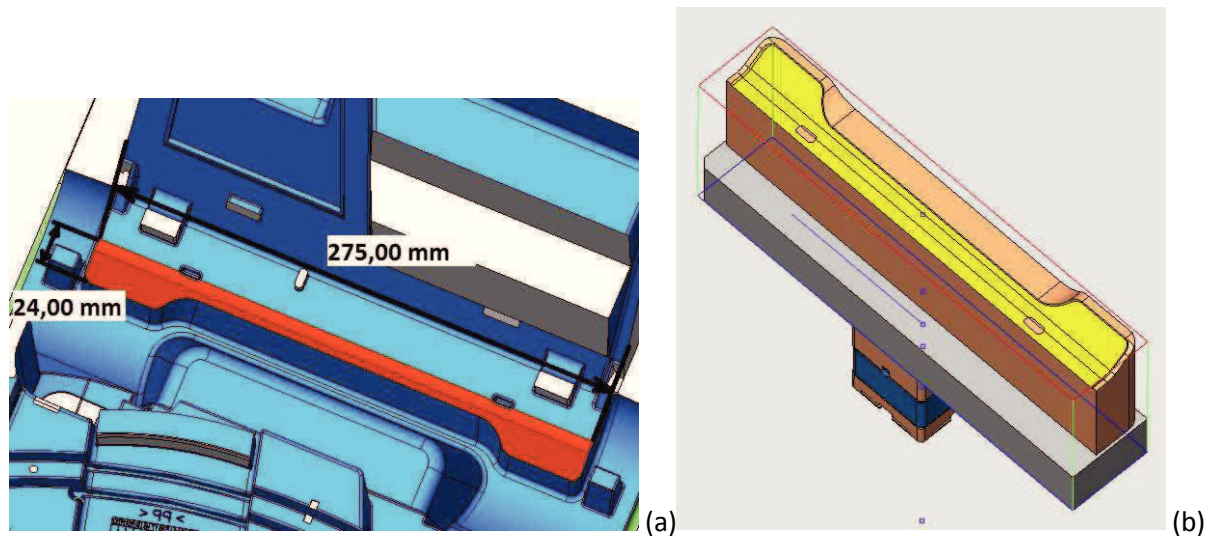


Figura 36 – (a) Área plana à elevada profundidade; (b) Elétrodo para a sua eletroerosão.

Por vezes é necessário dar folga nos elétrodos para que eles não entrem em contacto/conflito com áreas que já se encontram erodidas³⁰. Este é o caso do elétrodo apresentado na Figura 37, a vermelho apresenta-se a área de folga, a que iria colidir com o elétrodo caso esta não existisse. Esta área foi erodida pelo elétrodo descrito anteriormente (Figura 36), e para que durante o trabalho este novo elétrodo não modifique a área que já se encontra acabada, tornou-se necessário introduzir a folga.

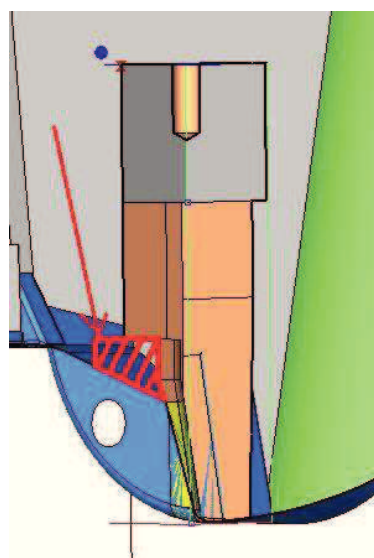


Figura 37 – Folga no elétrodo.

³⁰ Regra 10

4.3 Peça 3

A peça apresentada em seguida representa um postíço da bucha que, devido à sua geometria, teve que ser erodido em duas posições. Isto significa que durante o processo de eletroerosão esta operação teve de ser feita por duas etapas para se colocar a peça noutra posição de eletroerosão, por exemplo, efetuar uma rotação de 90°. Esta peça tem dimensões de 330 X 270 X 397 (mm) em x, y e z, consecutivamente. Tal como referido anteriormente o cor-de-rosa representa a zona moldante, enquanto as outras cores representam as diferentes partes funcionais do molde, como por exemplo as áreas de ajustamento e folgas. Na primeira posição de maquinação a peça foi posicionada conforme representado na Figura 38 (a) para ser erodida por cima, enquanto na segunda posição teve de ser efetuada uma rotação para conseguir maquinar a zona representada no pormenor da Figura 38 (b) no sentido da seta, colocando a peça na horizontal.

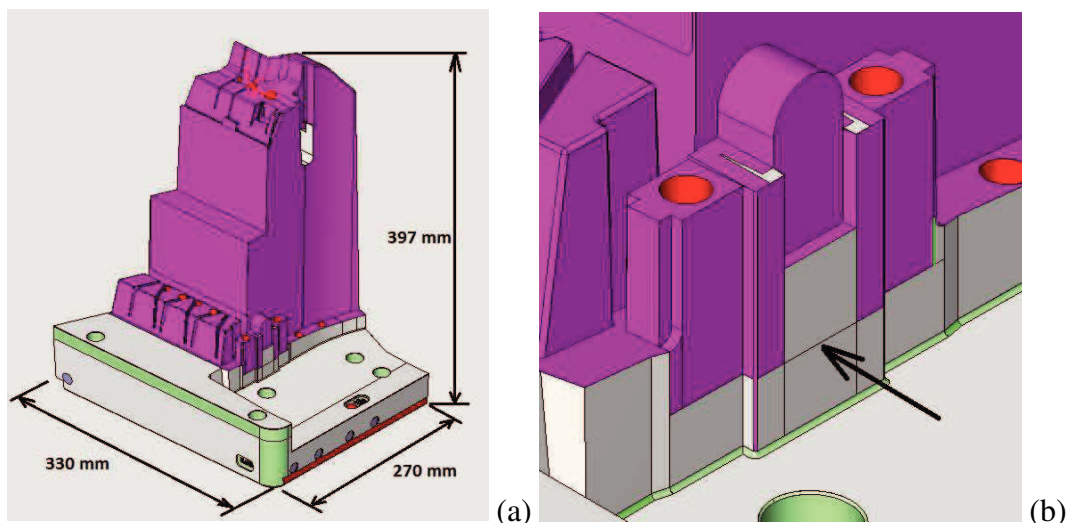


Figura 38 – Peça 3.

4.3.1 A primeira posição

O primeiro eléctrodo a aplicar define um plano inclinado da peça e um pormenor da peça de plástico³¹. As faces erodidas encontram-se destacadas a vermelho na Figura 39 (a), por sua vez o eléctrodo encontra-se representado na Figura 39 (b).

³¹ Regra 8

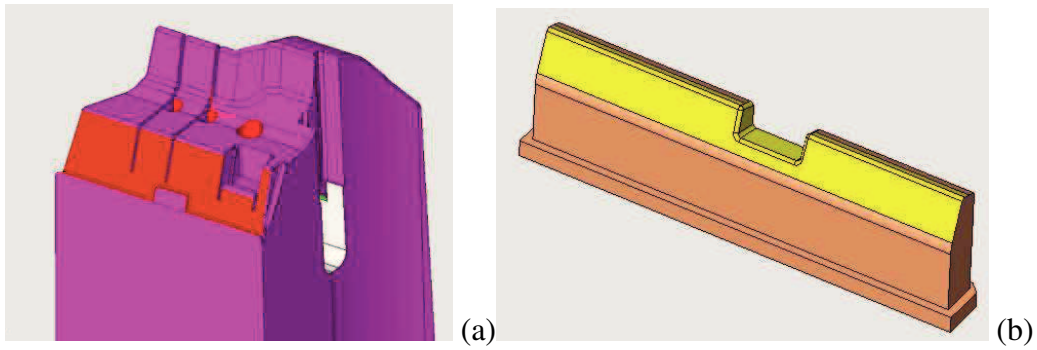


Figura 39 – (a) Representação das áreas erodidas pelo primeiro eléctrodo da peça 3; (b) Eléctrodo 1, posição 1.

Os eléctrodos 2 e 3 serviram para a eletroerosão de ribs, estes eléctrodos são um bom exemplo de junção de várias áreas que, caso não estivessem ligadas por um raio apropriado, teriam de ser erodidas por eléctrodos diferentes (um eléctrodo para cada rib)³². Desta forma, consegue-se poupar grafite, tempo de maquinação do eléctrodo e tempo de eletroerosão. Para que seja possível juntar vários ribs num só eléctrodo é necessário que, para o raio de 0,5 mm, a altura não ultrapasse os 40 mm. A Figura 40 demonstra os eléctrodos em causa.

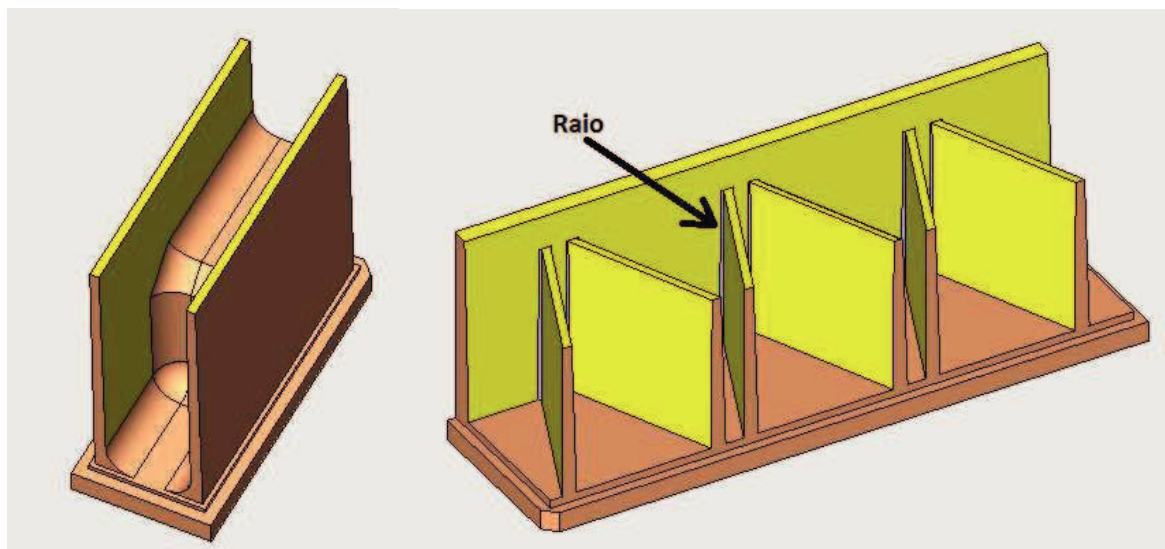


Figura 40 – Eléctrodos 2 e 3 da posição 1, consequentemente.

O eléctrodo 4 define um pormenor da peça, evitando tocar numa das partes do aço para conseguir definir uma quina viva. O plano encontra-se indicado na peça através da seta a. da Figura 41. Este plano foi definido através da fresagem, portanto não há necessidade de o erodir, no entanto é necessário definir nos cantos as áreas em quina viva que fazem parte da geometria da peça, por isso, para poder haver raios e definir esta área toda com apenas um eléctrodo, o plano paralelo ao plano a. foi deslocado para trás. A seta b. da Figura 41 representa

³² Regra 25

o canto onde pode haver um raio, pois esse plano não irá erodir nenhuma área vertical da peça.

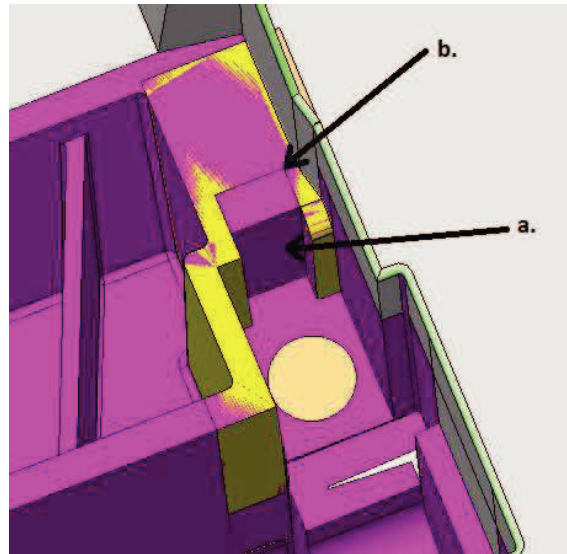


Figura 41 – Eléttrodo 4 da peça 3, posição 1.

O eléttrodo número 5 define uma área composta por duas quinas vivas, indicadas na Figura 42 (a). Este eléttrodo destina-se apenas à eletroerosão de quinas vivas, por isso tem a seguinte geometria, representada na Figura 42 (b)³³. É de referir que o eléttrodo é representado por amarelo e a peça de aço a cor-de-rosa.

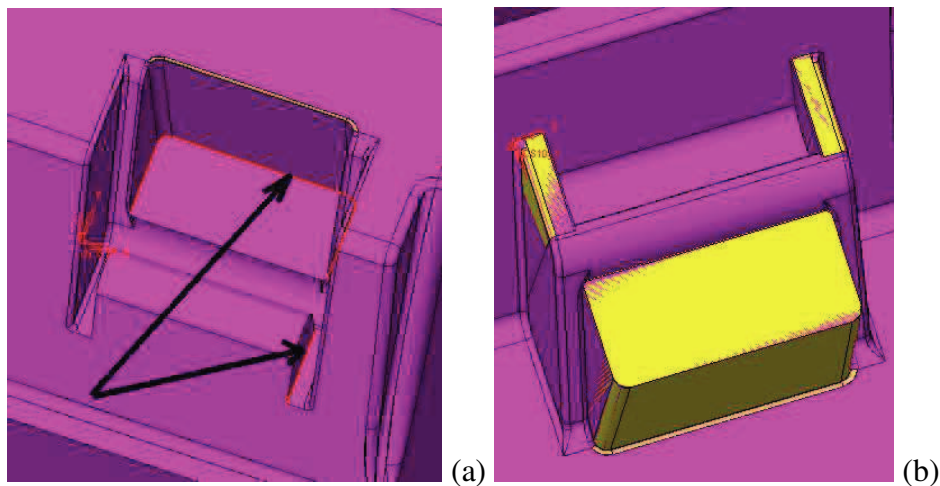


Figura 42 – Eléttrodo 5 da peça 3, posição 1.

O eléttrodo número 6 define a quina viva que foi impossível de definir pelo eléttrodo número 5, devido à impossibilidade de maquinação na grafite, caso estes eléttrodos fossem juntos num só. Dessa forma o eléttrodo 6 define o raio maior e a quina indicados na Figura 43 (a) e (b).

³³ Regra 21

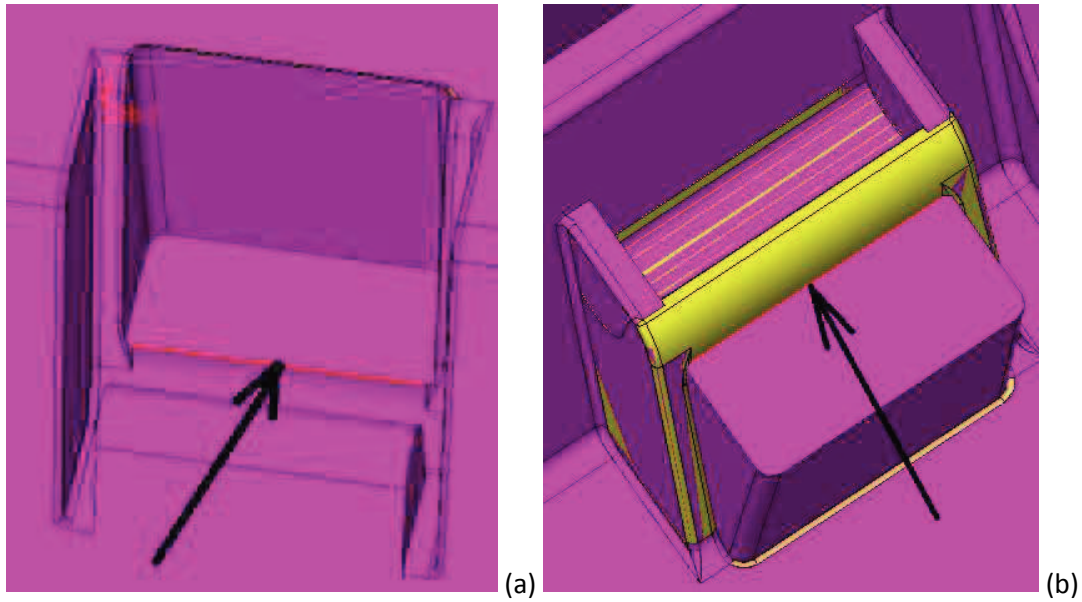


Figura 43 – Eléttrodo 6 da peça 3, posição 1.

4.3.2 A segunda posição

Na segunda posição de eletroerosão a peça foi colocada na máquina conforme demonstrado na Figura 44. A área erodida nesta encontra-se destacada na Figura 44. Foi necessário recorrer a mais uma posição de eletroerosão para evitar a utilização de elétrodos maiores ou holders com extensões de altura.

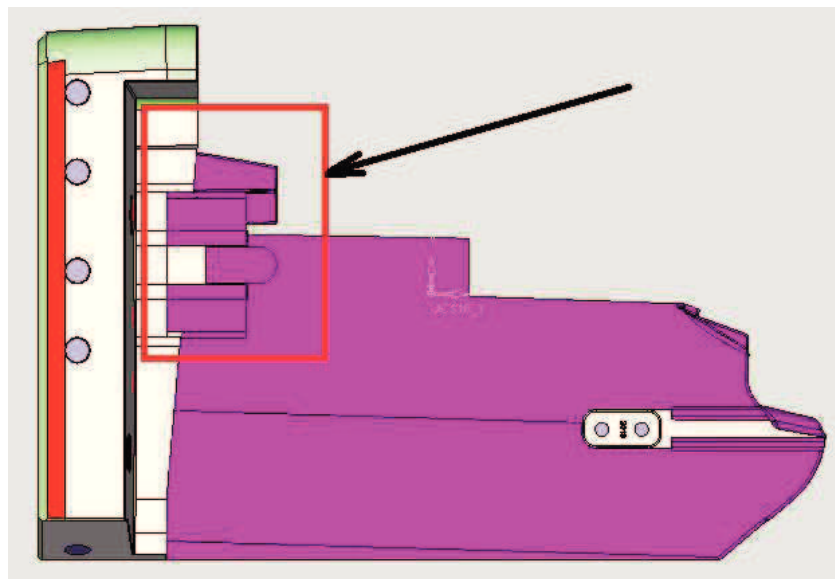


Figura 44 – Segunda posição de eletroerosão da peça 3.

O primeiro eléttrodo define a quina viva que liga zona de ajustamento à zona moldante. É um eléttrodo quadrado, para simplificar a geometria e definir bem as zonas em quina viva. A Figura 45 mostra o eléttrodo sobreposto com a peça de aço. Note-se que a zona erodida seria impossível de maquinar por fresagem visto que contém quinas vivas e construindo um

negativo, o elétrodo, torna-se bastante simples de executar. O elétrodo 2 define o arco da peça, visto que no fundo do arco existe uma quina viva impossível de acabar através de fresagem, como referido anteriormente, para além das outras quinas que se apresentam na vertical³⁴.

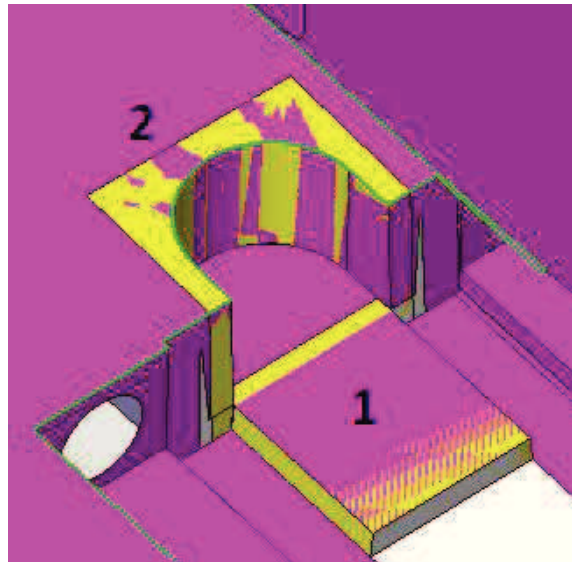


Figura 45 – Eléctrodo 1 e 2 da peça 3, posição 2, em sobreposição com a peça de aço.

O elétrodo 3 define um pormenor de tamanho de 0,88 mm, quase indetetável ao olho nu. Esse pormenor tem uma quina viva e representa um “degrau” na peça de plástico. O elétrodo 4 define a continuação desse ressalto, também composto por uma quina viva. A Figura 46 representa o elétrodo 3, o quadrado vermelho destaca o “degrau” com 0,88 mm de largura.

Os restantes eléctrodos modelados para essa peça foram utilizados para a eletroerosão de quinas vivas.

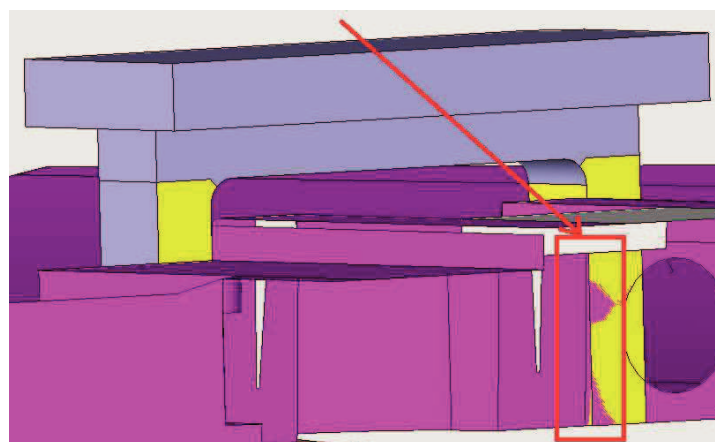


Figura 46 – Eléctrodo 3 da peça 3, posição 2.

³⁴ Regra 2 e 8

4.4 Peça 4

A peça número 4 não tem as zonas moldantes identificadas com cores, pois foi importada de um ficheiro universal, como por exemplo STEP. No entanto, não será muito complicado identificá-las visto que o ficheiro contém os eléctrodos e ao posicioná-los na peça identificam-se as áreas moldantes. A única diferença deste ficheiro para outros é que este se encontra isolado do resto do molde, por isso é impossível identificar as áreas de ajustamento que foram erodidas. Em relação às outras peças existem duas diferenças, a primeira: esta peça contém duas posições de eletroerosão, apesar de ambas serem realizadas no sentido do mesmo eixo e a segunda diferença, é a utilização de eléctrodos gerais para eletroerosão da maior parte da peça, erodindo apenas os ribs maiores e um pormenor pelos eléctrodos separados. A existência de uma segunda posição justifica-se pela rotação da peça no sentido do eixo zz.

Um eléctrodo geral pode ser definido como um eléctrodo mais complexo que contém grande quantidade de ribs, ou pode simplesmente conter vários pormenores da peça. A regra genérica para a aplicação do eléctrodo geral é existência de raios maquináveis pelas ferramentas existentes em stock da empresa, ou seja, todo o eléctrodo tem de ser possível de maquinar³⁵.

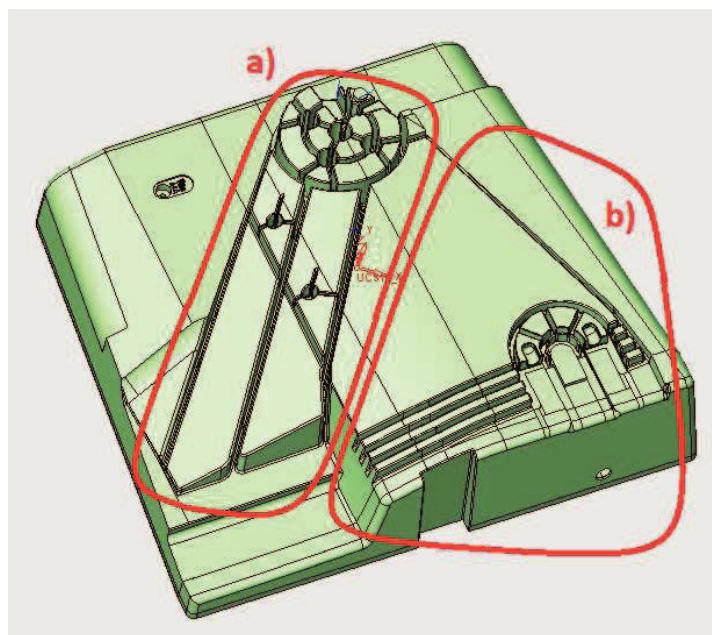


Figura 47- Peça 4

Visto que a sequência de eletroerosão e a tipificação de eléctrodos é idêntica entre as duas posições, estas irão ser descritas em simultâneo. Desta forma o primeiro eléctrodo modelado em ambas as posições é um eléctrodo geral que erode as partes da peça que indicam ser as mais

³⁵ Regra 20

complicadas. A Figura 48 mostra os elérodos gerais da posição 1 e 2 respetivamente. Tal como nos casos anteriores, foi possível a aplicação de apenas um elédrodo pois todos os raios eram maquináveis pelas ferramentas existentes em stock da empresa.

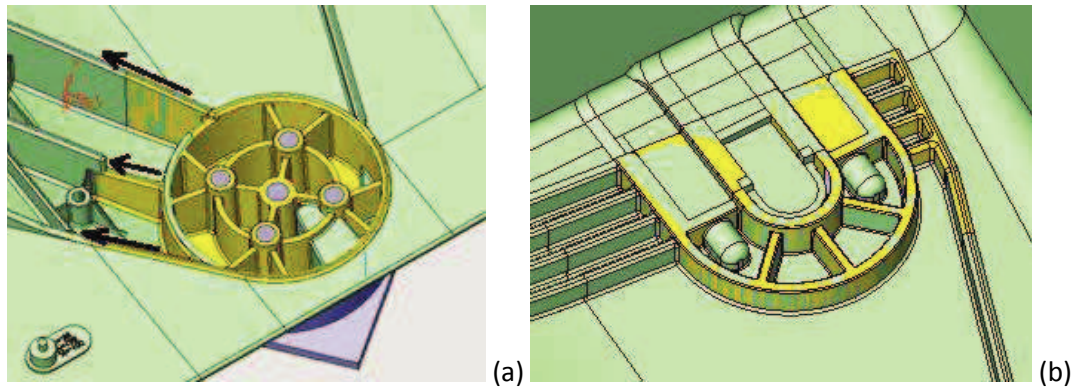


Figura 48 – Elédrodo geral da posição 1 e posição 2 da peça 4, consequentemente.

Os restantes elérodos da posição 1 servem para a eletroerosão dos ribs que se encontram na direção das setas apresentadas na Figura 48 (a). Foram elaborados 4 elérodos diferentes para conseguir obter um tamanho de elédrodo do tamanho de uma barra de grafite standard, pois assim estes ficaram com as medidas entre 28,00 x 59,00 x 74 (mm) até 16,00 x 224,00 x 80,00 (mm) em x, y e z respetivamente³⁶. Também, desta maneira consegue-se uma maior precisão de eletroerosão pois caso ocorra algum erro durante o processo de maquinação, este acontece apenas num dos elérodos e não em todos ao mesmo tempo (caso estes três ribs fossem erodidos pelo mesmo elédrodo).

Na segunda posição os elérodos que se seguem ao elédrodo geral foram também utilizados para a eletroerosão de ribs, com a diferença da existência de dois elérodos que serviram para a definição de quinas vivas e alguns pormenores no interior da área erodida pelo elédrodo geral, tal como é mostrado na Figura 49, onde a) representa o elédrodo 3 e b) representa o elédrodo 4.

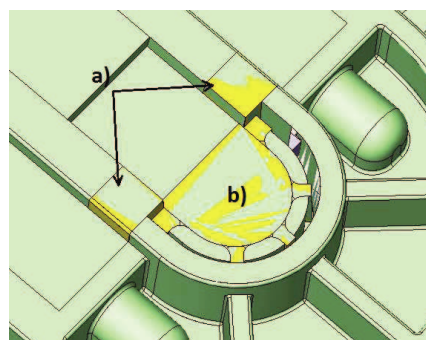


Figura 49 – a) Elédrodo 3 da peça 4; b) Elédrodo 4 da peça 4.

³⁶ Regra 20

5. Regras de modelação de eléctrodos

Com o intuito de generalizar as regras seguidas na modelação dos eléctrodos necessários á execução das peças seleccionadas para o estudo, as mesmas foram analisadas e agrupadas de forma a apoiar a identificação das zonas que serão erodidas e a sistematizar a modelação dos respetivos eléctrodos.

5.1 As Regras

Após a definição das regras para a modelação de eléctrodos através da análise das peças realizada anteriormente, foi possível então agrupá-las em vários conjuntos, nomeadamente: i) regras do foro geral que se aplicam tanto a eléctrodos de ajustamento como a eléctrodos para a zona moldante; ii) regras que apenas se destinam a zona de ajustamento; e por último iii) regras que se destinam à zona moldante. Estas últimas incluem, também as regras que servem para a modelação de eléctrodos de ribs, quinas vivas e eléctrodos que operam a elevada profundidade. Dentro do primeiro grupo, designadas por Regras Gerais, incluem-se regras que se direccionam para a modelação geral de eléctrodos, sendo possível encontrar referência a eléctrodos para planos inclinados, regras referentes às dimensões em causa e a aplicação de eléctrodos específicos para a eletroerosão de áreas com características particulares. De seguida, as regras são descritas com maior detalhe.

i) Regras Gerais:

1. Quando a peça contém quinas vivas em áreas vizinhas, estas devem ser agrupadas em apenas um eléctrodo, de forma a serem possíveis de maquinar em grafite;
2. Áreas com quinas vivas vizinhas que sejam impossíveis de erodir pelo mesmo eléctrodo devem ser erodidas por apenas um eléctrodo para cada quina viva;
3. Aplicar eléctrodo quando se encontrar uma caixa com dimensão inferior ou igual a 2,00 mm em largura e em comprimento, e superior ou igual a 6,00 mm de profundidade;
4. O eléctrodo pode ser modelado de forma a conter na mesma base dois eléctrodos para erosão da mesma zona, ou várias zonas iguais da mesma peça. Esta regra aplica-se principalmente quando a área a erodir for de pequenas dimensões (com o

mínimo de 0.30 X 0.50 mm), mas também a elétrodos superiores às medidas de 25.00 X 25.00 mm que se podem juntar na mesma base, caso isso se revele vantajoso. (Vantagem: o mesmo eléctrodo serve para desbaste e para acabamento);

5. Quando duas áreas vizinhas estão ligadas por um chanfro, essas áreas devem ser erodidas com o mesmo eléctrodo. Assim o eléctrodo deverá erodir apenas a zona relativa ao chanfro;
6. Modelar dois elétrodos diferentes quando a zona de ajustamento ligar a zona moldante através de uma quina viva (sendo um eléctrodo para a zona moldante e outro para a zona de ajustamento);
7. Quando a zona de ajustamento e a zona moldante se encontram no mesmo plano, estas podem ser erodidas pelo mesmo eléctrodo. Caso a zona moldante contenha alguma zona por erodir, ambas podem ser erodidas pelo mesmo eléctrodo de forma a serem possíveis de maquinar através de fresagem;
8. Para melhorar o acabamento superficial de planos inclinados, estes podem ser acabados por eletroerosão. Neste caso, modela-se um eléctrodo que define estes planos;
9. Reforçar estruturalmente os elétrodos com cerca de 0,3mm de largura e 20 mm de comprimento de maneira a que a base final do eléctrodo perfaça medidas normalizadas (standard);
10. Caso seja necessário reforçar um eléctrodo, ou caso a sua geometria favoreça o contacto com as zonas da peça que não se desejam erodir, é necessário dar folga de, no mínimo 0,5 mm, entre a peça a erodir e o eléctrodo de forma a evitar a eletroerosão nas áreas que não se pretendem erodir;
11. Quando um eléctrodo atinge um comprimento de 200 mm (ou superior), com uma espessura baixa, igual ou inferior a 30 mm, procura-se uma solução otimizada de forma a tornar o eléctrodo mais curto. Por exemplo, dividindo-o em duas partes.
12. Quando se modela um eléctrodo que contém raios de canto interno, o modelador tem de verificar se as ferramentas indicadas para essa maquinaria existem em stock na empresa. Caso não exista a ferramenta com as dimensões requeridas, o

elétrodo tem de ser modelado de forma a ser possível de maquinar com os recursos existentes (tipicamente estes assumem dimensões normalizadas);

13. Adaptar, sempre que possível, as medidas máximas dos elétrodos às medidas de grafite standard providas pelo fornecedor.

ii) Regras para zonas de ajustamento:

14. Elétrodos de ajustamento têm de ser modelados em primeiro lugar;

15. Modelar elétrodos de ajustamento de forma a não entrarem em contacto com a zona moldante, quando estas estão ligadas através da quina viva.

iii) Regras para a zona moldante:

16. Modelar o elétrodo para a zona moldante de maneira a que este não entre em contacto com a zona de ajustamento quando estas estão ligadas através da quina viva;

17. Juntar duas áreas da zona moldante com tolerâncias geométricas reduzidas e ligadas por quina viva apenas num elétrodo;

18. Aplicar elétrodos nas áreas que contêm quinas vivas com tolerâncias reduzidas;

19. As pequenas áreas da peça têm de ser erodidas por elétrodos à parte, dedicados só e exclusivamente a essas áreas. Estas não podem ter tamanho superior a 24,00 x 24,00 mm para que possam ser produzidos a partir de barras de grafite standard.

20. Aplicar elétrodo geral sempre que as superfícies pertencentes ao elétrodo estejam ligadas por raios maquináveis pelas ferramentas existentes em stock da empresa, ou seja, todo o elétrodo tem de ser possível de maquinar.

iii.1) Modelação de elétrodos para elevada profundidade:

21. Áreas com raio de canto igual ou inferior a 1,00 mm que se encontrem a uma profundidade mínima de 50 mm têm de ser maquinados através de eletroerosão;

22. Nas áreas com profundidades entre 100 a 350 mm aplicam-se elétrodos (áreas de difícil acesso para a cabeça da máquina de fresagem por arranque de aparas);

23. Áreas que se encontram a uma profundidade igual ou superior a 350mm e que se encontram rodeadas pelas paredes da zona moldante formando um quadrado imaginário igual ou inferior a 150 x 150 (mm) têm de ser definidas através de eletroerosão.

iii.2) Ribs:

24. Os ribs com largura entre 0,5 a 5,00 mm de largura e com profundidade superior a 10,00 mm terão de ser erodidos, pois são áreas de difícil acesso para ferramentas de fresagem;

25. Sempre que possível, juntar vários ribs no mesmo eletrodo.

5.2 Validação das regras

Com o intuito de validar as regras anteriormente definidas e de forma a avaliar como estas poderão apoiar o desenhador na modelação de eléctrodos foi analisada uma peça de geometria diferente das analisadas anteriormente. Os eléctrodos modelados e a metodologia de utilização das regras encontram-se descritos neste capítulo.

A peça analisada é uma bucha com dimensão de 110,00 x 140,00 x 53,00 (mm) e que visa a moldação da capa de um rato de computador (Figura 50). Destaca-se que se considerou que esta peça irá ser erodida em conjunto com os postigos de forma a que não existam problemas posteriores ao nível da zona moldante, tais como alturas de planos diferentes quando os postigos forem montados na bucha.

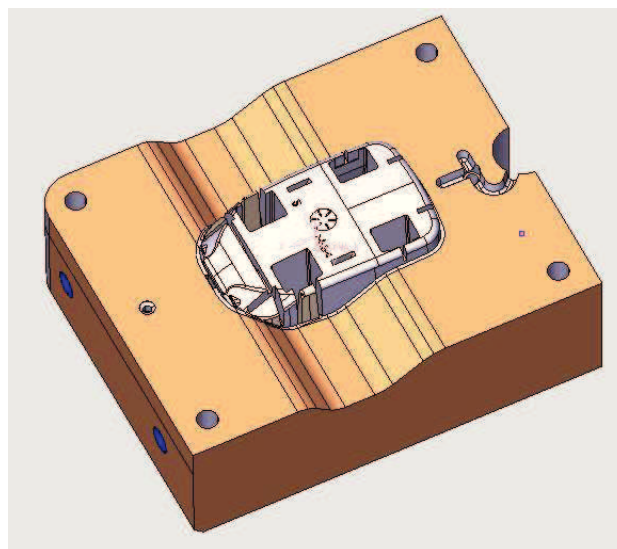


Figura 50 – Peça de validação das regras de modelação de eléctrodos

Tendo por base as regras definidas, foi então realizada a modelação dos eléctrodos necessários para a eletroerosão dos detalhes da peça seleccionada. Para tal foi utilizado o fluxograma obtido a partir das regras acima descritas. Este encontra-se no Anexo 1 deste documento.

A primeira parte do fluxograma guia o utilizador para a modelação dos eléctrodos para as zonas de ajustamento na peça. Visto que esta peça contém áreas de ajustamento de planos inclinados em volta de toda a peça seguimos para a secção de eléctrodos de ajustamento. Caso a peça em questão tivesse uma linha de junta plana e sem qualquer outro tipo de ajustamento, como por exemplo, elementos móveis, postigos retangulares que não ficam acabados através da eletroerosão de fio ou fresagem, ter-se-ia de seguir para a parte do fluxograma que diz respeito a eléctrodos para a eletroerosão da zona moldante (visto que as respostas a todas as perguntas do fluxograma seriam “não”).

Seguindo pela ordem do fluxograma, e dado que a peça não contém nenhuma zona de ajustamento que liga a zona moldante através de quina viva, e como não contém quinas na área de ajustamento, e não contém caixas de ajustamento, nem chanfros indispensáveis ao funcionamento do molde, a questão recai apenas na identificação da existência de planos inclinados na área de ajustamento. Neste caso, tem de se aplicar a Regra 8. Esta regra estabelece que se deve aplicar um eléctrodo nos planos inclinados de ajustamento. Para seguir com a modelação do eléctrodo a questão seguinte avalia se a zona de ajustamento se encontra no mesmo plano que a zona moldante. Como a resposta é sim, deve-se aplicar a Regra 7. Desta forma, é possível utilizar menos eléctrodos, pois segundo a regra é viável juntar dois eléctrodos num só. Dado que a zona moldante contém uma quina viva à volta da peça, o eléctrodo poderá definir toda essa quina. De seguida passa-se à modelação do eléctrodo, o qual se observa na Figura 51.

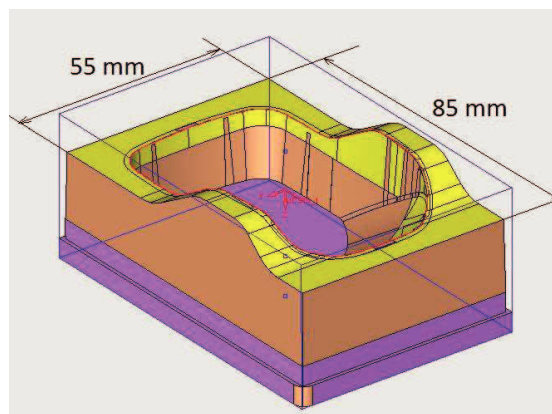


Figura 51 – Eléctrodo 1 para a eletroerosão de linha de junta e da quina viva da zona moldante.

Continuando a percorrer o fluxograma, e dado que resposta a todas as perguntas seguintes é não, surge apenas a questão relativa às medidas do eléctrodo no sentido de avaliar se estas correspondem a medidas normalizadas. Dado que as medidas atuais não correspondem a medidas standard, ter-se-á de alterar o eléctrodo por forma a que este tenha as medidas de 55 de largura por 85 mm de comprimento.

Com este eléctrodo finalizado, o procedimento é repetido, ou seja inicia-se novamente o fluxograma e no que diz respeito à modelação de eléctrodos de ajustamento. Como não existem mais áreas de ajustamento que tenham de ser acabadas através de eletroerosão, a resposta a todas as perguntas seguintes é “não” o que implica a passagem para a parte do fluxograma que diz respeito à modelação de eléctrodos para a zona moldante.

O primeiro passo estabelecido no fluxograma exige verificar a existência de áreas de ajustamento ligadas a zona moldante através de quinas vivas. Dado que a resposta é “não”, segue-se para a pergunta seguinte que questiona se a zona moldante contém quinas vivas. Uma vez que a zona moldante contém várias áreas que acabam em quina viva, a resposta é “sim”. Como não existe uma ordem definida para a modelação de eléctrodos, o modelador deverá começar segundo os seus próprios critérios. Opta-se por erodir em primeiro lugar a zona que se encontra localizada a meio da peça, e como esta não é possível de maquinar por fresagem, devido a sua largura reduzida, de 1,15 mm, esta será obtida por eletroerosão. A Figura 52 (a) demonstra a área que obriga à modelação do respetivo eléctrodo. De seguida, é necessário conhecer se as tolerâncias permitem a criação de raios nessas áreas. Para tal, é necessário consultar o desenho de artigo da peça. Com base neste desenho, verifica-se que na área escolhida não podem ser criados raios, logo a resposta a esta questão no fluxograma é “não”, pelo que a regra a adotar é a Regra 18. Seguidamente, o fluxograma avalia se existe a possibilidade de junção de vários eléctrodos na mesma base, sendo que a resposta é “não” (visto que a peça contém apenas uma zona igual a ilustrada na Figura 52 (a) onde se observa que para adicionar mais um eléctrodo, ter-se-ia de utilizar uma base muito maior ou então o eléctrodo iria interferir com a zona moldante que não se pretende erodir).

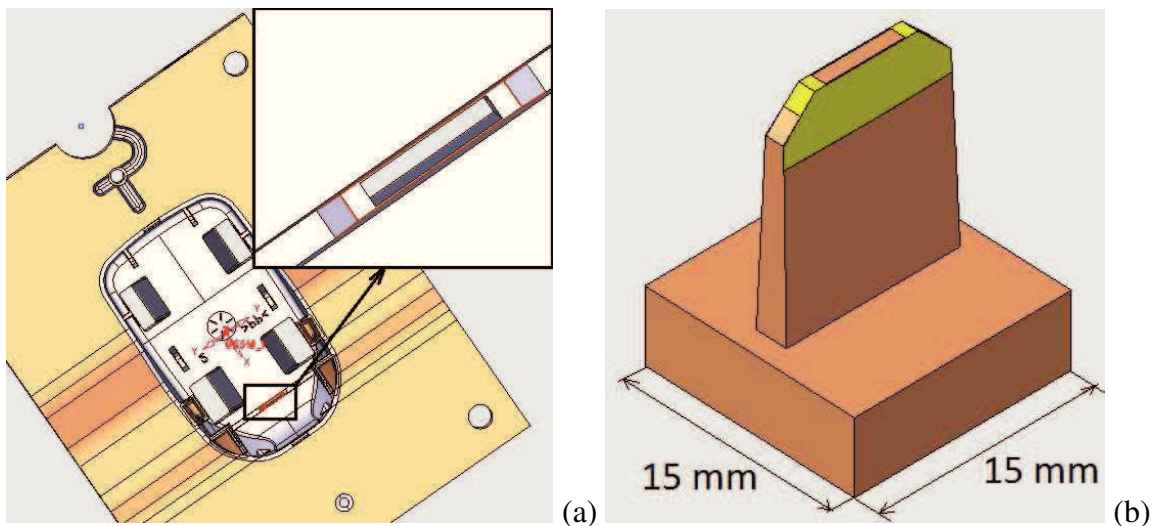


Figura 52 – (a) Zona definida pelo segundo eléctrodo; (b) Eléctrodo 2, necessário para a definição de quinas vivas na zona moldante.

Prosseguindo de acordo com o estabelecido no fluxograma e dado que a resposta a todas as perguntas seguintes é “não”, reside apenas a questão relativa às medidas standard. Nesse sentido, e por consulta da Tabela 2 adota-se uma base para o eléctrodo com a dimensão de 15x15 (mm), tal como se encontra demonstrado na Figura 52 (b).

Tabela 2 – Medidas das barras de grafite *standard* [39].

	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento máximo (mm)
Base 15 x 15 (mm)	15	15	500
Base 25 x 25 (mm)	25	25	500
Base 35 x 35 (mm)	35	35	500

Concluída a modelação deste eléctrodo, e seguindo o caminho estabelecido pelo fluxograma coloca-se de seguida a questão relativa à modelação de eléctrodos para a zona moldante. Repetindo-se o procedimento anterior, a questão passa a ser referente à parte do fluxograma relativo a eléctrodos que erodem a zona moldante que contém quinas vivas, pois ainda existem partes da peça em quina viva que não têm um eléctrodo modelado.

Segue-se, então, com a eletroerosão da área vizinha à zona erodida anteriormente e que se encontra representada na Figura 53 (a). Seguindo novamente o definido no fluxograma verifica-se que esta zona também não pode conter raios devido às tolerâncias geométricas reduzidas. Do mesmo modo, e no que diz respeito à modelação do eléctrodo propriamente dito,

onde, em primeiro lugar, é necessário avaliar a possibilidade de junção de vários elétrodos na mesma base, à qual se obtém a resposta equivalente à anterior, “não”. Como não existe necessidade de reforçar o eletrodo estruturalmente (o eletrodo não tem comprimento suficiente para ser considerado longo e estreito de acordo com as regras já definidas), como este não contém raios e como, as suas medidas máximas são 15x15x30 (mm), adota-se uma grafite standard de medida 15x15 (mm), em barra, obtendo-se desta forma o eletrodo representado na Figura 53 (b).

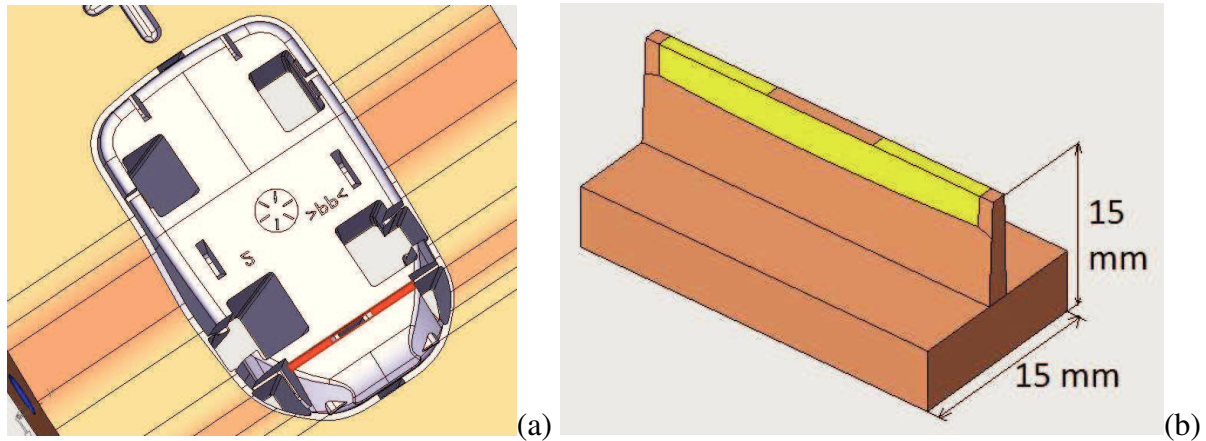


Figura 53 – (a) Área definida pelo eletrodo 3; (b) Eletrodo 3.

Repetindo novamente o fluxo estabelecido pelo fluxograma e partindo do início do mesmo, pois verifica-se que ainda não se erodiu todas as áreas que contêm quinas vivas, o procedimento terá de ser repetido. Importa destacar que este procedimento é repetido tantas vezes, quantos os elétrodos necessários para a maquinação das quinas vivas existentes. Para tal é necessário ter sempre em consideração as tolerâncias geométricas da peça por recurso ao desenho de artigo.

Assim, procedeu-se da mesma forma para a modelação do eletrodo 4, onde as zonas a erodir por este se encontram representadas na Figura 54 (a). De notar que foram agrupados dois elétrodos na mesma base, com o intuito de diminuir o tempo de eletroerosão e a quantidade de grafite a utilizar, pois com as dimensões de 25x25x30 (mm) que este eletrodo perfaz, este pode ser produzido a partir de uma barra de grafite standard de 25x25 (mm).

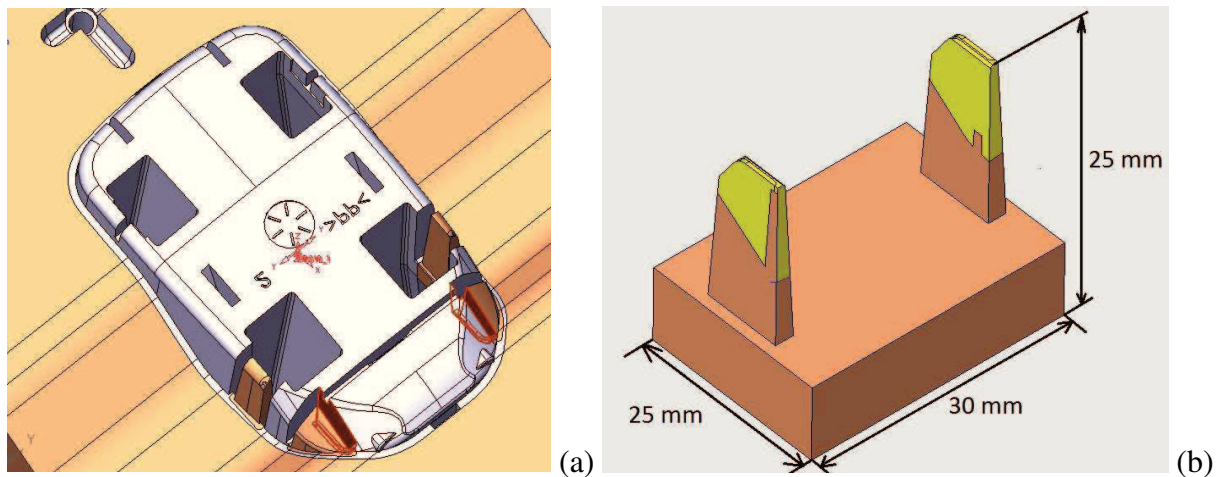


Figura 54 – (a) Áreas erodidas pelo elétron 4; (b) Elétron 4.

Repetindo uma vez mais o procedimento anterior, chega-se à modelação do elétron necessário para obtenção da quina viva, que se encontra representada na Figura 55 (a). Como no fluxograma, quando se passa para a parte da modelação do elétron propriamente dita, verifica-se que a resposta é “sim” para a primeira “pergunta”, obtendo-se um elétron como o representado na Figura 55 (b). Isto acontece, porque pretende juntar-se na mesma base outro elétron que irá erodir a área idêntica localizada do outro lado da peça. Desta forma o elétron vai erodir inicialmente na posição 1 e de seguida vai-se deslocar para outro lado da peça e erodir na posição 2. Irão operar da mesma forma os elétrons número 8, 9 e 10.

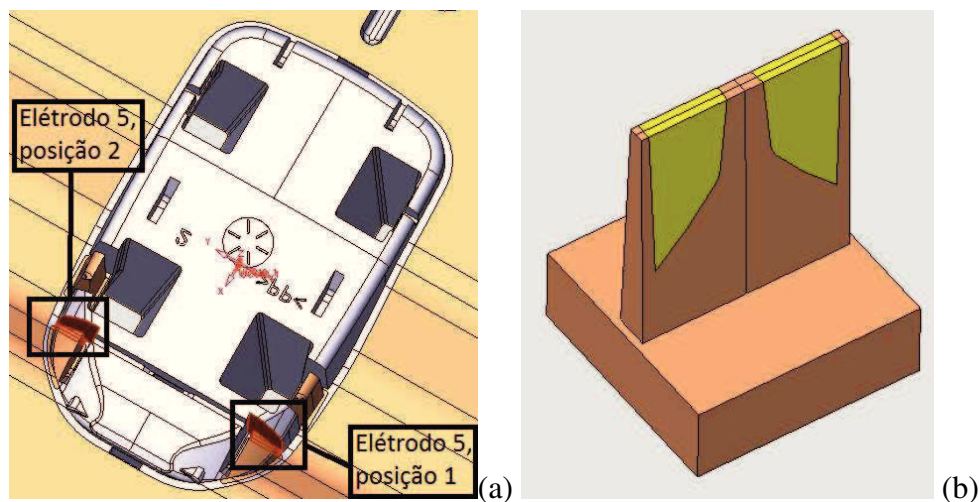


Figura 55 – (a) Áreas erodidas pelo elétron 5; (b) Elétron 5.

O elétron 6 é modelado da mesma forma que o elétron 4, com a exceção de que este terá de ser espelhado para modelar o elétron que irá erodir o outro lado da peça. O elétron espelhado é o elétron 7. Tal como no elétron 5 ir-se-á agrupar os dois elétrons na mesma base. Contudo, esta junção é feita de forma diferente, pois os elétrons 6 e 7 irão erodir as

duas áreas sem necessidade de deslocamento, operando um de cada vez (ver Figura 56 (a) e (b)).

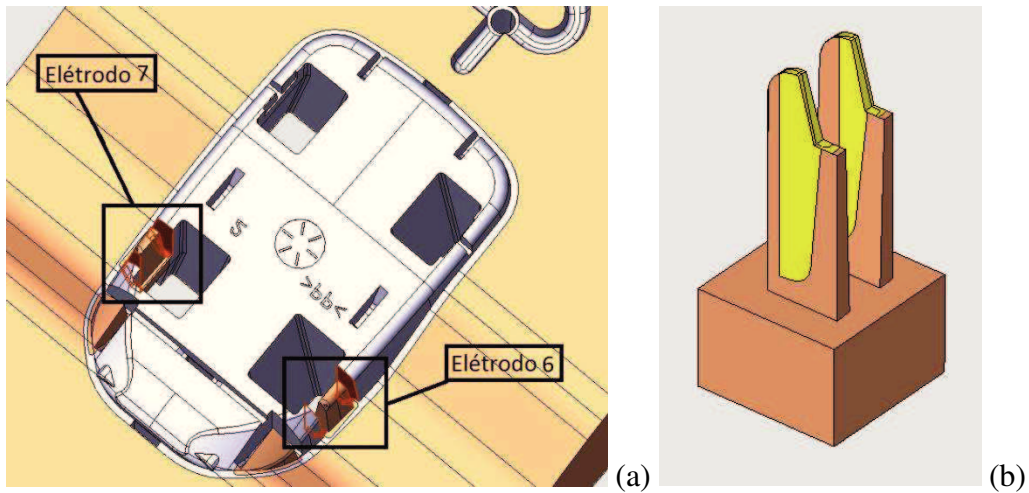


Figura 56 – (a) Eléctrodo 5 e 6, em que o eléctrodo 6 é espelhado a partir do eléctrodo 5; (b) Eléctrodo 5.

Voltando-se novamente à parte inicial da modelação de eléctrodos para a zona moldante, mas, como já foram modelados todos os eléctrodos necessários para a eletroerosão das áreas em quina viva, a resposta à pergunta que avalia se a peça contém quinas vivas é “não”. Assim prosseguindo, e como a questão seguinte avalia se a peça contém pormenores impossíveis de acabar através de fresagem, a resposta à qual é “sim”, pois observam-se duas áreas que se podem caracterizar desta forma na peça apresentada (ver Figura 57 (a)). Assim, segundo a Regra 19, é recomendável modelar um eléctrodo só e exclusivamente para cada uma destas áreas. Mas como estas áreas encontram-se a duplicar na geometria da peça, é possível agrupá-las duas a duas, segundo as suas semelhanças, no mesmo eléctrodo.

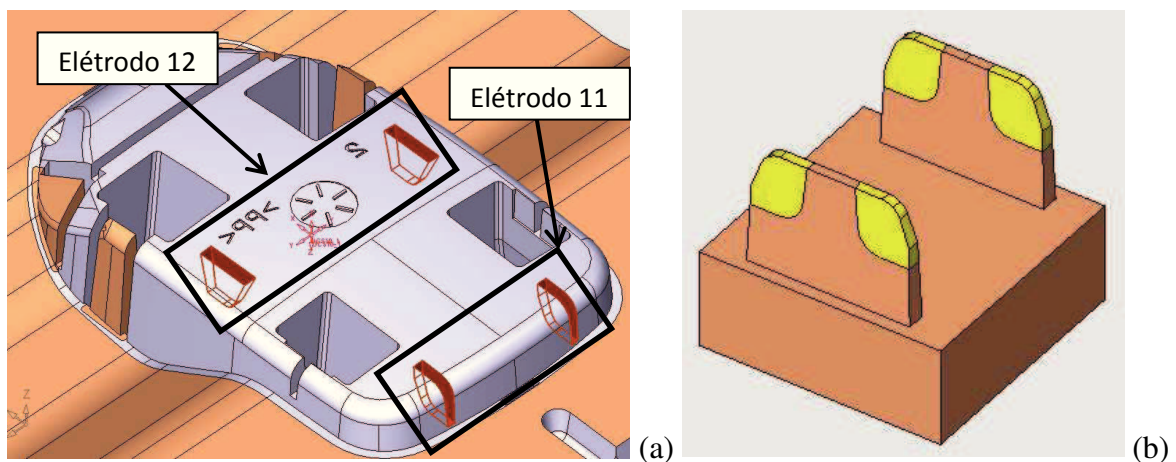


Figura 57 – (a) Zonas erodidas pelo eléctrodo 11 e 12; (b) Eléctrodo 11.

De seguida, de acordo com o fluxograma estabelecido, é necessário verificar se existe possibilidade de agrupar vários elérodos na mesma base, onde se observa que “sim”, visto que a peça contém duas áreas iguais, vizinhas, e que podem ser erodidas ao mesmo tempo, poupando assim grafite e tempo de eletroerosão. Desta forma, é possível obter o elédrodo representado na Figura 57 (b), com dimensão standard de 25x25 (mm).

Chega-se novamente ao início de modelação de elérodos para a zona moldante, e como já se modelou todos os elérodos necessários para a eletroerosão desta peça, as respostas às questões do fluxograma são “não”, dando-se por finda a modelação.

5.3 Resultados obtidos

Visto que a peça fornecida para a validação das regras elaboradas durante este trabalho incluía os elérodos modelados para erodir a mesma em meio industrial, é possível comparar os elérodos elaborados por estes dois métodos. A primeira e a mais importante diferença é a quantidade de elérodos modelados; pelo método industrial foram modelados 16 elérodos e pelo método do fluxograma proposto, apenas 12. Isto significa uma redução em 25% do tempo dependido para a modelação dos elérodos, da grafite utilizada e do tempo de maquinação dos elérodos. Tendo apenas 12 elérodos para maquinar esta peça, significa que quando efetuada a eletroerosão a máquina terá que trocar de elédrodo menos vezes, o que também reduz significativamente o tempo de eletroerosão. No entanto este fato varia conforme a máquina de eletroerosão onde se esteja a realizar o trabalho. Como exemplo, pode-se considerar que cada elédrodo demora 30 minutos a erodir e que a peça apenas necessita de uma passagem de cada elédrodo. Tendo 16 elérodos, como no método industrial ir-se-ia demorar 8 horas a efetuar este tipo de eletroerosão. No entanto quando a quantidade de elérodos é reduzida para 12, o tempo de erosão passará a ser apenas de 6 horas. Isto significa que a eletroerosão de uma peça como a mostrada na validação das regras extraídas durante este trabalho pode ser reduzida significativamente. Tendo em conta a parte financeira, quando o preço médio de uma máquina de eletroerosão por hora é de 40€, o preço desta eletroerosão irá descer dos 320€ para os 240€.

Outro aspeto importante desta abordagem é a modelação de elérodos que se encontrem de acordo com as medidas standard ou, caso a dimensão do elédrodo não o permita, modelar o elédrodo sempre com medidas certas. Esta pequena, mas importante medida, permitirá aumentar a rapidez com que uma empresa de moldes consegue produzir elérodos para uma

determinada peça e uma empresa fornecedora consegue melhorar os tempos de entrega da grafite.

Igualmente, este método permite que os modeladores pouco experientes consigam obter maior independência dos seus colegas sêniores. De facto, seguindo o fluxograma durante a modelação de eléctrodos para uma peça não superior a 896 x 896 x 100 mm (comprimento x largura x altura) o desenhador tem os princípios necessários para modelar os eléctrodos. No entanto para que isto aconteça é necessário com que a empresa elabore e mantenha sempre uma lista atualizada de ferramentas existentes no seu stock para a maquinação de eléctrodos.

6. Conclusão

A eletroerosão é um processo que se revela de grande importância durante a produção de um molde de injeção de matéria plástica. Este processo requer elevado esforço por parte dos modeladores e fornece elevada qualidade superficial e rigor dimensional às superfícies maquinadas. Ao contrário de outros processos, este utiliza uma ferramenta sempre diferente para diferentes áreas da peça. Cada ferramenta é única e tem de ser modelada especificamente para as zonas que se pretendem erodir. A modelação destas ferramentas, os eléctrodos, é uma tarefa morosa e complexa, pois exige com que o modelador saiba identificar as áreas aonde é necessário aplicá-las.

A tarefa de identificação das áreas aonde se devem aplicar eléctrodos pode tornar-se bastante mais fácil quando o modelador dispõe de uma série de regras que o possam guiar durante o processo. Portanto, um dos objetivos principais deste trabalho foi a identificação de regras para esse efeito. Para isso foram analisadas quatro peças de geometria, complexidade e tamanhos diferentes. Com a análise das peças foi possível definir as regras básicas de identificação de áreas aonde terão de se aplicar eléctrodos. Estas regras foram organizadas num fluxograma que permita uma interpretação mais acessível para os modeladores inexperientes e assim torná-los mais independentes dos colegas séniores. Todas as regras encontram-se agrupadas conforme a área da sua aplicação: regras para a modelação de eléctrodos para as zonas de ajustamento, eléctrodos que se aplicam à zona moldante e as regras gerais que guiam o modelador pela modelação de um eléctrodo propriamente dita. É importante referir que este método apenas é aplicável a peças de dimensão máxima de 896x896 (mm). No entanto, para a sua aplicação em meio industrial, este fluxograma tem de ser completado com as regras internas da empresa, como por exemplo a colocação de chanfro ou raio do lado do X+, Y+ da máquina.

Para comprovar que estas regras têm uma aplicação prática, foi escolhida uma peça para a qual foram modelados eléctrodos segundo o fluxograma elaborado, de acordo com as regras criadas. A peça foi fornecida com os eléctrodos com que foi erodida na realidade, o que permitiu realizar uma comparação destes com os eléctrodos modelados através do fluxograma. No final de os eléctrodos estarem todos modelados concluiu-se que estes se encontram em menor quantidade que os eléctrodos modelados originalmente. A peça foi erodida com 16

elétrodos, enquanto, com base no procedimento definido neste trabalho foram modelados apenas 12. Isto revela uma redução de 25% na quantidade de elétrodos modelados e conseqüentemente, menos 25% no tempo de modelação, tempo de maquinação de elétrodos, e a quantidade de grafite gasta. Meramente como forma de exemplo pode-se considerar que cada eléctrodo demora 30 minutos a erodir. Isto significa que, com a quantidade de elétrodos definidos em meio industrial a erosão da peça analisada iria demorar cerca de oito horas e com os elétrodos modelados por este método o tempo seria reduzido para seis horas. Esta melhoria é bastante significativa, pois indica que durante um dia de trabalho de 8 horas o operador teria tempo de fazer o setup da máquina, erodir a peça, tirá-la da máquina e, por exemplo colocar outra que erodisse durante a noite. Isto proporciona um processo contínuo que permitiria que a empresa rentabilize ao máximo a máquina de eletroerosão. Este método também exige que o modelador tenha uma tabela de ferramentas mais utilizadas na maquinação de elétrodos, o que permitirá verificar, logo à partida, se um eléctrodo é “maquinável” ou não com as ferramentas existentes em stock. Esta simples verificação irá permitir reduzir o tempo de interação entre o modelador e o programador e tornar o modelador mais independente na execução do seu trabalho. Também os elétrodos modelados por este método são mais rápidos de produzir pois durante a sua modelação, o modelador é obrigado a prestar atenção às medidas com as quais modela o eléctrodo, de forma a este ter uma das medidas standard fornecidas pelas empresas fornecedoras de grafite ou pelo menos ter as medidas certas para que a compra de grafite seja mais rápida e o prazo de entrega mais reduzido.

De um modo geral pode-se considerar que este trabalho foi bem-sucedido e permitiu atingir os seus principais objetivos. No entanto, é importante salientar que o fluxograma desenvolvido e que sistematiza as regras definidas, pode e deve se aperfeiçoado por análise de mais peças de forma a incluir o máximo número de regras. O procedimento proposto deverá ainda ser aplicando no meio industrial para uma validação mais completa.

Bibliografia

- [1] “Meusburger,” 2012. [Online]. Available: www.meusburger.com. [Acedido em 27-10-2012 2012].
- [2] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [3] S. Kalpajian e S. Schmid, *Material removal processes: abrasive, chemical, electrical and high-energy beam*, New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [4] E. Дряхлов. [Online]. Available: <http://cnc.reslex.net/elekt.html>. [Acedido em 04 02 2012].
- [5] S. Webzell, *Thar first step into EDM*, Kent, UK: Findlay Publications Ltd, 2001.
- [6] H. Tsai, B. Yan e F. Huang, *EDM performance of Cr/Cubased composite electrodes*, vol. 43, Taiwan, 2003, pp. 245-252.
- [7] “Wire-cut Technologies LTD,” 2009. [Online]. Available: <http://www.wire-cut.co.uk/wireedm.htm>. [Acedido em 03 07 2012].
- [8] G. Boothroyd e A. K. Winston, *Non-conventional machining processes*, New York: Marcel Dekker, 1989.
- [9] J. A. McGeough, *Electrodischarge machining*, London: Chapman & Hall, 1988.
- [10] S. Krar e A. Check, *Electrical discharge machining*, New York: McGraw Hill, 1997.
- [11] K. Ho e S. Newman, “State of the art electrical discharge machining (EDM),” *International Jornal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 1287-1300, 2003.
- [12] A. B. Puri e B. Bhattacharyya, *An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag pnenomenon in WEDM*, vol. 43, India: Pergamon, 2002, pp. 151-159.
- [13] D. Aspinwall, R. Dewes, J. Burrows, M. Paul e B. Davies, *Hybrid High Speed Machining (HSM): System Design and Experimental Results for Grinding/HSM and EDM/HSM*, vol. 50, Elsevier, 2001, pp. 145-148.
- [14] D. Kremer, C. Lhiaubet e A. Moisan, *A Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations with Pulses in EDM*, vol. 40, Elsevier, 1991, pp. 211-214.
- [15] D. Kremer, J. Lebrun, B. Hosari e A. Moisan, *Effects of ultrasonic vibrations on the performances*

- in EDM*, vol. 38, 1989, p. 199-202.
- [16] Z. Jia, J. Zhang e X. Ai, *Study on a new kind of combined machining technology of ultrasonic machining and electrical discharge machining.*, vol. 37, Pergamon, 1997, pp. 193-197.
- [17] D. Aspinwall, M. Wise, K. Stout, T. Goh, F. Zhao e M. El-Menshawy, *Electrical discharge texturing*, vol. 32, 1992, pp. 183-193.
- [18] J. Kozak, K. Rajurkar e S. Wang, *Material removal in EDWM of PCD blanks*, 1994, pp. 363-369.
- [19] "IQS Directory," [Online]. Available: <http://www.iqsdirectory.com/edm/#info>. [Acedido em 03 07 2012].
- [20] T. Masuzawa, *State of the art of micromachining*, vol. 49, Ann. CIRP, 2000, pp. 473-488.
- [21] A. Arthur, P. Dickens e R. Cobb, *Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes*, Rapid Proto-typing Journal 2, 1996, pp. 4-12.
- [22] I. Ishida e Y. Takeuchi, *L-shaped curved hole creation by means of electrical discharge machining and an electrode curved motion generator*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19, 2002, pp. 260-265.
- [23] M. Fukui e N. Kinoshita, *Developing a 'mole' electric discharge digging machining*, Annals of the CIRP 38 (1), 1989, pp. 203-206.
- [24] S. Ichiyasu, A. Takeuchi, K. Watanabe, A. Goto e T. Magara, *Machining curved tunnel for coolant with mole EDM*, Kuala Lumpur: Proceedings of the Fourth International Conference on Die and Mould Technology, 1997.
- [25] J. Sanchez, I. Cabanes, L. L. d. Lacalle e A. Iamikiz, *Development of optimum electrodischarge machining technology for advanced ceramics*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 18 (12), 2001, pp. 897-905.
- [26] W. Konig, D. Dauw, G. Levy e U. Panten, *EDM—future steps towards the machining of ceramics*, Annals of the CIRP 37 (2), 1988, pp. 623-631.
- [27] R. Firestone, *Ceramic—Applications in Manufacturing*, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988, p. 133.
- [28] B. Yan, C. Wang, W. Liu e F. Huang, *Machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary EDM with a disklike electrode*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 16 (5), 2000, pp. 322-333.
- [29] X. Ding, J. Fuh, K. Lee, Y. Zhang e A. Nee, *A computer-aided EDM electrode design system for mold manufacturing*, International Journal of Production Research 38 (13), 2000, pp. 3079-3092.
- [30] J. Kruth e J. Peters, *Steps towards an integrated CAD/CAM system for mould design and manufacture: anisotropic shrinkage, component library and link to NC machining and EDM*,

Annals of the CIRP 35 (1), 1986, pp. 83-88.

- [31] S. Yeo e A. New, *A method for green process planning in electric discharge machining*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15 (4), 1999, pp. 287-291.
- [32] F. Tay e E. Haider, *The potential of plating techniques in the development of rapid EDM tooling*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 18 (12), 2001, pp. 892-896.
- [33] X. Ding, J. Fuh e K. Lee, *Computer aided EDM electrode design*, Singapore: Elsevier, 2002.
- [34] K. Mahajan, G. Knoppers, J. Oosterling e C. v. Luttervelt, *Knowledge based design of EDM electrodes for mould cavities pre-machined by high-speed milling*, The Netherlands: Elsevier, 2004.
- [35] Y. Lee e C. Li, *Automation in the design of EDM electrodes*, Hong Kong: Elsevier, 2009.
- [36] Erowa, "Erowa system solutions," [Online]. Available: www.erowa.com. [Acedido em 21 11 2012].
- [37] "Cimatron Group," Cimatron Ltd, [Online]. Available: <http://www.cimatron.com/>.
- [38] Hitachi, "Advanced Engineering Hitachi Tool," [Online]. Available: <http://www.hitachitool-eu.com/>. [Acedido em 24 09 2012].
- [39] S. Portugal, "Shunk Portugal," 2012. [Online]. Available: <http://www.schunk.pt>. [Acedido em 23 06 2012].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexo 1
