



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Relatório Fim de Curso V1.0

*Tema: Fabrico de Componentes em Material Compósito
(grafite) de matriz metálica (cobre) para aplicações
industriais*

Aluno: Hugo Daniel Pinheiro Branquinho

Orientador: Prof. Abel Dias dos Santos
Prof. José Duarte Marafona



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA | INGENHO.FEEL

Porto, 31 de Julho de 2006





Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Relatório Fim de Curso V1.0

*Tema: Fabrico de Componentes em Material Compósito
(grafite) de matriz metálica (cobre) para aplicações
industriais*

Aluno: Hugo Daniel Pinheiro Branquinho

Orientador: Prof. Abel Dias dos Santos
Prof. José Duarte Marafona



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010

Sub-prog. 1 - Formação de Recursos Humanos

Porto, 31 de Julho de 2006



6211047-37/LEN 2006/32245

Facult	21/2
Nº 10 5251	
CDU	
10 4 02 10	

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Resumo	vii
Introdução	1
1. Pesquisa Bibliográfica.....	3
1.1. Células de Hidrogénio	3
1.1.1. O que são.....	5
1.1.2. Como Funcionam	6
1.1.3. Placas Bipolares	8
1.1.3.1. Materiais.....	9
1.1.3.1.1. Grafite Natural	10
1.1.3.1.2. Cobre	12
1.1.3.2. Geometria da parte activa.....	13
1.1.4. Hidrogénio	14
1.1.4.1. Produção Do Hidrogénio.....	15
1.1.4.1.1. Processos termoquímicos	16
1.1.4.1.2. Processos Electrolíticos.....	17
1.1.4.1.3. Processo Foto biológico	18
1.1.4.2. Armazenamento Do Hidrogénio.....	18
1.1.4.2.1. Tecnologias de Armazenamento.....	19
1.2. Electroerosão.....	21
1.2.1. Definição do Processo	22
1.2.2. Eléctrodo	24
1.2.3. Materiais utilizados nos eléctrodos.....	25
2. Descrição Sumária do Trabalho realizado.....	27
2.1. Placas Bipolares com o material da SGL Carbon.....	27
2.1.1. Testes	28
2.1.2. Conclusão.....	30
2.2. Molde de compactação	31
2.2.1. Prensa.....	32
2.2.1.1. Controlo Numérico	33
2.2.2. Materiais Utilizados.....	34
2.2.2.1. Grafite	34
2.2.2.2. Cobre	35
2.2.2.3. Chumbo	36
2.2.3. Placas obtidas através do molde de compactação	36
2.2.3.1. Procedimento de obtenção das placas.....	37
2.2.3.1.1. Pesagem e colocação na matriz	37
2.2.3.1.2. Prensagem dos pós.....	37
2.2.3.1.3. Remoção dos pós prensados.....	38
2.2.3.2. Placas obtidas	41
2.2.3.2.1. Placa n.º1	41
2.2.3.2.2. Placa n.º2	43
2.2.3.2.3. Placa n.º3	43
3. Método de elementos finitos.....	45
4. Referências	48

Anexo A – Características do material da placa bipolar..... 49
Anexo B – Desenhos de Construção do Molde..... 51
Anexo C – Script desenvolvido para o ABAQUS® 59
Anexo D – Programa CNC da prensa 63
Anexo E – Modelo desenvolvido para a conferência internacional..... 67
M2D2006 67

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma célula de hidrogénio, nível macroscópico.....	5
Figura 2 – Rendimento comparativo entre as diversas tecnologias de células de combustível e outras tecnologias convencionais.....	6
Figura 3 – Esquema de permutas de electrões e protões na célula de hidrogénio.	7
Figura 4 – Placas Bipolares utilizadas para os testes.....	9
Figura 5 – Esquema molecular da grafite (a) e do diamante (b).....	11
Figura 6 – Escala de dureza Mohs.....	11
Figura 7 – Aspecto de um cristal de grafite	11
Figura 9 – Influência dos pinos no fluxo	14
Figura 10 – Custos de produção de hidrogénio.....	16
Figura 11 – Molécula de metano	16
Figura 12 – Na esquerda, produção de bio gás para a obtenção, à posteriori, de hidrogénio; na direita, captação de energia através de um concentrador de energia.....	17
Figura 13 – Divisão de uma molécula de água, através da electrólise.	17
Figura 15 – Compressão do átomo de hidrogénio em 200 bar (esquerda) e 700 bar (direita).....	19
Figura 16 – Armazenamento do hidrogénio a -253°C	19
Figura 17 – Armazenamento em hidretos de metal (esquerda), fornecimento de calor para libertar os átomos (direita).....	20
Figura 18 – Acção erosiva dos impulsos gerados	22
Figura 19 – Esquema construtivo de uma máquina de EDM diesinking.....	23
Figura 20 – Exemplo de um eléctrodo.....	24
Figura 21 – Aspecto da placa adquirida à empresa SGL Carbon.....	27
Figura 22 – Curvas de Potência (Potencial / Corrente)	29
Figura 23 – Curvas de Densidade de Potência (Densidade de Potencial / Densidade de Corrente)	29
Figura 24 – Desenho 3D do molde em execução	31
Figura 25 – Matriz e punção montados no porta ferramenta	32
Figura 26 – Pormenor da matriz, com chabro a 60°	32
Figura 27 – Ferramenta montada no porta ferramentas que por sua vez se encontra instalada na prensa.	33
Figura 28 – Comando numérico instalado na prensa hidráulica.	33
Figura 29 – Pós da grafite utilizada na compactação	35
Figura 30 – Pós de cobre utilizados.....	35
Figura 31 – Punção a comprimir os pós que se encontram no interior da matriz	37
Figura 32 – Etapas necessárias à extracção das placas.....	38
Figura 33 – Fragmentos de uma placa compactada com 30 ton.	39
Figura 34 – Defeito típico nas placas obtidas pelo molde de compactação.....	39
Figura 35 – Pormenores do defeito recorrente, estratificação.....	40
Figura 36 – Placa de grafite e 38% de cobre compactada com 80 ton e com ausência de defeitos visíveis	40
Figura 37 – Placa compactada com 80 ton e sem a mistura dos componentes.....	42
Figura 38 – Pormenor do defeito no canto da placa.....	42

Figura 39 – Placa obtida na segunda série, 38% de cobre, com estratificação de camadas visível..... 43

Figura 40 – Placa de grafite com 20% de cobre executada na 3ª série de ensaios..... 44

Figura 41 – Comparação para 4 modelos (3 teóricos e 1 prático)..... 45

Figura 42 – Desenvolvimento do campo de temperaturas (de cima para baixo, cobre, dieléctrico e aço)..... 46

Figura 43 – Screen shoots do ABAQUS ®..... 47

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Grupos dos principais tipos de células, classificados segundo a temperatura de funcionamento	4
Tabela 2 – Poder calorífico de vários combustíveis	14
Tabela 3 – Volume de hidrogénio nas variadas condições de armazenamento	20
Tabela 4 – Condições operatórias dos testes.....	28
Tabela 5 – Características da MEA	28
Tabela 6 – Características dos pós de grafite utilizada.	34
Tabela 7 – Características dos pós de cobre.....	35
Tabela 8 – Características dos pós de chumbo.....	36
Tabela 9 – Valores obtidos para as placas de grafite compactadas no INEGI.....	41

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. José Duarte Marafona e Prof. Abel Dias dos Santos, pelo incentivo e disponibilidade demonstrados assim como a ajuda gentilmente dada pelo Eng. Pedro Teixeira.

Agradeço também ao POCI – Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 pela oportunidade da realização deste estágio, e pela contribuição monetária para a realização do mesmo.

Resumo

Este projecto procura ir ao encontro de soluções tecnologicamente avançadas usando materiais já existentes, com custos de aquisição e construção inerentes mais reduzidos do que aqueles que são actualmente utilizados. Este trabalho não pretende inovar no que se refere à ciência dos materiais, mas demonstrar que os materiais existentes poderão ser uma hipótese, quando se fala em pilhas de hidrogénio ou eléctrodos de electroerosão.

Foram estudadas e executadas placas bipolares com diferentes composições. Para a execução das várias placas foi desenhado e construído um molde (molde de compressão).

Os testes preliminares mostraram que os materiais em causa têm uma performance um pouco menor do que os já utilizados, apresentando no entanto um custo de aquisição menor. Ponderando-se os factores eficiência e custo as placas obtidas neste projecto revelaram-se melhores.

Os testes às placas bipolares foram realizados com a ajuda do DEQ, que demonstrou interesse em fazer parte do projecto.

Foi executado ainda durante o período deste projecto, um artigo a ser exposto na conferência internacional, M2D2006, e vários trabalhos em FEA para simular o processo de EDM.

Introdução

No âmbito da disciplina anual “Projecto de Fim de Curso” realizei um projecto sob o tema “Fabrico de Componentes em Material Compósito (grafite) de matriz metálica (cobre) para aplicações industriais”. Este projecto, como o título indica, pretende provar que os materiais à base de grafite/cobre têm uma potencialidade de utilização muito superior àquela que actualmente se considera.

Este projecto tentou aplicar o material compósito (Grafite/Cobre) na produção de placas bipolares de pilhas de hidrogénio e na produção de eléctrodos para a electroerosão por penetração.

A escolha destas duas áreas de aplicação do material deveu-se a

-Placas bipolares:

- A grafite/cobre apresenta propriedades interessantes para o processo subsequente à produção de energia através de pilhas de hidrogénio,
- Tem um custo de aquisição inferior ao material que é actualmente utilizado,
- Apresenta um índice de maquinabilidade superior a outros materiais já utilizados, fazendo com que os custos de obtenção das placas diminuam.

-Eléctrodos para EDM:

- A utilização de grafite/cobre é já utilizada neste processo de maquinagem não convencional, pretendendo-se investigar o modo como os eléctrodos são obtidos.

Pretendeu-se desenvolver novos métodos e materiais com outras composições diferentes das existentes no mercado para que os mesmos fossem mais eficientes na aplicação a desempenhar.

1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa de dados e experiências anteriores é de elevada importância e, em grande parte, é a grande impulsionadora do sucesso.

Neste ponto tentou-se recolher o máximo de informação referente às actividades que serão abrangidas por este projecto.

1.1. Células de Hidrogénio

As células de combustíveis terão certamente um papel importante na economia, tanto neste século como no futuro [1]. Antecipa-se que o desenvolvimento e a distribuição de células de combustíveis economicamente viáveis e de confiança fomentem a era do hidrogénio [2].

Comparando as células de hidrogénio às máquinas termodinâmicas usadas para a produção de electricidade, as primeiras têm uma vantagem significativa pelo facto de não estarem limitadas pela eficiência do ciclo de Carnot e não necessitarem de nenhum componente móvel para converter a energia química em energia eléctrica.

A célula combustível com membrana de permuta protónica (PEM) é certamente a escolha futura para aplicações automóveis, em parte pela sua baixa temperatura de funcionamento ($<100^{\circ}\text{C}$) [3]. A célula de hidrogénio PEM é um sistema que converte hidrogénio e oxigénio em electricidade, sendo a água o único produto, razão que fomenta o seu interesse do ponto de vista ambiental [4].

Uma parte significativa da célula de combustível PEM são as placas bipolares (BP) [5], as quais perfazem, aproximadamente, 80% do peso total e 45% do custo total da pilha [6]. As BP são projectadas de modo a realizarem muitas funções, tais como distribuírem os gases uniformemente sobre as áreas activas, remover o calor das áreas activas, transmitir a corrente eléctrica de pilha em pilha e impedir fugas de gases e do refrigerante. Além disso, as placas devem ser de baixo custo, leves e de obtenção fácil [7].

Tabela 1 – Grupos dos principais tipos de células, classificados segundo a temperatura de funcionamento

	Pilhas de combustível de baixa e média temperatura ($t < 250^{\circ}\text{C}$)	Pilhas de combustível de alta temperatura ($t > 600^{\circ}\text{C}$)
Tecnologias aplicáveis	- Alcalinas (AFC) - Ácido Fosfórico (PAFC) - Membrana de Troca de Protões (PEMFC)	- Carbonatos Fundidos (MCFC) - Óxidos Sólidos (SOFC)
Dimensão típica	- Produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento com potências até 250 kW	- A maioria dos equipamentos em desenvolvimento têm potências na ordem de 2 MW, mas também se desenvolvem unidades com menos de 1 MW
Vantagens	- Rendimento elevado - Emissões reduzidas - Arranque rápido (especialmente as PEMFC) - Potencial para redução significativa do custo resultante de produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes	- Rendimento muito elevado - Emissões reduzidas - Processamento de combustível mais simples - Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais preciosos - Não são danificadas pelo CO - Potências mais elevadas
Desvantagens	- Potencial de cogeração limitado - Processamento de combustível relativamente complexo - Mais sensíveis ao CO - Requerem catalisadores de metais preciosos - Custo elevado (PAFC)	- Mercado limitado inicialmente à produção de electricidade (o que reduz o potencial para a redução do custo) - Complexidade dos sistemas híbridos

A obtenção do material ideal aliado a uma geometria activa favorável terá de ser o passo seguinte na obtenção de células de combustível economicamente viáveis e transportáveis.

1.1.1. O que são

Uma célula de combustível é uma célula electroquímica que converte continuamente a energia química de um combustível e de um oxidante em energia eléctrica, através dum processo que envolve essencialmente um sistema eléctrodo/electrólito [8].

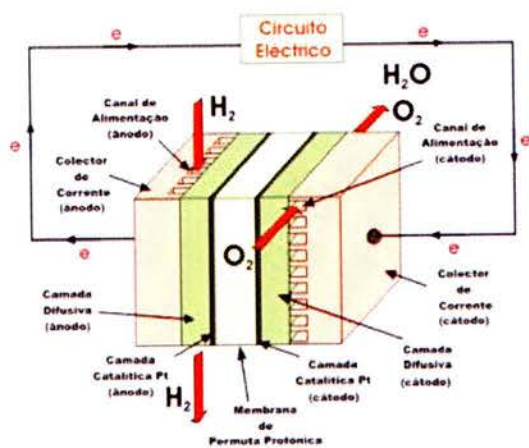


Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma célula de hidrogénio, nível macroscópico.

A figura que se segue compara a tecnologia das células de combustível e a tecnologia convencional já utilizada na produção de energia eléctrica.

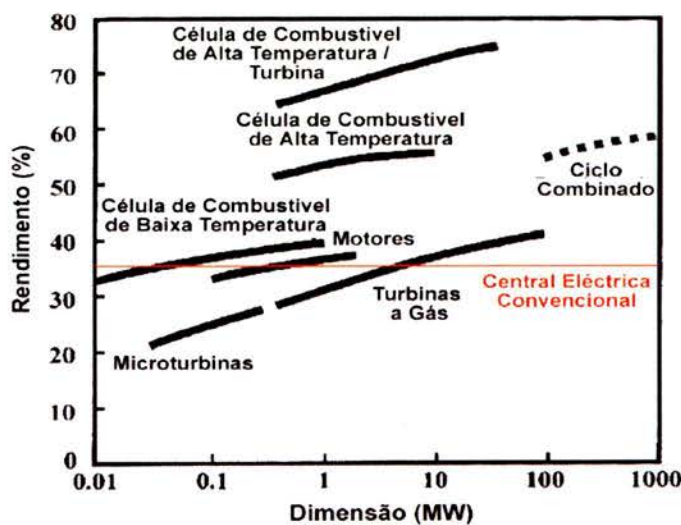


Figura 2 – Rendimento comparativo entre as diversas tecnologias de células de combustível e outras tecnologias convencionais

A figura 2 é explícita quando indica um rendimento associado às células de combustível muito superior ao actualmente utilizado em Portugal e praticamente no Mundo inteiro.

A passagem de uma central eléctrica convencional para, por exemplo, células de combustível de alta temperatura, depois do investimento inicial pago, permite obter uma diminuição dos custos de MW produzido, significativa, além da diminuição da emissão de poluentes.

1.1.2. Como Funcionam

Todas as células de combustível são constituídas por dois eléctrodos, um positivo e outro negativo, designados por, cátodo e ânodo, respectivamente [9]. De igual modo, todas as células têm um electrólito, que tem a função de transportar os iões produzidos no ânodo, ou no cátodo, para o eléctrodo contrário, e um catalisador, que acelera as reacções electroquímicas nos eléctrodos.

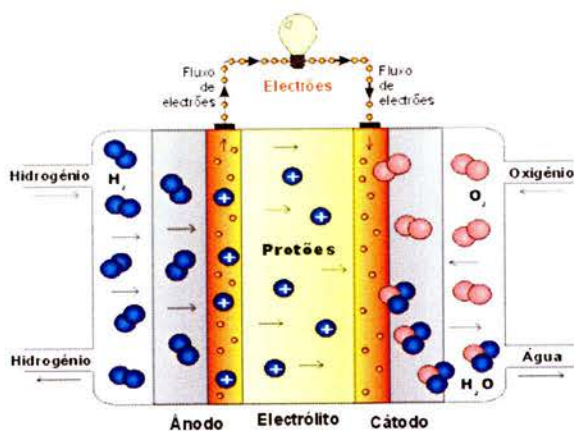
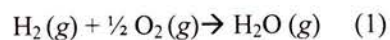


Figura 3 – Esquema de permutas de electrões e protões na célula de hidrogénio.

O hidrogénio (combustível) é fornecido através do ânodo da célula de combustível (ver figura2), onde é oxidado no catalisador de platina (camada difusiva/catalítica), havendo a produção de dois electrões e dois protões hidrogénio. De seguida, os electrões produzidos pela reacção de oxidação do hidrogénio são transportados através de um circuito eléctrico e utilizados para produzirem trabalho (corrente contínua, DC).

No cátodo, o oxigénio fornecido reage com os protões transportados através do electrólito e com os electrões provenientes do circuito eléctrico. O produto final da reacção que ocorre no cátodo é o vapor de água.

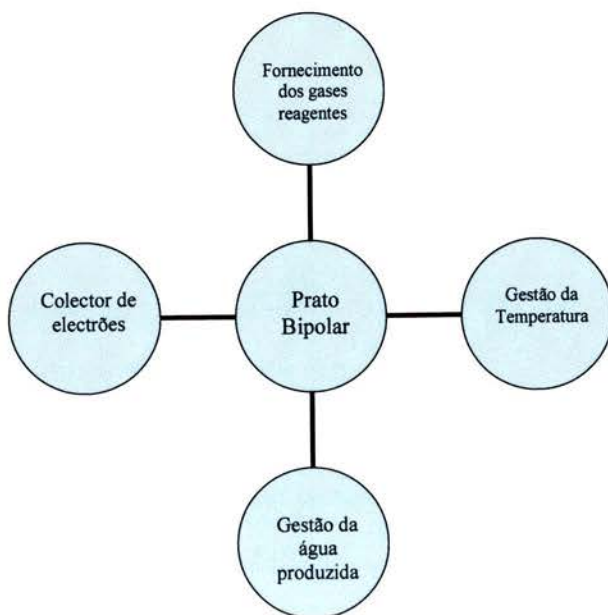


1.1.3. Placas Bipolares

As placas bipolares (BP) são um componente chave das células de combustíveis com membrana de troca de protões (PEM) tendo um carácter multifuncional.

As BP têm as seguintes funções [7]:

1. Distribuir o combustível e o oxidante dentro da pilha.
2. Facilitar a gestão da água dentro da pilha.
3. Separar pilhas individuais na pilha.
4. Retirar a corrente eléctrica da pilha
5. Facilitar a gestão do calor produzido.



As BP também contribuem significativamente para o volume, peso e custo das células de combustível PEM.

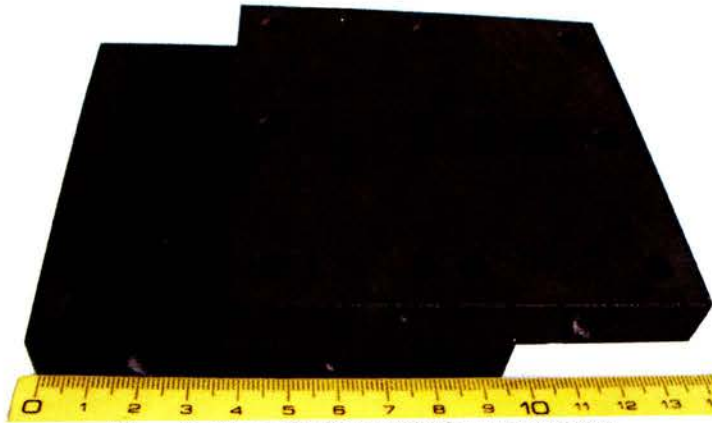


Figura 4 – Placas Bipolares utilizadas para os testes

1.1.3.1. Materiais

Há esforços vigorosos em todo o mundo no sentido de encontrar materiais apropriados para as BP. Os materiais incluem a grafite, folhas metálicas revestidas, compostos do polímero, etc..

Para um material ser qualificável para uma BP, Borup e Vanderborgh [5] e Mehta e o Cooper [7] sugeriram os seguintes critérios/propriedades:

- Condutividade eléctrica: resistência da placa $< 0.01 \Omega \cdot \text{cm}^2$.
- Condutividade térmica: tão alta quanto possível.
- Permeabilidade ao gás/hidrogénio: $< 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2$.
- Resistência à corrosão: taxa da corrosão $< 0.016 \text{ mA}/\text{cm}^2$.
- Pressão de compressão: $> 152 \text{ KPa}$.
- Densidade: $< 5 \text{ gm}/\text{cm}^3$.

Tradicionalmente, o material mais usado nas BP é a grafite natural ou sintética. Esse uso é devido à sua excelente estabilidade química e à resistência ao ambiente hostil da célula de combustível. Tem como problemas os custos elevados, resistência mecânica baixa e a necessidade de maquinagem (aumento dos custos de produção) das geometrias activas [10].

1.1.3.1.1. Grafite Natural

A grafite é uma forma natural do carbono. Ao contrário do diamante, a grafite é condutora, e pode ser usada, por exemplo, como os eléctrodos de uma lâmpada eléctrica de arco voltaico.

A grafite é uma excelente condutora de calor e electricidade e tem uma temperatura de fusão muito elevada, na ordem os 3500°C [21]. É extremamente resistente a ácidos, quimicamente inerte e altamente refractária.

1.1.3.1.1.1. Características físicas da Grafite

- A estrutura cristalina é opaca
- Sistema de cristal é hexagonal; $6/m\ 2/m\ 2/m$

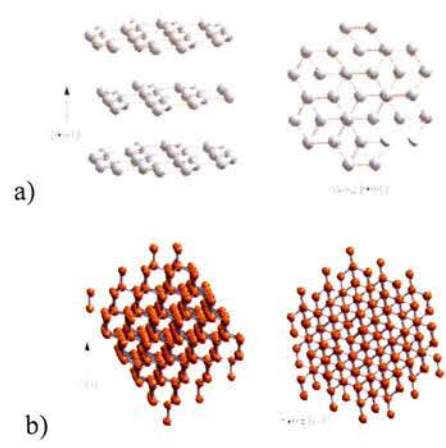


Figura 5 – Esquema molecular da grafite (a) e do diamante (b)

- A Dureza na escala Mohs é de 1 a 2



Figura 6 – Escala de dureza Mohs



Figura 7 – Aspecto de um cristal de grafite

- O diamante é o mineral mais duro conhecido pelo homem, mas a grafite é um dos mais macios.
- O diamante é um isolador eléctrico excelente, a grafite é um condutor da electricidade.
- O diamante é o abrasivo mais eficiente, a grafite é um lubrificante muito bom.
- O diamante cristaliza no sistema isométrico, a grafite cristaliza-se no sistema hexagonal.

Comment [C1]: pesquisar

1.1.3.1.2. Cobre

O cobre é um metal de transição avermelhado, apresenta alta condutibilidade eléctrica e térmica, só superada pela prata [22]. Entre as suas propriedades mecânicas destacam-se a sua excepcional capacidade de deformação e ductilidade

A aplicação por excelência do cobre é, como material condutor (fios e cabos), destino de aproximadamente 45% [22] do consumo anual de cobre.

1.1.3.2. Geometria da parte activa

A geometria da parte activa da placa bipolar compreende uma superfície planar, em que o campo de fluxo se desenvolve tanto do combustível, como do oxidante. A placa conta ainda com uma rede de passagens para fornecimento e recolha do combustível e oxidante, antes e depois da passagem na parte activa, respectivamente.

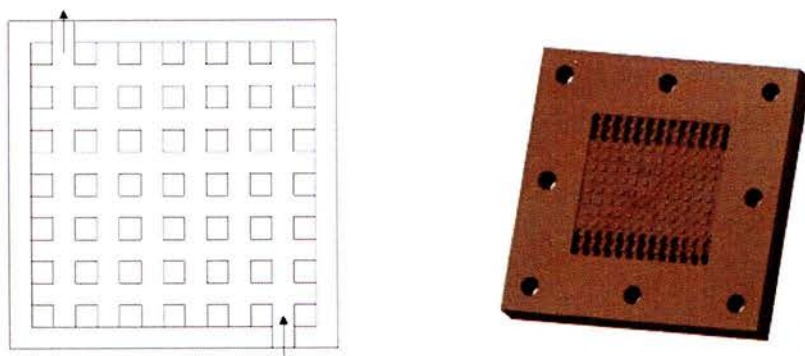


Figura 8 – Aspecto da geometria da parte activa, à direita a placa utilizada para os testes

A escolha desta geometria deveu-se há falta de informação e resultados disponíveis, pelo que foi solicitada a cooperação do Departamento de Engenharia Química da FEUP (DEQ), na medida que os mesmos têm em posse uma célula de hidrogénio PEM, a qual foi utilizada como base de comparação.

Esta geometria de pinos tem as seguintes características [11],

- Os reagentes tendem a seguir o trajecto que oferece menor resistência, a qual pode resultar em formação de áreas estagnadas;

- Pode conduzir a uma distribuição desigual do reagente, remoção inadequada da água;

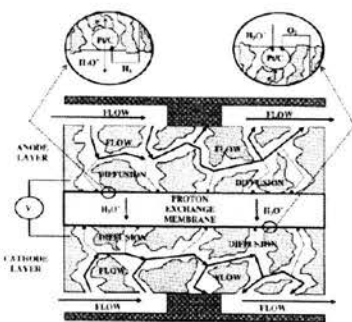


Figura 9 – Influência dos pinos no fluxo

- Os pinos obrigam o fluxo de hidrogénio a atravessar o electrólito, diminuindo a possibilidades de fluxos paralelos.

1.1.4. Hidrogénio

O hidrogénio é o elemento mais leve e abundante no universo. É um portador de energia, não uma fonte de energia, isto é, armazena e entrega a energia sob uma forma possível de ser utilizada. No seu estado puro (H_2), é um gás incolor e inodoro. Combina-se facilmente com outros elementos, o hidrogénio é raramente encontrado sozinho. É possível encontrar hidrogénio como parte de outros compostos, tais como combustíveis fósseis, plantas, água, etc..

Tabela 2 – Poder calorífico de vários combustíveis

Combustível:	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogénio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

O hidrogénio tem diversas propriedades químicas que afectam o seu uso como um combustível [12]:

- Combina-se rapidamente com o oxigénio para formar água;
- Tem um rácio energia/peso elevado (quase 3 vezes mais do que a gasolina), mas a densidade específica de energia é baixa na temperatura e pressão padrão;
- O hidrogénio é altamente inflamável; apenas é necessária uma pequena quantidade de energia para inflamá-lo;
- A combustão do hidrogénio não produz o dióxido de carbono (CO_2) ou emissões do enxofre. Pode produzir emissões de óxido nitroso (NO_x) sob algumas circunstâncias particulares;
- O hidrogénio pode ser produzido recorrendo a energias renováveis, tais como o etanol (este processo, emite algum dióxido de carbono), electrólise da água (a electrólise é muito cara) entre outros.

1.1.4.1. Produção Do Hidrogénio

O hidrogénio pode ser produzido usando uma variedade de recursos energéticos – combustíveis fósseis, como o carvão e o gás natural, com captação e eliminação do carbono; renováveis, como a bio massa, e energias renováveis, incluindo solar, vento, geotérmico, e hidráulica; e poder nuclear.

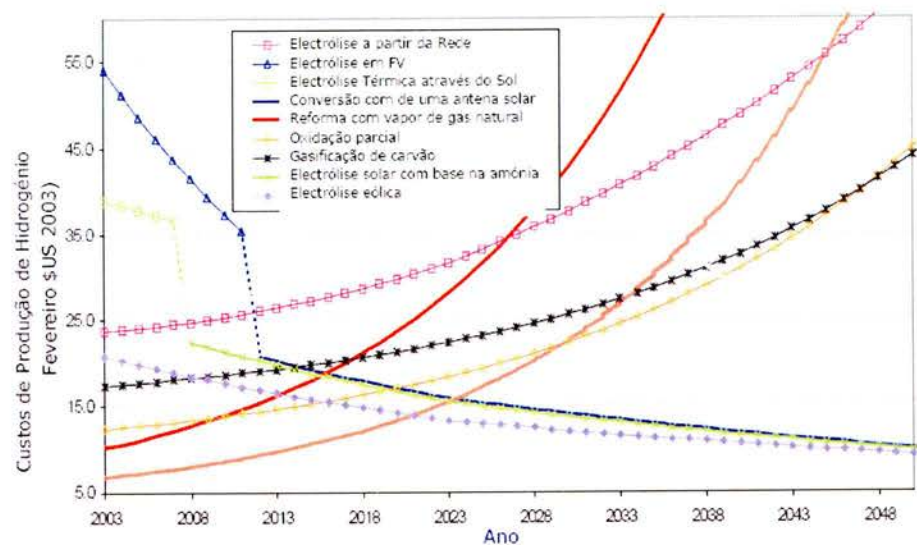


Figura 10 – Custos de produção de hidrogénio [18].

1.1.4.1.1. Processos termoquímicos

Os processos termoquímicos são, actualmente, os mais utilizados [13], já que a tecnologia necessária para estes processos existe e já foi convenientemente testada. Dentro dos processos termoquímicos realça-se,

Reforming do vapor de metano: Neste processo, o vapor a alta temperatura é usado para extrair o hidrogénio de uma fonte do metanol, tal como o gás natural. Este é o método mais comum de produzir hidrogénio; aproximadamente 95% [13] do hidrogénio que é usado nos Estados Unidos é produzido por este método.



Figura 11 – Molécula de metano

Outros processos termoquímicos: (1) divisão da molécula usando o calor de um concentrador solar, e (2) queima de bio massa (i.e., material biológico, como as plantas ou o desperdícios agrícolas) para gerar um bio-óleo ou um gás, o qual é tratado quimicamente para produzir o hidrogénio.

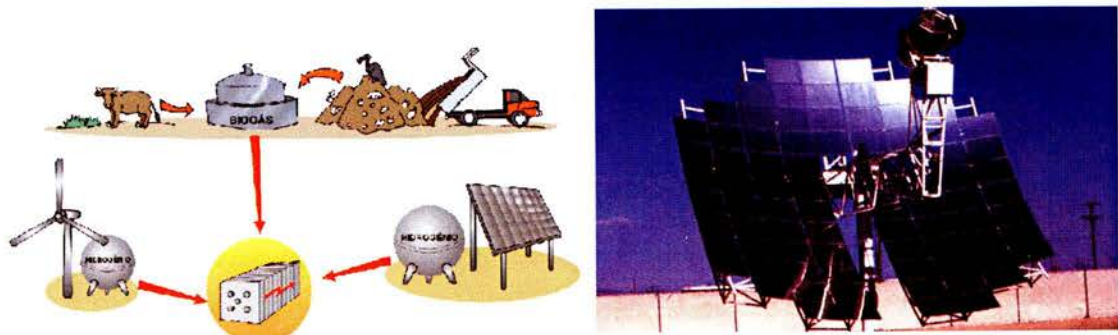


Figura 12 – Na esquerda, produção de bio gás para a obtenção, à posteriori, de hidrogénio; na direita, captação de energia através de um concentrador de energia.

1.1.4.1.2. Processos Electrolíticos

Na electrólise a electricidade é usada para separar a molécula de água (H_2O) em hidrogénio e oxigénio. Os sistemas actuais da electrólise necessitam de muita energia para realizar a separação, pelo que o processo não é economicamente viável [13]. O desafio deve ser desenvolver um processo com um custo de construção e manutenção baixo e que seja fiável, para que a electrólise possa ser utilizada fora dos laboratórios.



Figura 13 – Divisão de uma molécula de água, através da electrólise.

1.1.4.1.3. Processo Foto biológico

Neste processo de produção de hidrogénio, a luz solar é usada para separar a molécula de água. Existem dois processos foto biológicos em estudos:

(1) Métodos de fotossíntese, em que microrganismos, quando expostos à luz solar, separam a molécula de água para produzir o hidrogénio;



Figura 14 – Algas utilizadas para a obtenção do hidrogénio.

(2) Foto electrólise, em que semicondutores, quando expostos à luz solar e submersos em água, geram energia suficiente para produzir hidrogénio por separação da molécula de água.

1.1.4.2. Armazenamento Do Hidrogénio

Encontrar um método com custos reduzidos de armazenar hidrogénio é um desafio, já que o hidrogénio apesar de conter mais energia por peso do que qualquer outro portador de energia, contém muito menos energia por volume. Isto faz com que seja difícil armazenar uma quantidade de hidrogénio grande, num espaço pequeno, como por exemplo um tanque de combustível de um automóvel.

1.1.4.2.1. Tecnologias de Armazenamento

Tanques de alta pressão: O hidrogénio pode ser comprimido e armazenado em tanques de armazenamento de alta pressão. Estes tanques devem ser resistentes, duráveis, de baixo peso, compactos, bem como com um custo competitivo [14].

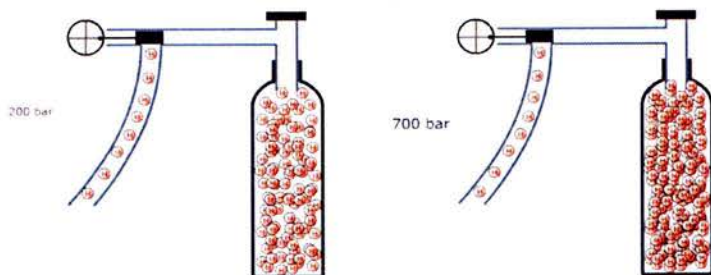


Figura 15 – Compressão do átomo de hidrogénio em 200 bar (esquerda) e 700 bar (direita).

Hidrogénio líquido: O hidrogénio pode ser armazenado sob a forma de líquido. Nesta forma, mais hidrogénio pode ser armazenado por volume, mas deve ser mantido a temperatura muito baixas ($\approx -253^{\circ}\text{C}$).

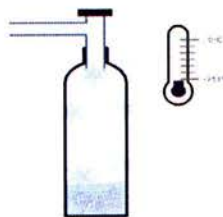


Figura 16 – Armazenamento do hidrogénio a -253°C

O armazenamento dentro de materiais sólidos, como pós, ou líquidos é uma realidade, mas ainda com muito conhecimento por adquirir. As tecnologias em estudo incluem hidretos reversíveis de metal, onde o hidrogénio se combina quimicamente com

alguns metais, a qual pode resultar numa capacidade de armazenamento mais elevada quando comparado com o armazenamento de gás sob alta pressão ou líquido.

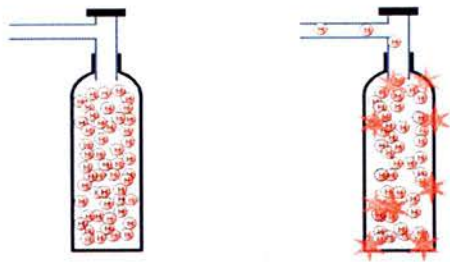


Figura 17 – Armazenamento em hidretos de metal (esquerda), fornecimento de calor para libertar os átomos (direita)

Todos estes processos necessitam de energia, tanto para a compressão do hidrogénio como para o seu arrefecimento e posterior aquecimento, pelo que, o método ideal de armazenamento está longe de ser o ideal.

Na tabela que se segue estão descritos os volumes do hidrogénio, nas condições anteriores e tendo 1 litro de gasolina como referência,

Tabela 3 – Volume de hidrogénio nas variadas condições de armazenamento

Condições PTN ¹	3100 Litros
200 bar	13 Litros
700 bar	6,4 Litros
-253°C	3,6 Litros
Metanol	1,8 Litros
Hidretos de metal	1,7 Litros

¹ Temperatura = 0°C e Pressão=1atm

1.2. Electroerosão

A electroerosão tem vindo a assumir um papel relevante em diferentes sectores da produção mecânica, nomeadamente em aplicações que utilizam materiais difíceis de maquinar, tanto pela sua elevada dureza (aços de ferramenta, cerâmicos e super ligas) como pelas baixas espessuras necessárias a alguns pormenores que constituem as peças pretendidas.

Quando os factores de resistência mecânica e/ou os aspectos construtivos necessários às peças tornam impraticáveis, ou de elevada dificuldade, a realização das mesmas através de métodos convencionais por arranque de aparta, a decisão será enveredar por métodos mais inovadores, estando a electroerosão em destaque.

A vantagem que determina o uso da electroerosão em detrimento das tecnologias tradicionais reside no facto de materiais metálicos poderem ser maquinados depois de endurecidos, por qualquer tratamento térmico ou termoquímico, conseguindo-se obter uma elevada precisão dimensional. Em termos de geometrias exequíveis, a electroerosão permite a obtenção de praticamente todos os perfis e superfícies necessárias de serem aplicadas em projecto, tais como, arestas vivas, perfis e superfícies curvas, etc.. Outro factor de elevada importância em projecto é a reduzida ou mesmo a ausência de deformações ou fissuras à superfície, que diminui substancialmente concentrações de tensões, de elevado relevo aquando de solicitações dinâmicas.

Contudo a electroerosão apresenta um défice de produtividade. Esta falta de produtividade recai sobre o método utilizado para remoção do material excedente da peça, assim como no tempo necessário à obtenção do acabamento superficial requerido. O processo em causa revela dificuldades quando o material submetido ao processo é

bom condutor de calor, como é caso do cobre. Na tentativa de diminuir este senão, a compreensão das propriedades e as características dos vários materiais de EDM permite produzir o melhor eléctrodo. Quando mais um eléctrodo for apropriado ao processo, melhor será a produtividade assim como a diminuição dos custos produtivos.

1.2.1. Definição do Processo

O processo de electroerosão assenta no princípio de remoção de material excedente da peça com descargas sucessivas de uma fonte de corrente DC pulsante.



Figura 18 – Acção erosiva dos impulsos gerados

Os impulsos gerados pela fonte de DC rectificada são de grande potência e responsáveis pela remoção do material. A faísca é formada entre as superfícies mais próximas, compreendidas entre o eléctrodo e a peça, fazendo com que nesse ponto a peça assuma a forma do eléctrodo.

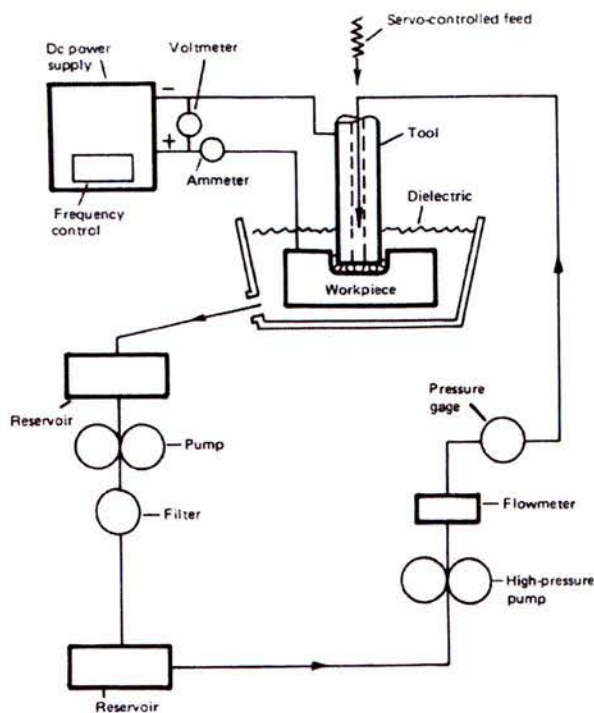


Figura 19 – Esquema construtivo de uma máquina de EDM diesinking

A ferramenta, ou seja o eléctrodo, é normalmente em cobre electrolítico (devido à sua boa condutividade térmica, cerca de 400 W/m.K a uma temperatura de aproximadamente 230°C), liga de cobre, grafite, etc..

Quando se inicia o processo, o eléctrodo está por norma afastado da peça, o que, em conjunto com a substância dieléctrica, determina a ausência de passagem de corrente entre o eléctrodo e a peça. À medida que o eléctrodo se aproxima da peça, a substância dieléctrica satura e conduz uma descarga eléctrica que aquece a peça e o eléctrodo (entre 8000°C e 12000°C) [15], a uma temperatura capaz de fundir e vaporizar uma pequena porção das suas superfícies.

O movimento da ferramenta é controlado por um servomecanismo para que se consiga alcançar o gap pretendido.

1.2.2. Eléctrodo

Tendo em mente que a faísca retira material tanto da peça como do eléctrodo, a escolha do eléctrodo é deveras importante. Assim definem-se as seguintes características:

- Bom condutor de electricidade;
- Bom condutor de calor;
- Baixas taxas de desgaste (temperatura de fusão superior há peça);
- Facilidade de maquinagem;
- Capacidade de produzir boas superfícies na peça (densidade e tamanho de grão compatíveis com a rugosidade da superfície pretendida);



Figura 20 – Exemplo de um eléctrodo

Na tentativa de diminuir o desgaste da ferramenta utilizam-se ligas, sendo a mais utilizada cobre/grafite. A grafite é razoavelmente fácil de maquinar e vaporiza a altas temperaturas o que faz baixar o desgaste das ferramentas. O cobre confere uma melhoria na condutividade eléctrica e térmica. Com a liga cobre/grafite conseguem-se

eléctrodos capazes de resistir a altas temperaturas e com uma boa condutividade eléctrica e térmica.

1.2.3. Materiais utilizados nos eléctrodos

Os materiais utilizados no fabrico de eléctrodos podem dividir-se em dois grupos [16]: o primeiro, o dos materiais metálicos, do qual fazem parte o cobre electrolítico, o cobre/tungsténios, as cuprografites, o alumínio e as suas ligas, o latão e suas ligas e até os aços. O segundo, o dos materiais não metálicos, no qual podemos incluir a grafite.

Nos primórdios deste processo era usado um eléctrodo em latão com uma camada de cobre para lhe dar uma maior condutividade eléctrica mas devido ao rápido desgaste do latão deixaram de ser economicamente viáveis.

Os eléctrodos de cobre, são usados quando queremos grande resistência por parte destes, pois tem um ponto de fusão elevado e são fáceis de maquinar, podendo assim obter uma diversidade de formas; os de prata são usados para trabalhos muito específicos pois são bastantes mais caros, sendo estes a referência em termos de condutividade.

Os que são feitos de cobre/tungsténio, são usados quando precisamos de uma maior durabilidade em detrimento da rapidez do processo dando uma grande precisão às peças, mas são usados em poucos casos devido ao preço e à baixa variedade de tamanhos existentes.

Nos eléctrodos de grafite, temos de ter em conta a sua densidade e o tamanho do grão, já que são factores condicionantes do nível de rugosidade obtida na peça, podendo ser usados quando a peça não precisa de acabamentos muito exigentes, pois

obtemos uma satisfatória relação preço/qualidade. Quanto menor foi o tamanho do grão e maior a densidade melhor será o acabamento da peça.

Os eléctrodos de grafite podem usar uma corrente maior, pois não estão tão sujeitos ao desgaste, devido à sua elevada temperatura de fusão.

De uma forma geral, os eléctrodos de metal são de baixo custo e dispõem de uma boa “força” de maquinagem, sendo os aconselhados para operadores pouco experientes. Com estes mesmos eléctrodos o processo de maquinagem fica mais lentos e denota-se um maior desgaste do eléctrodo.

Os de grafite, têm grande resistência ao desgaste, maquinam a grandes velocidades e tornam a maquinagem muito simples, mas tem como inconvenientes o elevado custo, podendo por vezes perder pequenas partículas (devido ao método construtivo, aglomeração e sinterização).

2. Descrição Sumária do Trabalho realizado

2.1. Placas Bipolares com o material da SGL Carbon

Depois de vários contactos e consulta de preços, foram encomendadas 4 placas de grafite/ cobre à empresa SGL Carbon (ver Anexo A). Estas placas foram fornecidas com as seguintes dimensões exteriores: 95x95x13 [mm].



Figura 21 – Aspecto da placa adquirida à empresa SGL Carbon

Com as placas em mão e feito o levantamento da geometria da placa activa da célula, fornecida pelo DEQ, foi feito um desenho de construção para que a operação de maquinagem fosse orçamentada. A operação de maquinagem foi adjudicada a uma empresa exterior.

Os custos referentes à aquisição do material (4 placas) e maquinagem (2 placas) cifraram-se em 742,40 €. O custo de cada placa produzida ficou-se pelos 285,60€, contrastando com os 673€ da placa adquirida pelo DEQ.

Neste primeiro passo vislumbra-se uma redução do custo de obtenção de cerca de 42%.

2.1.1. Testes

Nesta fase foram feitas curvas de potência e de densidade de energia para as duas placas (a de grafite/cobre e a de grafite do DEQ). Com estes primeiros testes teremos uma ideia das performances de cada uma das placas, para que mais testes possam fundamentar.

Os testes demonstraram que as placas construídas pelo autor não superaram as do DEQ (cerca de 20% menos de potência).

Tabela 4 – Condições operatórias dos testes

Condições Operatórias		
Caudal O2 (L/min)	2	
Caudal H2 (L/min)	0,2	
Temperatura (°C)	30	
Pressão Cátodo/Ânodo (bar)	1,5	Humidificados
Estequiometria	2,1	

Nos testes as condições operatórias e a membrana foram mantidas para que a única variável fosse as placas.

Tabela 5 – Características da MEA

MEA	
Membrana	GEFC 111
Catalisador	Johnson Matthew
Área (cm2)	25
Com GDL	EC-TP1-060-t
Torque	3,5

Os resultados dos testes realizados nas instalações do DEQ estão resumidas nas curvas de potência que se seguem,

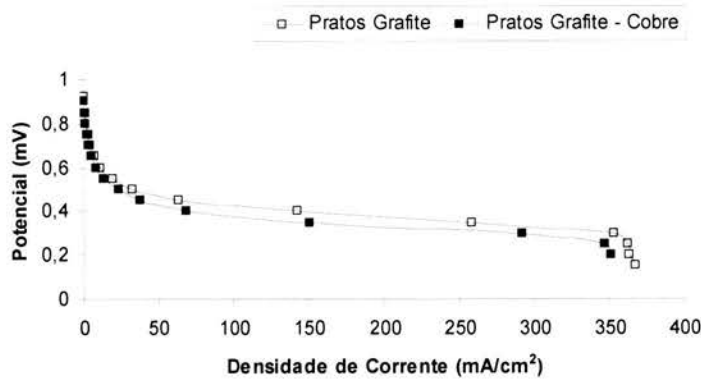


Figura 22 – Curvas de Potência (Potencial / Corrente)

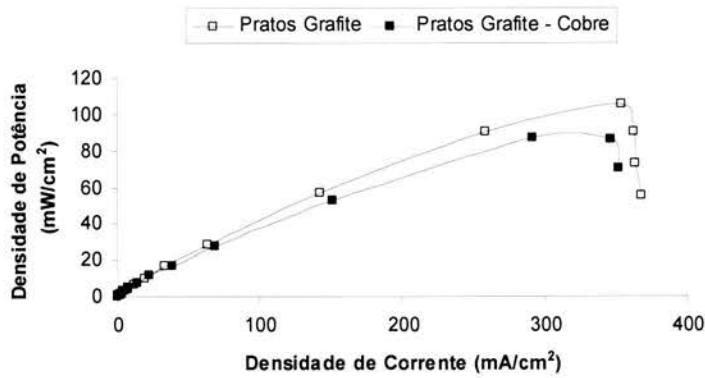


Figura 23 – Curvas de Densidade de Potência (Densidade de Potência / Densidade de Corrente)

A potência das placas de grafite/cobre demonstrou ser cerca de 20% menor do que a potência obtida pelas placas de grafite.

A densidade de energia também se revelou menor.

Estes testes têm um erro inerente alto, já que o desenho da parte activa é deveras importante, e um desvio de um décimo de milímetro na geometria acarreta uma alteração substancialmente maior na performance da célula. As placas de grafite/cobre continham ainda uma fenda, induzida pelo excesso de binário no aperto do adaptador, a qual fazia com que houvesse uma descontinuidade na transferência de electrões, isto é, diminui a densidade de potência e de corrente.

2.1.2. Conclusão

Os testes das placas revelaram que as placas de grafite/cobre têm performances inferiores às performances da placa do DEQ. Porém, o custo das placas de grafite/cobre revelaram-se mais baixos (42% inferiores). Quando ponderados os dois factores (*custo* e *eficiência*) com pesos iguais conclui-se que a placa obtida neste projecto é, aproximadamente, 67% melhor.

Mais estudos teriam de ser executados para que se pudessem retirar mais conclusões, nomeadamente no que concerne à corrosão das placas, resistências mecânicas entre outras.

2.2. Molde de compactação

Na tentativa de diminuir os custos de produção das placas de grafite e realização dos eléctrodos foi idealizado um molde que servirá, numa fase inicial, para obter as dimensões exteriores. Este molde vai permitir criar materiais com composições diferentes e optimizadas para a função que irá desempenhar.

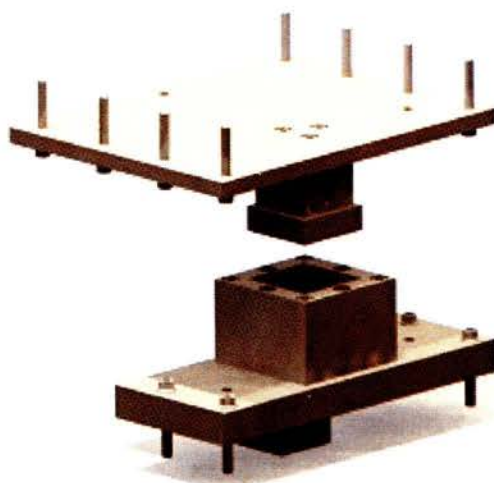


Figura 24 – Desenho 3D do molde em execução

Este molde de compressão foi idealizado e estudado pelo autor, tendo sido feito um estudo exaustivo em relação à furação das placas e tratamentos térmicos a realizar na matriz e punção¹.

O tratamento térmico (têmpera) foi realizado com o intuito de não ocorrer a migração de elementos de uma peça para a outra (matriz-punção, ou vice versa), isto é, a soldagem dos elementos.

¹ Ver Anexo



Figura 25 – Matriz e punção montados no porta ferramenta

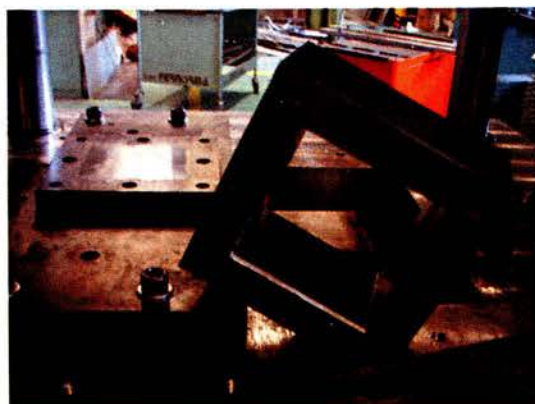


Figura 26 – Pormenor da matriz, com chabro a 60°

A matriz e o punção foram executados com um ajustamento deslizante apertado (IT6) para que os pós não saíssem da matriz aquando da compressão.

Não houve necessidade de incorporar ou realizar operações de lubrificação, já que a grafite é um lubrificante sólido.

2.2.1. Prensa

A prensa utilizada encontra-se no CETECOP INEGI e tem uma capacidade combinada de 160 ton (60 ton o embutidor e 100 ton o cerra-chapas). Por razões de segurança apenas foi utilizado o cerra-chapas para fazer a compressão dos pós.

O molde de compactação foi montado num porta ferramenta, o qual permitiu fazer o guiamento do punção.

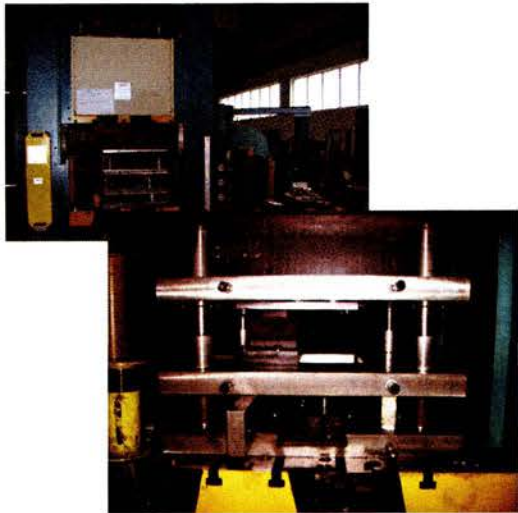


Figura 27 – Ferramenta montada no porta ferramentas que por sua vez se encontra instalada na prensa.

A força da prensa necessária apenas foi conseguida através do desenvolvimento e implementação de um programa CNC¹.

2.2.1.1.Controlo Numérico

A imposição da força a aplicar só foi possível devido ao programa CNC desenvolvido para o efeito.



Figura 28 – Comando numérico instalado na prensa hidráulica.

¹ Ver Anexo

O comando numérico instalado na prensa tem baixas capacidades de controlo; apenas tem capacidade de controlar a prensa por deslocamento, se a pressão predefinida no programa for cumprida. O controlo da prensa não permite a imposição de uma frequência de compactação nem o controlo em tempo real.

A imposição de uma frequência de compactação seria interessante para estudar o efeito da mesma frequência na acomodação dos pós da grafite, isto é, se a densidade aumenta. O controlo em tempo real da posição da prensa iria permitir controlar a dimensão da placa com ela ainda na matriz.

2.2.2. Materiais Utilizados

2.2.2.1. Grafite

A grafite utilizada nas placas foi fornecida pela empresa norte americana, ASBURY Carbons e tinha as seguintes características,

Tabela 6 – Características dos pós de grafite utilizada.

% Carbono	99%
Densidade	2,20-2,35
Granulometria	50 μ m

A grafite foi cedida pelo INEGI, pelo que não possível decidir qual a forma dos grânulos. Os pós de grafite utilizados eram esféricos quando os aconselhados seriam em forma de flocos [23].



Figura 29 – Pós da grafite utilizada na compactação

A forma de flocos permite [23] obter formas mais compactas, isto é, com menos poros (poros diminuem a capacidade de transferência da energia eléctrica).

2.2.2.2.Cobre

O pó de cobre que foi utilizado para fazer a mistura foi comprado à empresa Goodfellow. Os pós de cobre continham as seguintes características,

Tabela 7 – Características dos pós de cobre.

% Cobre	99,5%
Densidade	8,96
Granulometria	50 µm

A granulometria do cobre e forma dos pós é a mais adequada [23] para se realizar a sinterização das placas.

A forma esférica dos grãos permite uma boa infiltração do cobre e um ajustamento quase perfeito dos pós às porosidades encontradas.



Figura 30 – Pós de cobre utilizados

2.2.2.3.Chumbo

O chumbo não foi utilizado nas placas mais uma vez porque o tempo não foi suficiente e devido à falta de maquinaria para a realização dos ensaios mecânicos, já que a função do chumbo seria a de aumentar as características mecânicas das placas [23].

Este aumento da resistência mecânica teria influência na espessura das placas, pelo que permitiria uma diminuição da espessura da placa que por sua vez iria diminuir o peso da mesma. Seriam necessários testes para verificar se o ganho da diminuição da espessura da placa seria suficiente para compensar o aumento da densidade do chumbo em relação à grafite

O pó de chumbo foi comprado à empresa Goodfellow e continha as seguintes características,

Tabela 8 – Características dos pós de chumbo.

% Chumbo	99,5%
Densidade	11,35
Granulometria	150 µm

2.2.3. Placas obtidas através do molde de compactação

O molde idealizado e construído no decorrer deste projecto permitiu a obtenção de variadas placas de grafite/cobre com as mais diversas composições.

O elemento cobre foi considerado como o elemento chave, já que o mesmo tem uma condutividade eléctrica muito alta, só superada pela prata, aliada a características mecânicas também superiores à grafite. Com o elemento chave definido

foram realizados pares de placas com diferentes combinações de cobre a fim de se prever o impacto do mesmo elemento no comportamento das células de hidrogénio.

2.2.3.1. Procedimento de obtenção das placas

2.2.3.1.1. Pesagem e colocação na matriz

Os materiais eram pesados de acordo com o pretendido. Como primeiro passo foram produzidas placas de grafite com a mesma composição das adquiridas na empresa SGL Carbon, ou seja, com 38% de cobre.

2.2.3.1.2. Prensagem dos pós

Para a prensagem dos pós era corrido o programa de CNC, onde era definida a carga a aplicar aos mesmos. Neste caso foi escolhida uma força de 80 ton (corresponde a uma pressão de 87 MPa).

A pressão utilizada foi um compromisso entre valores já utilizados em bibliografia e força máxima da prensa tida como segura.

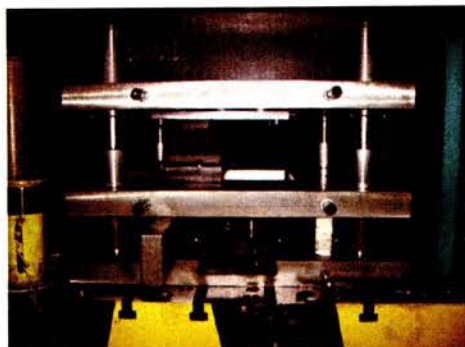


Figura 31 – Punção a comprimir os pós que se encontram no interior da matriz

2.2.3.1.3. Remoção dos pós prensados

A operação de remoção das placas foi uma das etapas mais complexas e que exigiu maior atenção, já que um procedimento mal executado provocaria a danificação das placas produzidas.

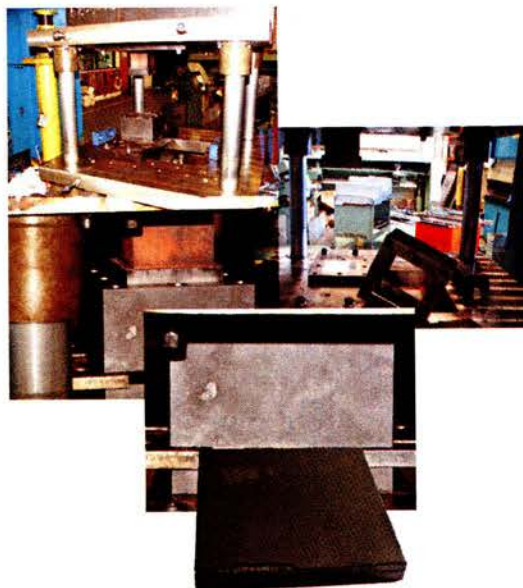


Figura 32 – Etapas necessárias à extracção das placas

Placas compactadas com forças inferiores a 80 ton apresentavam uma resistência mecânica a verde muito baixa, não permitindo serem manuseadas, sendo que a solicitação dinâmica a que as placas estavam sujeitas durante o processo de remoção era superior àquela que existia entre camadas, provocando a separação das mesmas.



Figura 33 – Fragmentos de uma placa compactada com 30 ton.

A figura anterior mostra o que resta de uma placa compactada com uma força de 30 ton. A mesma à saída do molde aparentava diversos defeitos e quando foi manuseada fragmentou-se, isto é, não tinha resistência suficiente para esse manuseamento.

As placas que se seguiram foram compactadas com um força de intensidade igual a 80 ton (correspondente a 86 MPa). Esta força concedeu às placas uma resistência mecânica suficientemente alta para serem movimentadas, sem contudo estarem isentas de defeitos.

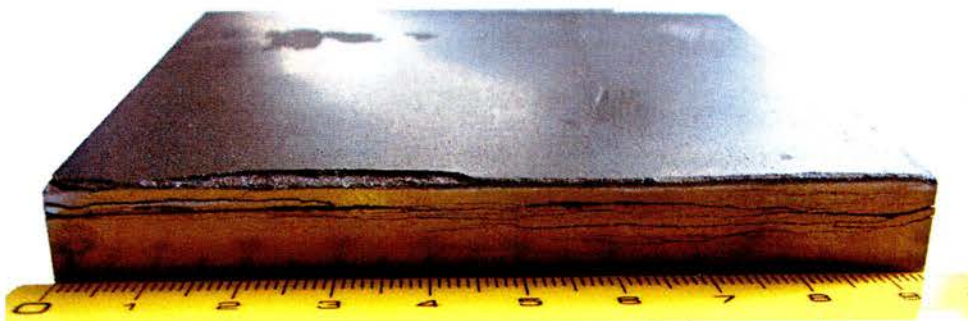


Figura 34 – Defeito típico nas placas obtidas pelo molde de compactação.

Os defeitos encontrados estão directamente relacionados com a força utilizada para a compactação, já que as forças que unem os pós (em verde) são obtidas pela

compactação; logo baixas forças de compactações implicam baixas propriedades mecânicas em verde.

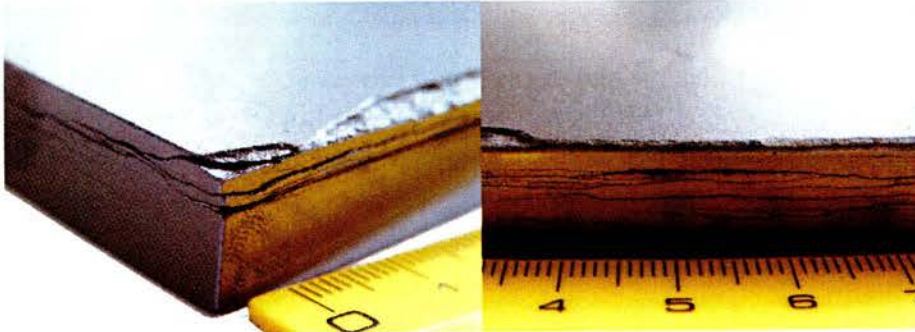


Figura 35 – Pormenores do defeito recorrente, estratificação.

A utilização de uma velocidade de extracção constante, assim como um tempo de estágio – em que a placa relaxava algumas tensões induzidas dentro do molde – permitiram a obtenção de placas isentas ou com defeitos pouco visíveis.



Figura 36 – Placa de grafite e 38% de cobre compactada com 80 ton e com ausência de defeitos visíveis

O aumento da força de compressão faz com que se obtenham placas com melhores propriedades mecânicas (suportam ser manuseadas) e diminui a porosidade das mesmas (aumentando a condutividade eléctrica).

2.2.3.2.Placas obtidas

As placas foram compactadas com uma força de 80 ton que se manteve ao longo de 4 a 7s (o comando numérico da prensa não permitia um controlo eficiente no que toca a temporizações).

A porosidade tem de ser mantida no mínimo para que a condutividade eléctrica seja alta [23].

Tabela 9 – Valores obtidos para as placas de grafite compactadas no INEGI.

N.º Placa	% Cobre	Misturados Previamente	Força (ton)	Peso (g)	Volume Inicial (mm³)	Volume Final (mm³)	Taxa de compressão	Densidade Aparente (g/cm³)
1	38	Não	80	509,91	2573539	153425	17:1	3,3
2	38	Sim	80	371,95	2568608	126350	20:1	2,9
3	20	Sim	80	320,47	2573539	126350	20:1	2,5

A percentagem de cobre a utilizada nas primeiras duas placas foi o mesmo que a SGL Carbon utilizou nas placas fornecidas. A terceira placa foi executada com menor percentagem de cobre para que se pudesse constatar a influência do cobre no processo de compressão. Depois de comparados os valores obtidos pelo material fabricado durante este projecto e os já obtidos com as placas da SGL era possível tirar algumas conclusões (influência da percentagem de cobre, tipo de grafite, método de compactação, temperaturas e tempos de sinterização, etc.).

2.2.3.2.1. Placa n.º1

Nesta série, a placa foi compactada com uma força de 80 ton e sem a mistura prévia dos componentes (grafite e cobre). Esta série tinha 38% do peso da grafite em cobre.

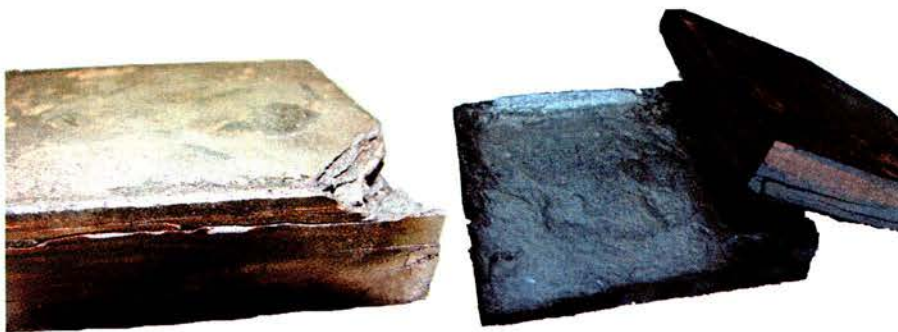


Figura 37 – Placa compactada com 80 ton e sem a mistura dos componentes

Na figura anterior consegue-se distinguir perfeitamente os estratos correspondentes aos materiais utilizados, o que já seria de esperar devido à imiscibilidade dos mesmos constituintes.



Figura 38 – Pormenor do defeito no canto da placa

O defeito correspondente à falta de material no canto da placa deve-se há concentração de tensões existentes num ângulo recto, o que seria evitável se à posteriori os cantos da matriz fossem arredondados. Nesta série não foi aplicada uma velocidade de extracção constante, facto este que se demonstrou preponderante na obtenção de placas com defeitos.

Esta série não seria capaz, além de inviável, de ser sinterizada, já que a zona correspondente ao cobre seria dissolvida na matriz de grafite e o espaço correspondente

a essa zona transformado num oco, penalizando as características mecânicas e físicas (condutividade eléctrica).

2.2.3.2.2. Placa n.º2

Nesta série os componentes foram previamente misturados (numa razão de 38% de cobre), a qual permitiu obter um material mais homogéneo. Esta distribuição mais homogénea dos componentes permitiu obter características mecânicas, também, mais homogéneas. As propriedades mecânicas mais homogéneas das placas não impediram porém a separação de camadas (figura 39).



Figura 39 – Placa obtida na segunda série, 38% de cobre, com estratificação de camadas visível

A presença de defeitos, nomeadamente a separação de camadas (Figura 39) foi devido à utilização de velocidades de extracção inconstantes.

2.2.3.2.3. Placa n.º3

A terceira e última série produzida foi aquela que teve melhor marcas. Nesta série obtiveram-se total ausência de defeitos superficiais, boa distribuição do cobre (20% de cobre) e capacidade de ser manuseada (boa resistência a verde).

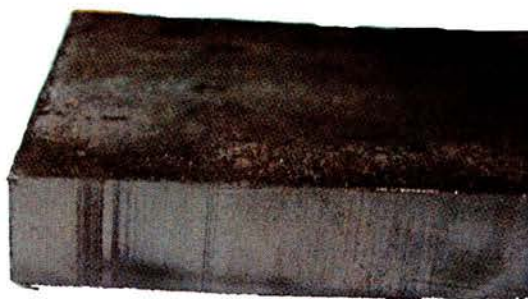


Figura 40 – Placa de grafite com 20% de cobre executada na 3ª série de ensaios

Nesta série foram tomadas todos os procedimentos para a eliminação de defeitos:

- Mistura prévia dos elementos (grafite e cobre) na proporção adequada,
- Estágio da placa no interior do molde (eliminação de tensões residuais),
- Utilização de velocidades de extracção constante.

Esta placa contém menos 18% de cobre do que as anteriores, este facto poderá ter alguma influência na ausência de defeitos visíveis, já que o cobre é um elemento estranho e tem uma dureza diferente da grafite, o que faz com que os dois elementos não se adaptem da melhor forma com a força que estava a ser aplicada pela prensa. Esta hipótese não foi testada devido à falta de tempo.

3. Método de elementos finitos

No decorrer deste projecto estive envolvido com o Prof. José Duarte Marafona no desenvolvimento de um modelo que representasse o processo de remoção de material pelo processo de maquinação não convencional como é a electroerosão por penetração e fio.

Para tal foi utilizado o programa de elementos de métodos finitos com a denominação de ABAQUS®.

Foi desenvolvido um modelo térmico, o qual definia que o material de ambos os eléctrodos era removido devido à temperatura de evaporação.

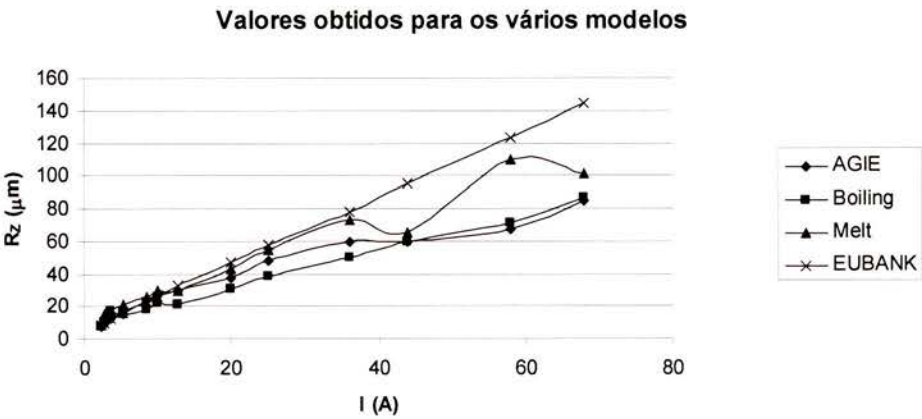


Figura 41 – Comparação para 4 modelos (3 teóricos e 1 prático)

Como se pode constatar do gráfico anterior os valores obtidos para o modelo em causa estão próximos dos valores experimentais obtidos pela AGIES SIT. Este modelo¹ irá ser por mim defendido aquando da conferência internacional M2D2006 a decorrer na FEUP nos dias 24-26 de Julho.

¹ Ver Anexo

Devido à exigência dos autores para que este processo de previsão seja o mais correcto possível, isto é, que represente o processo de remoção do material o mais real possível, está em curso a elaboração de um outro modelo, desta feita com o processo de remoção caracterizado como sendo termo-deslocamento.

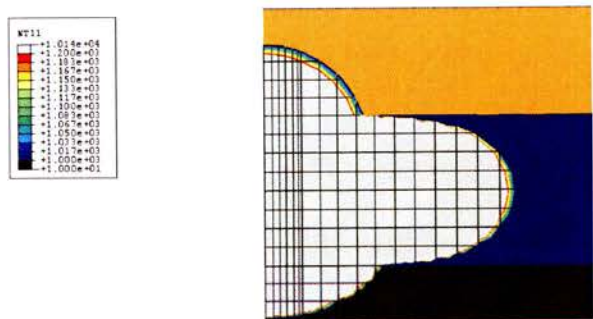


Figura 42 – Desenvolvimento do campo de temperaturas (de cima para baixo, cobre, dieléctrico e aço)

No seguimento da elaboração do modelo fui-me familiarizando no programa de cálculo (ABAQUS®), para o qual desenvolvi um script¹ – em Python® – para que fosse possível uma utilização célere e eficiente no pré-processamento. No momento da leitura deste documento está a ser desenvolvido um outro script para o pós-processamento.

¹ Ver Anexo

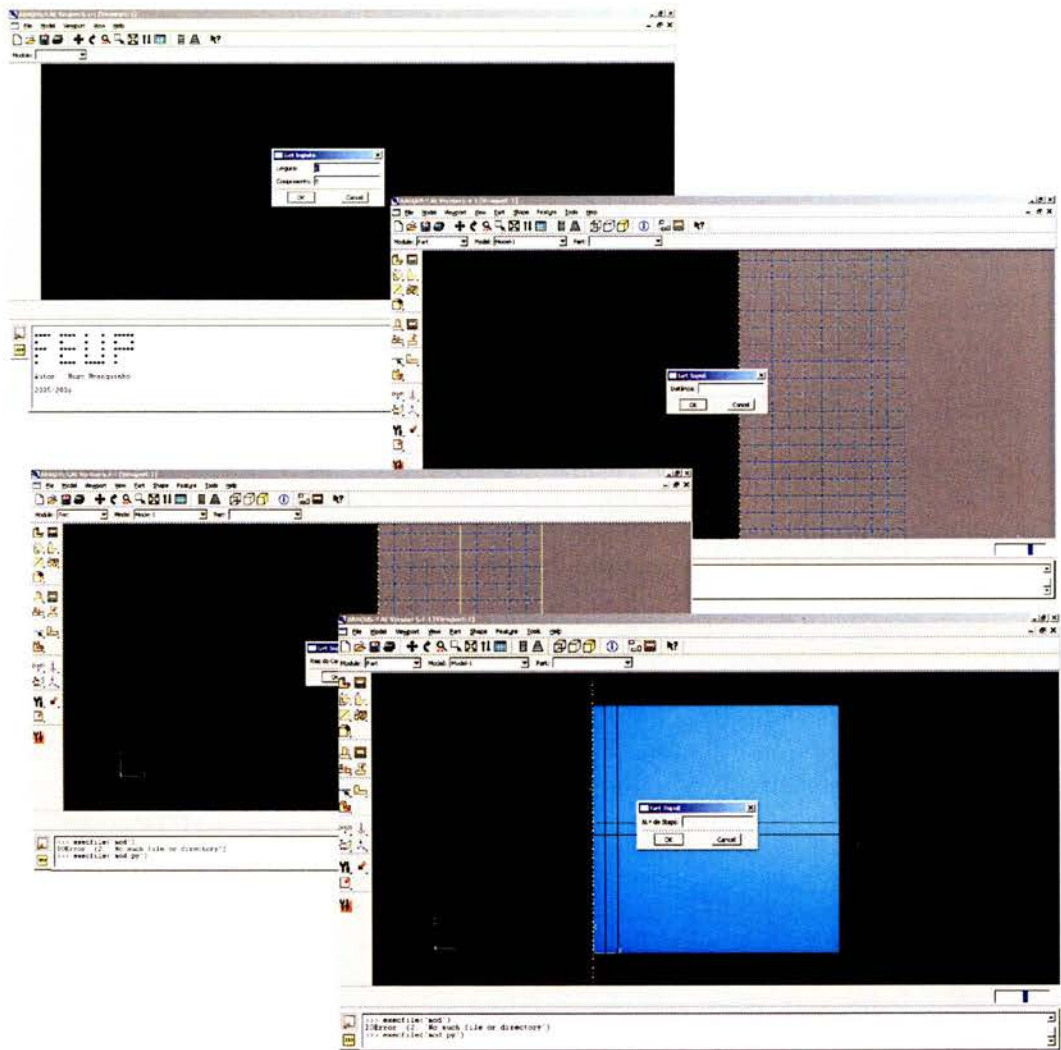


Figura 43 – Screen shoots do ABAQUS ®

4. Referências

- [1] Cropper MAJ, Geiger S, Jolie DM. J Power Sources 2004; 131:57–61.
- [2] Scott DS. Int J Hydrogen Energy 2004;29:1439–42.
- [3] Gottesfeld S, Zawodzinski T. Adv Electrochem Sci Eng 1997;5:195–301.
- [4] Steele BCH, Heinzel A. Nature 2001;414:345.
- [5] Borup RL, Vanderborgh NE. Mater Res Soc Symp Proc 1995;393:151–5.
- [6] Tsuchiya H, Kobayashi O. Int J Hydrogen Energy 2004;29:985–90.
- [7] Mehta V, Cooper JS. J Power Sources 2003;114:32–53.
- [8] K. Kordesch and G. Simader, Fuel cells and their applications, VCH Publishers, (1996).
- [9] J. Larminie, Fuel cells, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc., (2002).
- [10] Makkus RC, Janssen AHH, de Bruijn FA, Mallant RKAM. Fuel Cell Bull 2000;3:5.
- [11] Imran Sabir and Xianguo Li, Bipolar Plates of PEMFC – Review of Flow Fields (Channels) Design, Department of Mechanical Engineering University of Waterloo
- [12] Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Hydrogen Properties
- [13] Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Hydrogen Production
- [14] <http://www.minihydrogen.com>
- [15] Boothroyd, Geoffrey, Fundamentals of Machining and Machine tools;491-492
- [16] Guitrau, E. Bud, The EDM Handbook
- [17] Cooper JS. J Power Sci 2004;129:152–69.
- [18] Moreira J, Ocampo AL, Sebastián PJ, Smit MA, Salazar MD, del Angel P, Montoya JA, Perez R, Martinez L. Int J Hydrogen Energy 2003;28:625–7
- [19] Moreira J, Ocampo AL, Sebastián PJ, Smit MA, Salazar MD, del Angel P, Montoya JA, Perez R, Martinez L. Int J Hydrogen Energy 2003;28:625–7
- [20] <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/>
- [21] Michel A. Boucher, Natural Resources Canada, 1994
- [22] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cobre>
- [23] F. F. O. Orumwense, B. A. Okorie, E. O. Okeakpu, E. N. Obiora, and L. I. Onyeji, Sintered copper–graphite powder compacts for industrial applications, Powder Metallurgy 2001 Vol. 44 No. 1

Anexo A – Características do material da placa bipolar

Spezialgraphit / Specialty Graphite

Marke / Grade R 8710 Cu

Specialty Graphites from SGL CARBON

Werkstoff / material: Kupfer-imprägnierter Graphit / copper impregnated graphite
Formgebung / forming: isostatisch gepreßt / isostatically pressed
Einsatz / application: Funkenerosion / EDM finishing

Typische Werte / typical data

Eigenschaft / property	Methode / test standard	Wert / value	Einheit / unit
mittlere Korngröße / average grain size		3 / .0001	µm / inch
Dichte / bulk density	DIN IEC 60413 / 203	2.90 / 181	g/cm³ / lb/ft³
Rockwell-Härte / Rockwell hardness HR _{5/100}	DIN IEC 60413 / 303	110	
spezif. elektr. Widerstand / specific electrical resistivity	DIN IEC 60413 / 402	3 / 1.2 · 10 ⁻⁴	µΩm / Ωinch
Biegefestigkeit / flexural strength	DIN IEC 60413 / 501	110 / 15950	N/mm² / psi
Druckfestigkeit / compressive strength	DIN 51910	220 / 31900	N/mm² / psi
Elastizitätsmodul / Young's modulus	DIN 51915	21000 / 3.0 · 10 ⁶	N/mm² / psi
Wärmedehnung (20-200°C) / therm. expansion (68-392°F)	DIN 51909	7.5 · 10 ⁻⁶	K ⁻¹ / °C ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit / thermal conductivity	DIN 51908	125 72	Wm ⁻¹ K ⁻¹ Btu/(ft·hr·°F)
Kupferimprägnierung / copper impregnation		38	Gew.% / wt %

Diese Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und sollen über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten informieren. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern.
This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should not therefore be construed as guaranteeing specific properties of the products described or their suitability for a particular application.

Datenblatt R 8710 Cu USA/01.01.01/D/E Printed in Germany



SGL CARBON GROUP

Specialty Graphite Europe
Business Unit

SGL CARBON GmbH
Werk Ringsdorf

Drachenburgstraße 1
D-53170 Bonn
Phone +49 (228) 841-0
Fax +49 (228) 841-523
www.sglcarbon.com

Anexo B – Desenhos de Construção do Molde

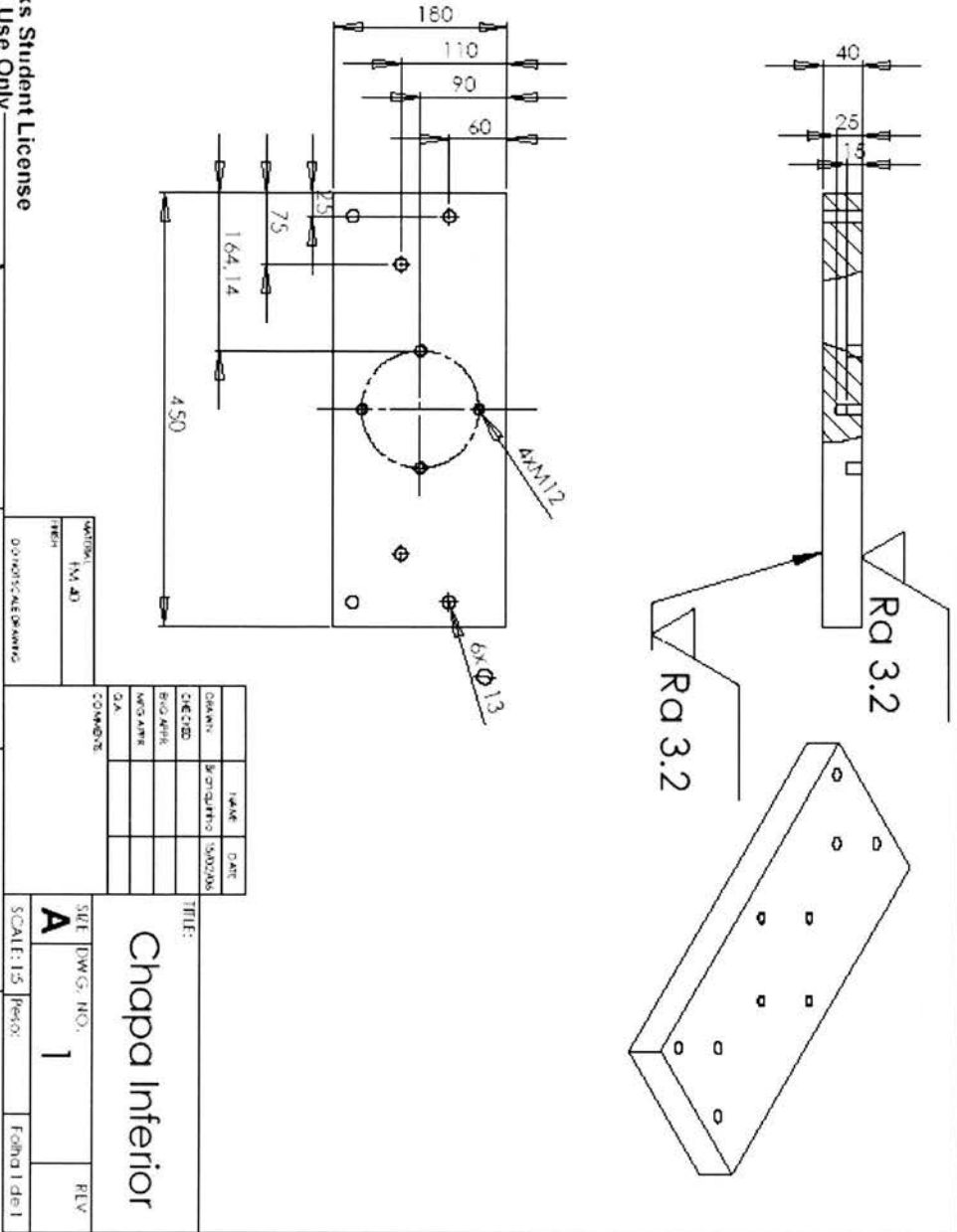
5

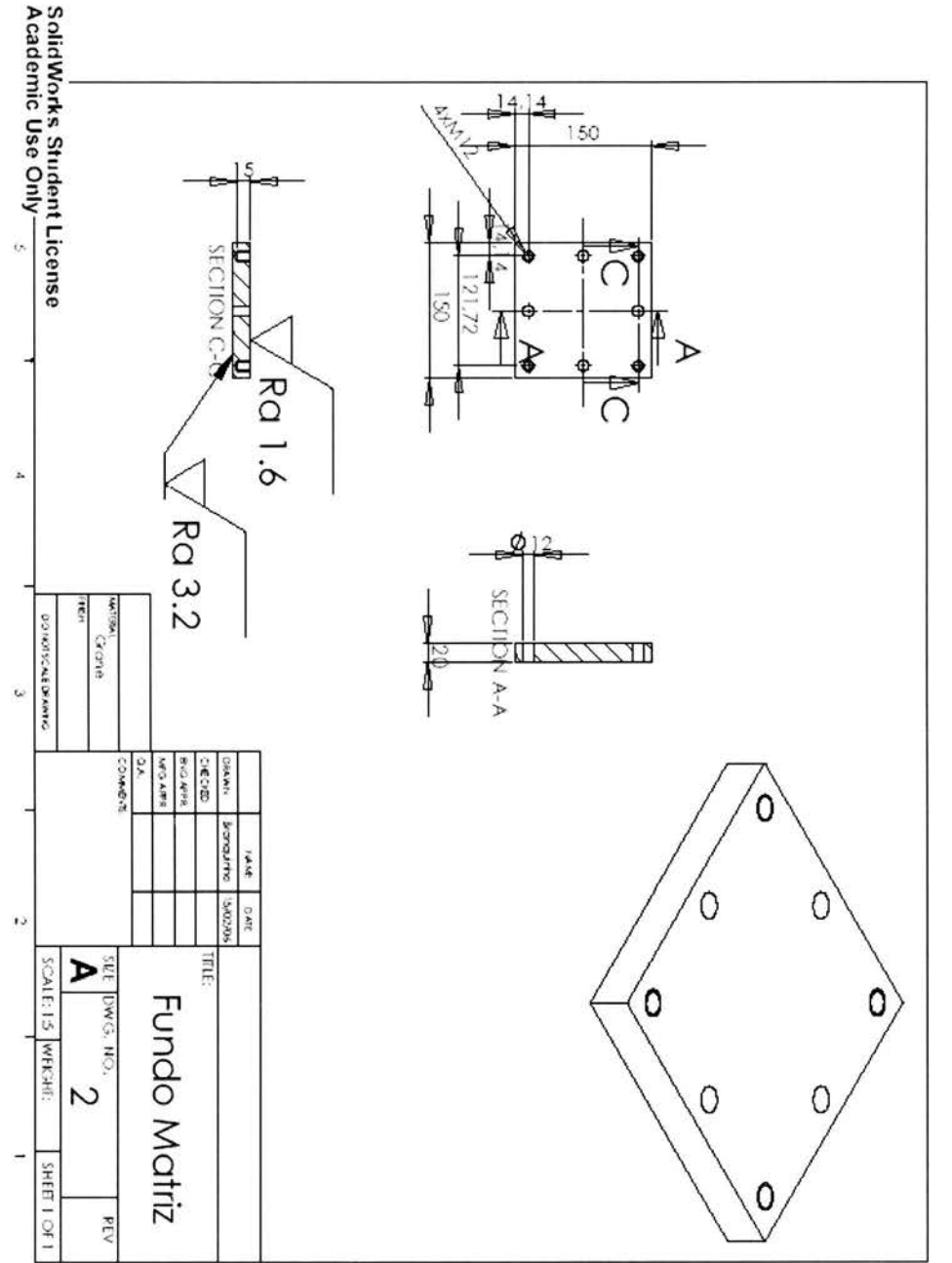
4

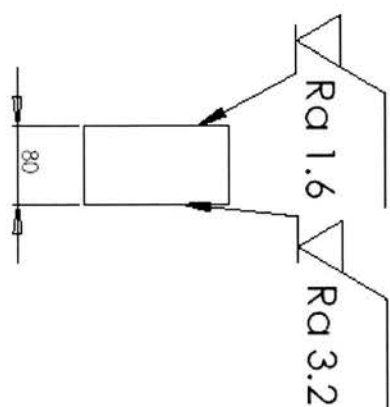
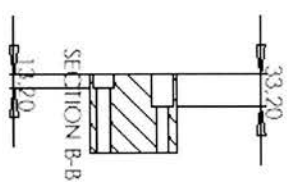
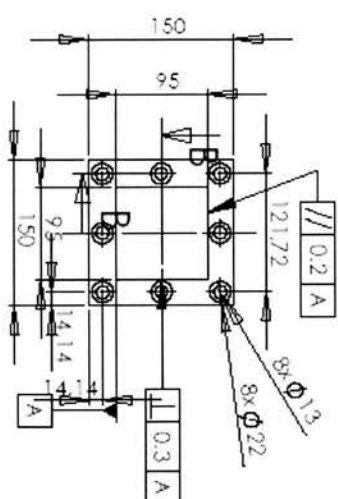
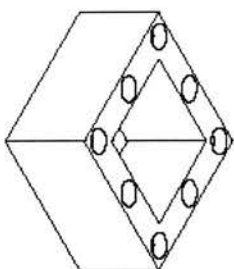
3

2

1

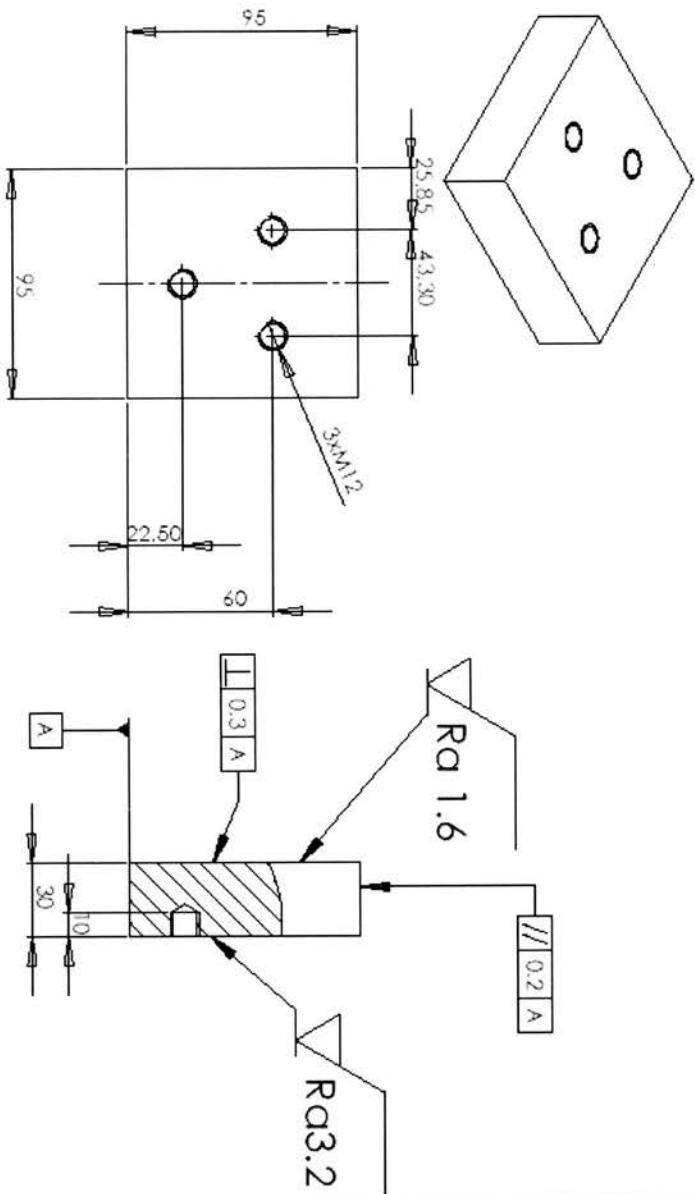




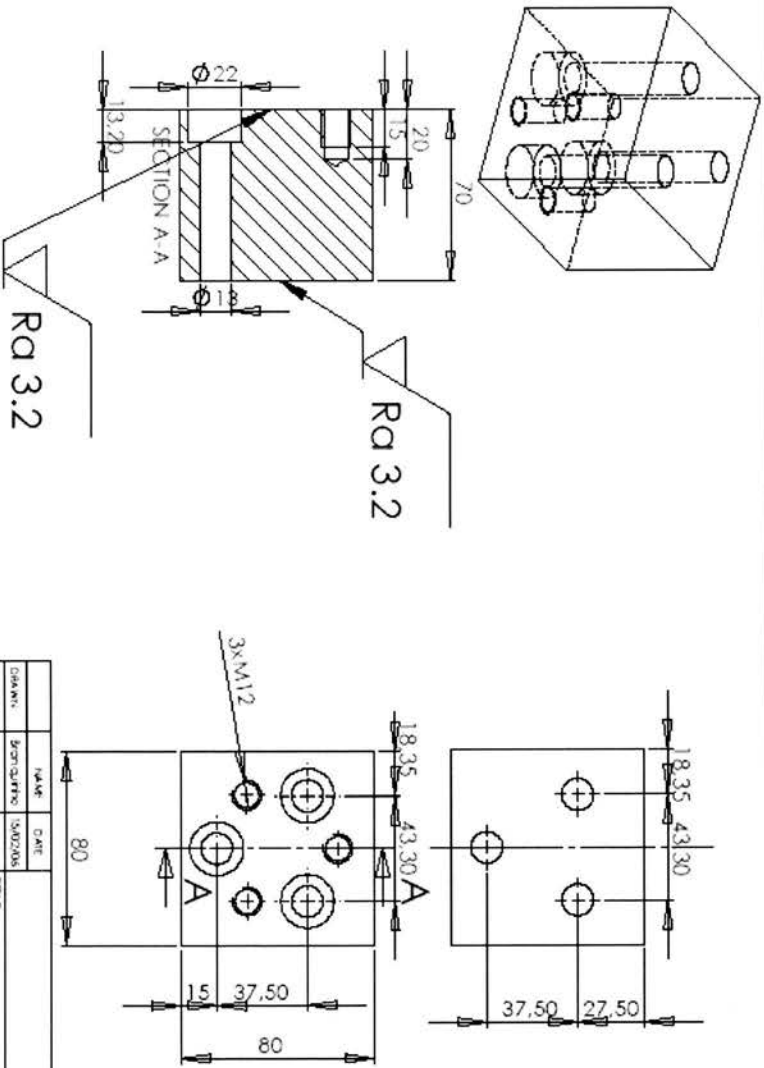


DRAWING		DATE
PROJECT		
BY		
CHECKED		
DATE		
SCALE		
SHEET		
TITLE		
Matriz		
REV	DWG. NO.	SCALE
	3	1:5
SHEET 1 OF 1		

SolidWorks Student License
Academic Use Only

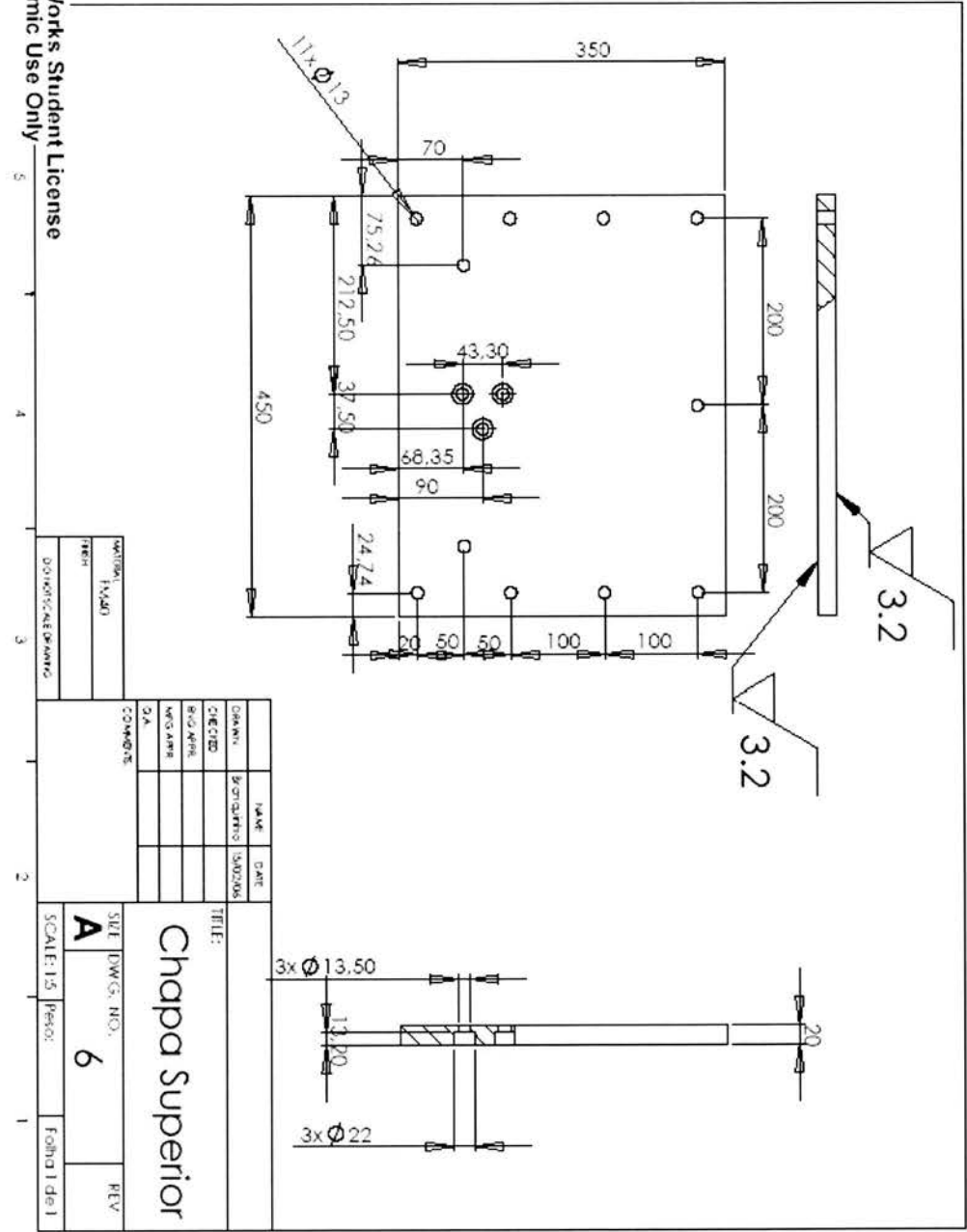


DESIGNER	NAME	DATE
TECHNICAL	BRUNO	2020/08
DO NOT SCALE DRAWING	CHECKED	
	REVISOR	
	APPROVER	
	DATE	
	COMMENTS	
TITLE:		
Punção		
SHEET	DWG. NO.	REV
A	4	
SCALE: 1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1



DRAWN		NAME	DATE
DRAWN		BORGUET	04/02/2018
CHECKED			
REVISOR			
REVISOR			
DATE			
COMMENTS			
TITLE:			
Suporte Punção			
SHEET DWG. NO.		REV	
A 5			
SCALE: 1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	

SolidWorks Student License
Academic Use Only





Anexo C – Script desenvolvido para o ABAQUS®

```

from abaqus import *
from abaqusConstants import *
import step
import part
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import sketch
import section
import interaction
import assembly
import material

#Desenhar o Rectangulo
#Pedir Coordenadas do segundo ponto
w,h=getInputs(('Largura:', '0'), ('Comprimento:', '0'))
s = mdb.models['Model-1'].Sketch(name='__profile__', sheetSize=200.0)
s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s.ObliqueConstructionLine(point1=(0.0, -float(h)), point2=(0.0, float(h)))
s.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(float(w), float(h)))
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Part-1',
                               dimensionality=AXISYMMETRIC, type=DEFORMABLE_BODY)
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].BaseShell(sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'])
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
#Desenhar as linhas do canal
p1 = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
f = p1.faces
t = p1.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(0.0,
float(h)/2, 0.0))
s = mdb.models['Model-1'].Sketch(name='__profile__', sheetSize=200.0, transform=t)
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p1 = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
p1.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
r, r1 = s.referenceGeometry, s.referenceVertices
x=float(getInput('Distância:'))
s.Line(point1=(float(x), -float(h)/2), point2=(float(x), float(h)/2))
while x!=0 :
    x=float(getInput('Raio do Canal:'))
    s.Line(point1=(float(x), -float(h)/2), point2=(float(x), float(h)/2))

y=float(getInput('Altura do Canal:'))
s.Line(point1=(0, -y/2), point2=(float(w), -y/2))
s.Line(point1=(0, y/2), point2=(float(w), y/2))
p1 = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
f = p1.faces
faces =(f[0], )
p1.PartitionFaceBySketch(faces=faces, sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']

#Assembly da Part
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.DatumCsysByThreePoints(coordSysType=CYLINDRICAL, origin=(0.0, 0.0, 0.0),
point1=(1.0, 0.0, 0.0), point2=(0.0, 0.0, -1.0))
p = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']

```

```

a.Instance(name='Part-1-1', part=p)

#Steps
i=int(getInput('N.º de Steps:'))
i=i+1
for j in range(1,i):
    if j==1:
        namep="Initial"
        name="Step-%d" %j
        stName=getInput('NomeStep:',name)
        st,st1,st2=getInputs(((('Dur.Step:', '1e-6'), ('Inclnit:', '1e-9'), ('V.Temp:', '75000'))))
        mdb.models['Model-1'].CoupledTempDisplacementStep(name=stName,
            previous =namep, timePeriod=float(st), initialInc=float(st1),
            minInc=float(st)*1e-5, maxInc=float(st), deltmx=float(st2))
        session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step=name)
    else:
        namep=name
        name="Step-%d" %j
        stName=getInput('NomeStep:',name)
        st,st1,st2=getInputs(((('Dur.Step:', st), ('Inclnit:', st1), ('V.Temp:', st2))))
        mdb.models['Model-1'].CoupledTempDisplacementStep(name=stName,
            previous =namep, timePeriod=float(st), initialInc=float(st1),
            minInc=float(st)*1e-5, maxInc=float(st), deltmx=float(st2))
        session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step=name)

#Define o material
mat=0
mat=int(getInput("Numero de Materiais:"))
for index in range(0,mat,1):

    n=int(getInput("""Materiais
    1) Aço
    2) Cobre
    3) Plasma
    4) Outro
    0) Sair
    """))
    if n==1:
        mdb.models['Model-1'].Material(name='Aço')
        mdb.models['Model-1'].materials['Aço'].Density(table=((7.87e-15, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials['Aço'].Elastic(table=((0.21, 0.29), ))
        mdb.models['Model-1'].materials['Aço'].Conductivity(table=((5.61e-5, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials['Aço'].Expansion(table=((1.78e-6, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials['Aço'].SpecificHeat(table=((812, ), ))
        mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name='Aço', material='Aço',
            thickness=1.0)
        index+=1
    elif n==2:
        mat='Cobre'
        mdb.models['Model-1'].Material(name=mat)
        mdb.models['Model-1'].materials[mat].Density(table=((7.87e-15, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials[mat].Elastic(table=((0.21, 0.29), ))
        mdb.models['Model-1'].materials[mat].Conductivity(temperatureDependency=OFF,
            table=((5.61e-5, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials[mat].Expansion(temperatureDependency=OFF,
            table=((1.78e-6, ), ))
        mdb.models['Model-1'].materials[mat].SpecificHeat(temperatureDependency=OFF,
            table=((812, ), ))
        mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name=mat, material=mat,
            thickness=1.0)

```

```

    index+=1
elif n==3:
    mat='Plasma'
    mdb.models['Model-1'].Material(name=mat)
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Density(table=((7.87e-15, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Elastic(table=((0.21, 0.29), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Conductivity(temperatureDependency=OFF,
        table=((5.61e-5, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Expansion(temperatureDependency=OFF,
        table=((1.78e-6, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].SpecificHeat(temperatureDependency=OFF,
        table=((812, ), ))
    mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name=mat, material=mat,
        thickness=1.0)
    index+=1
else:
    mat=getInput('Nome do Material:', 'Material')
    mdb.models['Model-1'].Material(name=mat)
    den,young,poisson,cond,exp,sH=float(getInputs((((('Desnsidade:'),('Módulo de
        Young:'),('Poisson:'),
        ('Condutividade:'),('Expansão:'),('Calor
        Especifico:'))))))))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Density(table=((den, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Elastic(table=((young, poisson), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Conductivity(temperatureDependency=OFF,
        table=((cond, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].Expansion(temperatureDependency=OFF,
        table=((exp, ), ))
    mdb.models['Model-1'].materials[mat].SpecificHeat(temperatureDependency=OFF,
        table=((sH, ), ))
    mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name=mat, material=mat,
        thickness=1.0)
    index+=1

```

Anexo D – Programa CNC da prensa

Programa Placa Bipolar

PEÇA:	958	N:	1			
FASE	1	:	SO EMB. GV			
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --
EMB						
CCH	4	900,00			25%	
ALM						
Q PEÇAS :	1250			309		PRODUÇÃO
PEÇAS/MN:	10			1,6		9.8 H
TEMPORIZAÇÃO			s			
PMS		EJEC	ABCD	PEMB	PCCH	PALM
3				10		

PEÇA:	958	N:	2			
FASE	1	:	SO EMB. GV			
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --
EMB						
CCH	4	875,00			5%	
ALM						
Q PEÇAS :	1250			309		PRODUÇÃO
PEÇAS/MN:	10			1,6		9.8 H
TEMPORIZAÇÃO			s			
PMS		EJEC	ABCD	PEMB	PCCH	PALM
				10		

PEÇA	958	N	3				
FASE	16		: EMB/C.C. FD				
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --	
EMB							
CCH	4	850,00			30%		
ALM							
Q PEÇAS :	1250			309		PRODUÇÃO	
PEÇAS/MN:	10			1,6		9.8 H	
TEMPORIZAÇÃO			s				
PMS	EJEC	ABCD		PEMB	PCCH	PALM	
				50			

PEÇA	958	N	4				
FASE	4		: DESCOMPRE.				
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --	
EMB							
CCH	4	820,00					
ALM							
Q PEÇAS :	1250			309		PRODUÇÃO	
PEÇAS/MN:	10			1,6		9.8 H	
TEMPORIZAÇÃO			6 s				
PMS	EJEC	ABCD		PEMB	PCCH	PALM	
				10			

PEÇA	958	N	5				
FASE	3		: SO EMB.SUB				
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --	
EMB							
CCH	4	788,00			30%		
ALM							
Q PEÇAS :		1250		309		PRODUÇÃO	
PEÇAS/MN:		10		1,6		9.8 H	
TEMPORIZAÇÃO			S				
PMS		EJEC	ABCD		PEMB 10	PCCH	PALM

PEÇA	958	N	6				
FASE	20		: REPOUSO				
		-- MEM --		-- POS --	-- VEL --	-- COR --	
EMB							
CCH	4	722,00			30%		
ALM							
Q PEÇAS :		1250		309		PRODUÇÃO	
PEÇAS/MN:		10		1,6		9.8 H	
TEMPORIZAÇÃO			S				
PMS		EJEC	ABCD		PEMB 10	PCCH	PALM

**Anexo E – Modelo desenvolvido para a
conferência internacional
M2D2006**

A thermal integrated model for EDM based on the Joule effect

J. Marafona*, H. Branquinho
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
E-mail*: jdmr@fe.up.pt

Abstract

In this paper, a thermal integrated model was developed for sparks generated by electric discharges in a liquid media. This thermal model is based on the previous thermal-electrical model of Marafona and Chousal (2006), which considered the Joule effect as the driving motor of EDM phenomenon. The present thermal model uses as thermal source the thermal energy due to the full conversion of the electrical energy by the Joule effect. The dielectric has thermal properties that are temperature dependent and thus the plasma channel grows with time. Albiński et al. (1985) in his work demonstrate that the temperature is around 8000 °C and 10000 °C in the plasma channel. The material removed from both electrodes is due to superheating, i. e., the temperature is above the melting temperature. Based on these assumptions was developed a thermal model, which shows results with a significant degree of agreement with previous literature.

Introduction

Electrical discharge machining (EDM) is a manufacturing process by which a tool cuts the required shape into the work piece within a dielectric fluid. The main cause for material removal from both of the electrodes in EDM process is the temperature reached by the surface of both electrodes. DiBitonto et al. (1989) and Van Dijck (1973) suggested that the cause for material removal from both electrodes is due to the superheating. On the one hand, DiBitonto et al. (1989) encloses quasi all the melted material in the volume of material removed from both electrodes. On the other hand, Van Dijck (1973) estimates that only 1% to 10% of the melted material is removed from both electrodes. This indicates that the material is removed due to evaporation.

Previous literature (Eubank et al., 1993) states that the plasma channel has a non-cylindrical shape. However, various authors such are Marafona and Chousal (2006) and Eubank et al. (1993) use a cylindrical plasma channel in order to be possible implement their models. The present work shows that the plasma channel has a non-cylindrical shape which radius changes during pulse duration. Moreover, the plasma channel has a barrel shape as suggested by Eubank et al. (1993).

The maximum removed material from both electrodes cannot occur simultaneously at the end of the pulse duration. Thus, Patel et al. (1989) suggested that the material removed from the copper anode could occur in the beginning of the pulse duration due to evaporation. Utsumi (1971) measured the cathode hot spot temperature in arcs in vacuum and found it to be nearly equal to the boiling point of the electrode metal.

Therefore, the aim of this paper is to contribute with a new knowledge about electrical discharge phenomenon in EDM, nevertheless, the high complexity of the phenomenon. This

new knowledge is used to quantify the wear of both electrodes, the temperature behaviour during the pulse duration and predict the optimum pulse duration. All this theoretical predictions are compared with experimental data from AGIE SIT.

Mathematical modelling

The Finite Element Analysis (FEA) has been done using the ABAQUS Code.

The plasma channel is composed of a discharge channel which is a cylindrical vaporised channel formed into the dielectric. The main function of this is providing the thermal energy through the partial conversion of the electrical energy by the Joule effect. The discharge channel has its radius growing with pulse duration, imposed by the changing of the dielectric thermal properties during the pulse duration. The conversion of electrical energy into thermal energy leads to a dielectric vaporisation and formation of the barrel shape plasma channel.

The radius of the plasma channel used in the present model follows the equation (1) shown by Ikai and Hashiguchi (1995) and already used by Marafona and Chousal (2006).

$$R=2.04E-03*I^{0.43}*t^{0.44} \quad (1)$$

The R represents the equivalent radius, where I is the current intensity passing through the discharge channel and t illustrates the pulse duration.

The power source is considered to be due to the Joule heating effect, which convert all electrical energy into thermal energy. The cylindrical discharge channel radius varies with equation (2) and was used to calculate the power per volume unity. This procedure was done because the present authors based their choice on underwater explosions wires experiments carried out by Robinson and co-workers (1967, 1973, and 1976).

$$R(t) = 0.788*t^{0.75} \quad (2)$$

The present authors use a factor of conversion to pass all the electric energy dissipated into the discharge channel to the plasma channel. The factor of conversion between the discharge channel and the plasma channel is its radius ratio.

The power source used in the present work is a Gaussian heat flux distribution. This heat flux distribution is computed using equation (3), which gives the power per volume unity.

$$\text{Power} = (I*E)/(\pi*R(t)^2*G) \quad (3)$$

Where E is the electrical potential, taken by 22.5 V, R(t) is the discharge channel radius given by equation (2), and G is the Gap width.

Model application and discussion

In order to evaluate the predictions of the EDM performance of this thermal integrated model a current intensity value of 1.8 A was used. The EDM output parameters analysed were Electrode Wear Ratio (EWR), Material Removal Rate (MRR) and maximum surface

roughness in the work piece surface (R_z). Other parameters were also analysed such as the optimum pulse duration, temperature distribution in the plasma channel, steel/plasma channel boundary and copper/plasma channel boundary during pulse duration.

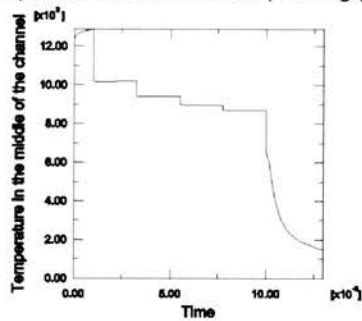


Figure 1 - Temperature trend in the centre of the dielectric gap

Figure 1 show, the abrupt increase of temperature reaching 12500 °C in less than 0.1 μ s and decreasing to 7500 °C at the end of the optimum pulse time.

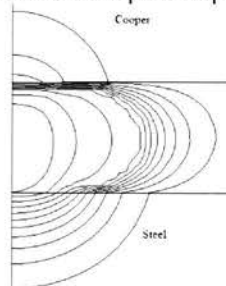


Figure 2 - Temperature distribution in the plasma channel

Figure 2 shows the distribution of the temperature in the plasma channel where it can be observed the barrel shape of the plasma channel at the end of the optimum pulse duration.

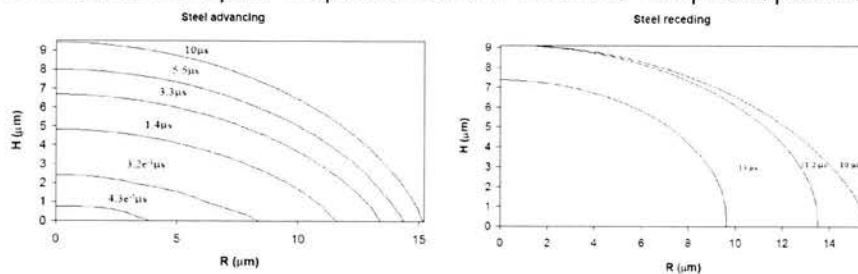


Figure 3 - show the advancing (a) and receding (b) boiling fronts for steel cathode as a function of time.

The beginning of the receding for the steel cathode is synchronized with the optimum pulse duration for the pair of electrodes used and hydrocarbon oil.

The material removal efficiency (MRE) is defined as the ratio between the removed material per pulse and the volume melted per pulse. According to Van Dijck (1973), the material removed from the electrodes is due to superheating, and the amount of melted material removed from the electrodes is, around, 1% to 10% of the total volume melted. These small amounts of melted material removed from the electrodes could mean that its temperature is above the boiling temperature.

The cathode MRE value obtained is about 1.4%, which is near the MRE value of 2% found by Marafona and Chousal (2006) in their work. The same authors present an anode material removal efficiency value of 0.3% which is near the value of 0.53% found by the present work; both the values are in range of the 1% to 10% proposed by Van Dijck (1973).

The work piece presented a maximum surface roughness (R_z) of 12 μm and 9 μm , respectively, for the melt and boiling boundary volumes. Considering that the maximum final surface roughness, obtained in laboratory by AEGIS, was 5 μm indicates that the present work is closest to reality.

Conclusions

From the application of the present thermal integrated model for EDM based on Joule effect, it is possible to conclude that

- (1) There is a strong believe that the material removed from the electrodes in EDM process is to superheating more precisely to evaporation of the electrodes metal.
- (2) The material removed from the electrodes corresponds is in range of the 1% to 10% of the melted volume, which is according to Van Dijck (1973).
- (3) The present work also show the barrel shape of the plasma channel.

This thermal integrated model is a good approach for electrical discharge phenomenon in EDM. The model show results with a high degree of agreement with experimental data and other works mentioned before. However, this model needs to be better study to be used as predicting tool.

References

- Albiński K., Musiol K., Miernikiewicz A., Łabuz S., Malota M., Plasma temperature in electro-discharge machining, Proceedings of International Symposium for Electromachining - ISEM XI, EPFL, Lausanne, Switzerland, April 17-21 (1995) 143-152.
- Cobine J.D. and Burger E.E., Analysis of Electrode Phenomena in the High-Current Arc, Journal of Applied Physics, 26(7) (1955) 895-900.
- DiBitonto D.D., Eubank P.T., Patel M.R., and Barrufet M.A., Theoretical models of the electrical discharge machining process - I: a simple cathode erosion model, Journal of Applied Physics, 66(9) (1989) 4095-4103.
- Eubank P.T., Patel M.R., and Barrufet M.A., Bozkurt B., Theoretical models of the electrical discharge machining process - III: the variable mass, cylindrical plasma model, Journal of Applied Physics, 73(11) (1993) 7900-7909.
- Ikai T., Hashiguchi K., Heat input for crater formation in EDM, Proceedings of International Symposium for Electromachining - ISEM XI, EPFL, Lausanne, Switzerland, April 17-21 (1995) 163-170.

Marafona J. and Chousal J.A.G., A finite element model of EDM based on the Joule effect, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(6) (2006) 595-602.

Patel M.R., and Barrufet M.A., Eubank P.T., DiBitonto D.D., Theoretical models of the electrical discharge machining process - II: the anode erosion model, *Journal of Applied Physics*, 66(9) (1989) 4104-4111.

Utsumi T., Measurements of cathode spot temperature in vacuum arcs, *Applied Physics Letters*, 18 (1971) 218-220.

Van Dijck S., PhD dissertation, Catholic University of Leuven, Belgium, (1973).



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105251