

Artigos

A Matemática no Trânsito

Braço Mecânico Hidráulico para Transporte de Produtos e Operação de Pintura Simultaneamente

Ensaio não Destrutivo Aplicação por Líquido Penetrante

Introdução ao Armazenamento Eletroquímico de Energia: Uma Abordagem Didática

Determination of the Complex Potential Flow Around Two Parallel Airfoils



UNITAU
Universidade de Taubaté

REITOR

Prof. Dr. José Rui Camargo

VICE-REITOR

Prof. Dr. Marcos Roberto Furlan

PRÓ-REITORA DE GRADUAÇÃO

Profa. Dra. Ana Júlia Urias dos Santos

**PRÓ-REITOR DE EXTENSÃO E RELAÇÕES
COMUNITÁRIAS**

Prof. Dr. José Felício Goussain Murade

PRÓ-REITOR DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Edson Aparecida de Araújo Querido Oliveira

PRÓ-REITOR DE ECONOMIA E FINANÇAS

Prof. Dr. Luciano Ricardo Marcondes da Silva

PRÓ-REITOR DE ADMINISTRAÇÃO

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

PRÓ-REITORA ESTUDANTIL

Profa. Dra. Nara Lúcia Perondi Fortes

Revista
Ciências Exatas

EDITORES

Evandro Luis Nohara
Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
Valesca Alves Correa

ASSISTENTE EDITORIAL

Francisco José Grandinetti

COMISSÃO EDITORIAL

Antonio Faria Neto – UNITAU
Carlos Alberto Chaves - UNITAU
Ederaldo Godoy Júnior – UNITAU
Eliane da Silveira R. de Araújo - UNITAU
Francisco José Grandinetti - UNITAU
Francisco Antonio Lotufo - UNESP
Gilberto Walter Arenas Miranda - UNITAU
João Sinohara da Silva Sousa - IFSP
José Luz Silveira - UNESP
Luiz Carlos Góes - ITA
Luiz Octávio Mattos dos Reis – UNITAU
Victor Orlando Gamarra Rosado - UNESP
Viktor Pastoukhov – UNITAU
Wilton Ney do Amaral – UNITAU

EDITORIAÇÃO ELETRÔNICA

Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
Valesca Alves Correa

PROJETO GRÁFICO DA CAPA

Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes

REVISÃO

Joel Abdala



UNITAU
Universidade de Taubaté

A Revista Ciências Exatas se destina à publicação e divulgação de trabalhos originais que contribuam para a compreensão das principais disciplinas que sustentam a engenharia e ciências.

Os artigos publicados nesta Revista são de inteira responsabilidade de seus autores. É proibida a reprodução total ou parcial dos artigos sem a prévia autorização dos autores.

Núcleo Editorial da Revista

<http://periodicos.unitau.br>

Evandro Luis Nohara
Tel.: (12) 3622-4005

Rua Daniel Danelli, s/n – Jd. Morumbi
Taubaté – SP – CEP 12060-440

Revista Ciências Exatas - Universidade de Taubaté - Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação. v.19, n.2, II Semestre, Taubaté, SP: UNITAU, PRPPG, 2013.

Semestral

ISSN 1516-2893

1.Mecânica - 2.Elétrica - 3.Eletrônica -
4.Informática - 5.Computação - 6.Mate-
mática - 7.Física - 8.Telecomunicações

CDD - 531 - 537.1 - 537.5 - 001.6 - 510 -
530 - 621.38

Sumário

A MATEMÁTICA NO TRÂNSITO <i>Fabiano Bazílio dos Santos, Emerson Luis Junqueira Silva, Ana Clara da Mota</i>	7
BRAÇO MECÂNICO HIDRÁULICO PARA TRANSPORTE DE PRODUTOS E OPERAÇÃO DE PINTURA SIMULTANEAMENTE <i>Jorge Bertoldo Junior Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto, Adilho Teixeira de Souza, Guilherme Apoena Silva Vieira</i>	16
ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICAÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE <i>Vinícius Reis Leite</i>	27
INTRODUÇÃO AO ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA <i>Antonio Faria Neto, Francisco Antonio Lotufo, Leonardo Mesquita, Antonio de Pádua da Cunha Coelho</i>	36
DETERMINATION OF THE COMPLEX POTENTIAL FLOW AROUND TWO PARALLEL AIRFOILS <i>Jan Mateu Armengol, Carlos Salinas Sedano</i>	47

EDITORIAL

A Revista Ciências Exatas compreende o somatório de esforços coletivos de pesquisadores que atuam na área de Ciências Exatas aplicadas e educação, especialmente nos cursos de Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção Mecânica e Engenharia Aeronáutica.

É um projeto concebido para construir um vínculo de caráter científico de estudos e pesquisas e referendar mais precisamente a missão da Instituição. Trata-se de mais um entre os inúmeros desafios que a Universidade de Taubaté tem para com a sociedade.

No entanto, acreditamos que, com tal publicação, além da formação sólida, séria e atualizada calcada na teoria e na prática, estejamos também oferecendo aos alunos e professores importante estímulo à pesquisa, parte integrante de qualquer projeto que almeje um ensino de qualidade.

De caráter semestral o foco da Revista Ciências Exatas centra-se no fato de que os resultados obtidos sejam relevantes para a comunidade em geral, ao mesmo tempo em que forma seus alunos com um diferencial científico.

Evandro Luis Nohara

Editor

Fabiano Bazílio dos Santos

Universidade de Taubaté-UNITAU
biano71@hotmail.com

**Emerson Luís Junqueira
Silva**

Universidade de Taubaté-UNITAU

Ana Clara da Mota

Universidade de Taubaté-UNITAU

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

RESUMO

O propósito deste trabalho é mostrar uma entre as diversas aplicações do uso da matemática no cotidiano. Dessa forma, usa-se o trânsito como uma maneira prática de contextualizar as situações. A interdisciplinaridade é utilizada dentro do contexto, pois a cidadania e o ponto de vista físico, de maneira básica, são trabalhados juntamente com a matemática. Sendo o trânsito algo que faz parte da vida de todos, já que todos são no mínimo pedestres, existem diversos modos de associar a matemática a situações de trânsito. A apresentação de questões desse tipo se torna um desafio para quem conduz a aula, devido ao dinamismo das ideias e a forma com que o trabalho deve ser conduzido. É importante ressaltar que os trabalhos que envolvem a modelagem de problemas tornam o professor como um mediador entre o aluno e o conhecimento. Para o aluno existe o desafio em enxergar a associação do contexto com o assunto dentro da matemática. O trabalho de questões que envolvem a modelagem faz o aluno trabalhar mais o raciocínio e torna mais atrativa a pesquisa, devido ao contexto que sempre é inserido.

Palavras-chave: Trânsito, Modelagem, Matemática, Interdisciplinaridade.

ABSTRACT

The purpose of this study is one of several applications of the use of mathematics in everyday life. Thus, we use the transit as a practical way to contextualize situations. The interdisciplinary approach is used in situations because the physical point of view, so basic, is working closely with mathematics. With traffic being something that is part of everyone's life, since they are all pedestrians at least, there are several ways to associate mathematics to traffic situations. The presentation of such matters becomes a challenge for those who lead the class, due to the dynamism of ideas and the way the work should be conducted. Importantly, the work involving the modeling of problems makes the teacher as a mediator between the student and knowledge. For students there is the challenge in seeing the association of context with the subject within mathematics. The work matters involving modeling makes the student work and the reasoning makes research more attractive due to the context which is always inserted.

Keywords: Transit, Modeling, Mathematics, Interdisciplinary.

1 INTRODUÇÃO

O trânsito caótico das grandes cidades vive colocando os cidadãos em diversas situações de reflexão. Aliás, o mais comum atualmente é verificar o constante aumento do número de acidentes de trânsito. Tal crescimento é resultado da existência de uma série de fatores. Partindo desse princípio, os centros de formação de condutores iniciam seus cursos com uma insistente abordagem dos riscos envolvidos na prática de direção e dos fatores causadores dos acidentes.

A conscientização de um modelo de direção que cause menos danos à sociedade é um tema que pode ser implantado dentro da sala de aula. A escolha de um público que frequenta os anos iniciais do ensino médio potencializa o trabalho, pois existe à maturidade para a discussão de certos assuntos. Como parte do desenvolvimento educacional, a educação do trânsito pode ser obtida dentro de um médio espaço de tempo com o auxílio dos futuros cidadãos que hoje são crianças.

Uma forma interessante que pode ser utilizada para mostrar a importância da consciência no trânsito é chamar a atenção dos alunos para às aplicações dos conteúdos ensinados na sala de aula. Assim, cada futuro adulto e motorista que está estudando, poderá compreender uma série de situações onde cada ação corresponde a alguma lei de causa e efeito.

A matemática dispõe de recursos que permitem avaliar uma série de fatores que envolvem a educação no trânsito. Observa-se que muitos alunos não possuem a menor ideia de como vão aplicar nas suas vidas os conceitos matemáticos relativos a alguns assuntos. Em relação ao trânsito, inúmeros exemplos de aplicação podem ser citados, como quantidade de acidentes dentro de um determinado período, os percentuais de crescimento ou decréscimo de mortes no trânsito, ou a média de colisões dentro de uma época festiva.

Com base nas ideias apresentadas, pode-se dizer que a criação de um modelo matemático auxilia plenamente o aluno na busca pelas informações. Mais do que isso, pode também servir para o mesmo compreender realmente como se aplica na prática algo que é mostrado no livro didático. O uso de um contexto real para ensinar a matéria produz efeitos benéficos para a formação.

A exploração de informações com a finalidade de superar desafios constitui um antigo modo do ser humano descobrir soluções para os seus problemas. A humanidade cresce baseada na superação de diversos obstáculos e na escola, a imaginação da criança e do adolescente em formação deve ser aguçada. O grande desafio é conseguir aliar o problema real ao mundo matemático.

Neste sentido, a visão da relação entre várias áreas do conhecimento é o ponto principal que deve ser trabalhado. Quando atividades que relacionam vários conteúdos chegam ao aluno, ele se vê diante do desafio em descobrir o que realmente acontece. Questões que trabalham a ideia de interdisciplinaridade aguçam o espírito de investigação e estimulam a criatividade do executante da atividade.

2 O RELACIONAMENTO ENTRE O PROBLEMA E O ASSUNTO

A dificuldade do aluno reside em perceber como ele pode visualizar o uso da matemática em seu problema. Em relação a esse ponto, o professor é o agente principal da condução do aluno à aplicação do conhecimento. Assim, é claro que o profissional de ensino deve estar preparado para fornecer o suporte necessário para os seus alunos.

Cabe ao professor verificar como a utilização de problemas cotidianos vai ser encaixada com o contexto matemático. O ato principal de planejar as atividades, fazer a seleção dos conteúdos e criar as condições para que cada aluno possa trabalhar a sua aprendizagem é do professor (LIBÂNEO, 1994). O aluno deve ser estimulado a realizar a pesquisa e a reflexão sobre o problema e alcançar assim o êxito no desenvolvimento da atividade. Algo que poderia chamar a atenção do aluno é o fato de como poderia ser utilizada a matemática para resolver questões simples envolvendo o caos do trânsito.

Por exemplo, um simples deslocamento de automóvel possui dados interessantes que podem ser utilizados para diversos tipos de estudo. A distância que vai percorrer, o tempo de viagem, a quantidade de carga que está conduzindo e o combustível gasto são exemplos simples de verificação da presença da matemática na questão. A figura 1 relaciona o tempo gasto por três carros durante o deslocamento entre as cidades A e E, passando pelas cidades B, C e D.

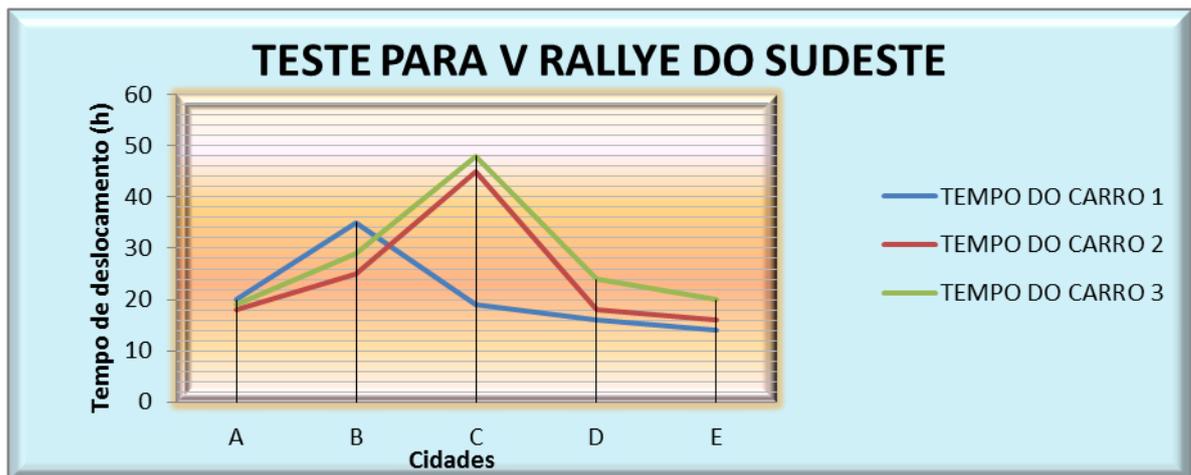


Figura 1: Teste para o V Rallye do Sudeste.

2.1 Objetivos

É notável que quando um carro está em movimento, podem ser destacadas várias informações. Primeiramente, devem ser separadas as informações que interessam para a resolução do problema: velocidade do carro, distância do obstáculo da frente, tempo necessário para parar e a aceleração imposta para a redução da velocidade.

O aluno, pelas experiências vividas em seu cotidiano, consegue perceber que a velocidade é uma grandeza que pode ser medida, assim como a distância e o tempo. Ou seja, conforme a matéria é apresentada, os alunos assimilam de maneira consciente o conteúdo e por meio de sua atividade mental, desenvolvem suas habilidades (LIBÂNEO, 1994) e conseqüentemente, condições para traçar um paralelo rumo à resolução de problemas. Dentro disso, alguns conceitos básicos de cinemática podem ser utilizados para o aluno ver como o cotidiano é repleto de exemplos a serem vistos como potenciais modelos de aplicação da matemática.

Muitas vezes, várias operações matemáticas são executadas e não se percebe o porquê e muito menos a finalidade da execução de tais operações. Ou seja, o exercício torna-se uma atividade meramente mecânica sem a percepção correta daquilo que está sendo executado. Dessa forma o conhecimento não é desenvolvido e o aluno torna-se um copiadador que executa as atividades sem saber realmente o que está acontecendo.

O foco em um determinado objetivo regula quais serão as metas a serem atingidas e assim pode-se filtrar aquilo que é mais interessante. Muitas vezes a expansão de ideias direcionada a vários temas pode atrapalhar o andamento da continuidade dos assuntos.

O movimento de parada de um automóvel pode ser tomado como exemplo. A infinidade de ideias relacionada somente a este tema é capaz de gerar uma série de questões interessantes. É possível traçar algum paralelo entre o movimento de um veículo e algum assunto dentro da matemática? É possível determinar a distância segura de frenagem de um carro? Em caso de colisão, é possível saber se o condutor estava dirigindo a uma distância segura? A matemática dispõe de ferramentas para auxiliar a resolução desse tipo de questão?

2.2 Compreendendo o Problema

A compreensão destes questionamentos só leva a uma direção. Como chegar a essas respostas é o grande desafio. A figura 2 mostra um móvel a uma distância de 100 metros de uma residência e este móvel está se deslocando a uma velocidade de 30 Km/h.

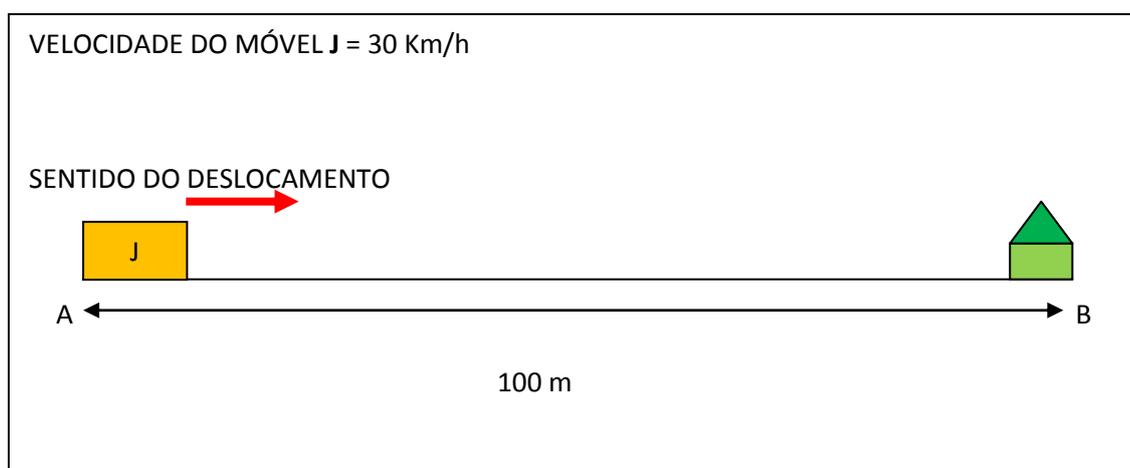


Figura 2: Móvel em deslocamento tendo como obstáculo a frente uma residência.

A partir do momento que o motorista enxerga o obstáculo à frente, age no freio do veículo a fim de fazê-lo parar. Essa ação submete o veículo a uma perda de velocidade gradativa até que chega o momento que o veículo está completamente parado. Em meio ao trânsito caótico de hoje, é comum verificar que constantemente uma série de pequenos acidentes é provocada pela simples não observância de certos detalhes.

Quando existe outro veículo na frente de um motorista e o sinal fecha é comum ocorrer uma espécie de reação em cadeia onde todos os motoristas iniciam de maneira suave um acionamento dos freios de seus veículos. Quando a distância do veículo da frente é razoavelmente adequada à velocidade, não há problema no ato de parada. O problema está relacionado com a distância do veículo da frente, pois caso a distância não proporcione segurança, uma colisão não pode ser evitada. A figura 3 ilustra a situação de dois veículos em movimento onde o veículo A (J) está a uma distância relativamente grande do veículo B (K).

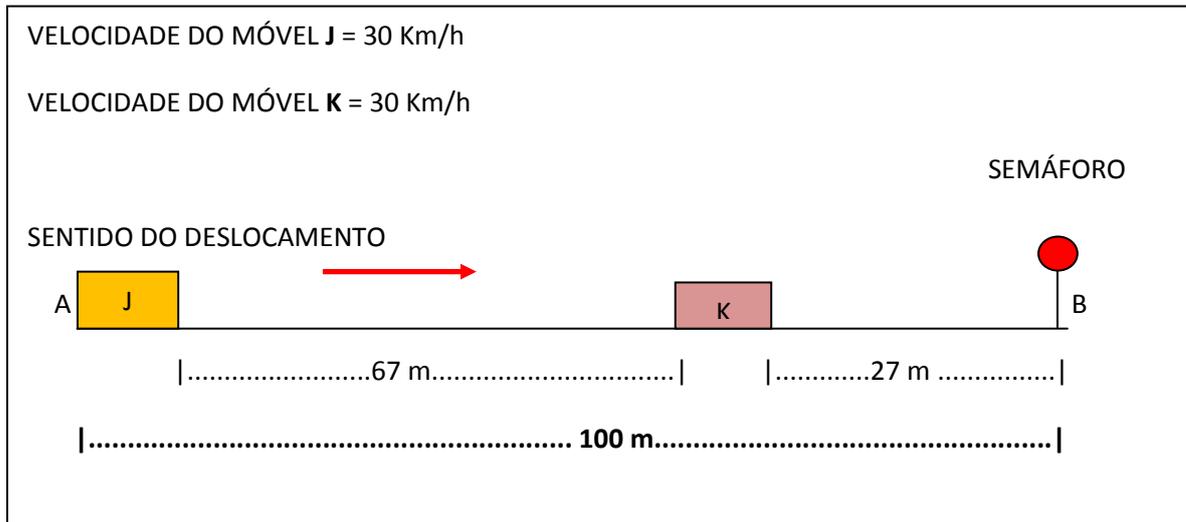


Figura 3: Dois veículos em deslocamento rumo a um sinal vermelho.

Percebe-se que o móvel K não possui muito tempo para realizar a parada do veículo e que o veículo J pelo fato de estar a uma distância maior do semáforo, possui mais tempo para realizar a parada. Caso o veículo J estivesse a uma distância menor do veículo K, sentiria grande dificuldade em parar o veículo. Além disso, a velocidade aqui considerada é extremamente baixa para as distâncias que foram apresentadas. Reflita agora se a situação ilustrada pela figura 4 pode existir sem que ocorra uma colisão ou um acidente envolvendo o pedestre representado.

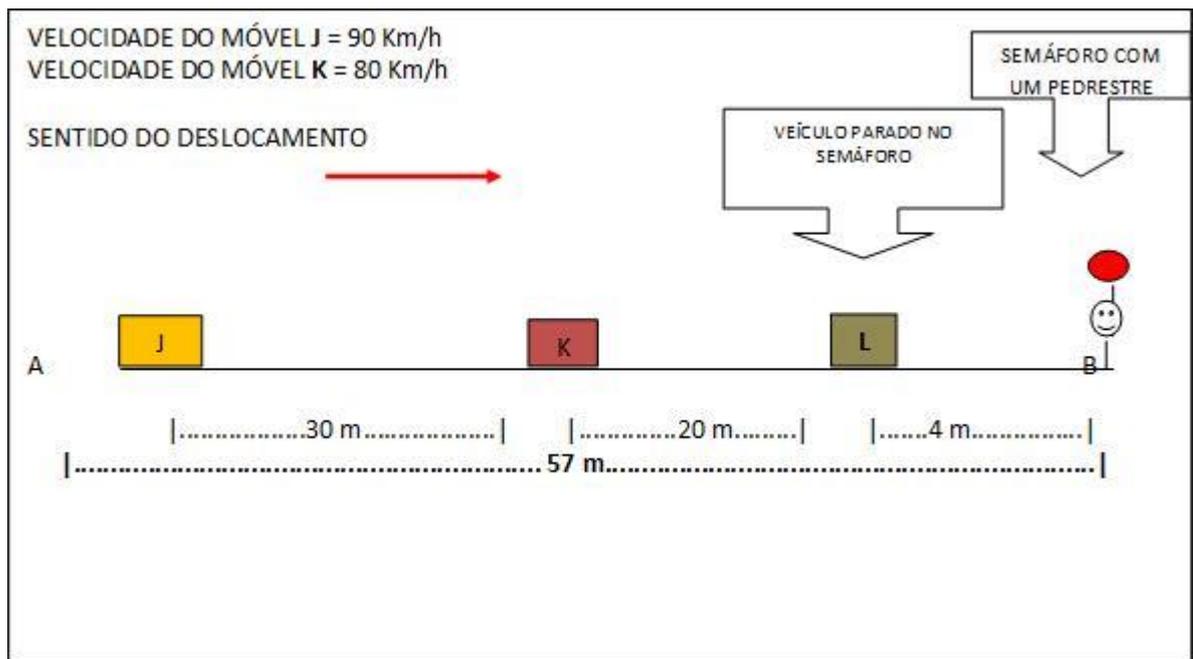


Figura 4: É possível realizar uma parada segura do veículo?

Agora as velocidades são maiores e as distâncias diminuíram, deixando assim a evidência de que fatalmente um acidente ocorreria nessa situação. O interessante é que o agente de trânsito de posse de alguns dados tem como definir o causador do acidente.

2.3 Relacionando a Teoria e a Prática

Suponha agora que um automóvel esteja em um deslocamento de 250 metros e que seja registrada a sua posição a cada 5 segundos. Considere que existam marcações que indiquem a distância pelo seu trajeto. Considere também que o motorista durante este trajeto não acelera o veículo bruscamente e nem freia bruscamente. A partir daí pode-se criar uma tabela relacionando os dados. Veja na tabela 1 a 1ª parte do deslocamento, onde o motorista está acelerando o veículo:

Tabela 1 – Relação entre o tempo e a distância percorrida durante a aceleração.

DISTÂNCIA PERCORRIDA (m)	TEMPO (s)
0	0
45	5
80	10
105	15
120	20
125	25

Após 25 segundos de deslocamento, o motorista inicia a frenagem do veículo a fim de que o mesmo pare. Veja os dados coletados conforme mostra a tabela 2:

Tabela 2 – Relação entre o tempo e a distância percorrida durante a frenagem.

DISTÂNCIA PERCORRIDA (m)	TEMPO (s)
120	30
105	35
80	40
45	45
0	50

Percebe-se que existe uma relação entre os valores quando aumentam e quando diminuem. É evidente que pelo tempo que o automóvel leva para percorrer a distância informada, a sua velocidade não é alta. Sendo assim, o motorista conseguiria facilmente evitar uma colisão caso aparecesse um obstáculo na sua frente.

No exemplo apresentado foi considerado um carro em movimento onde o valor da sua posição aumentou e diminuiu. Isso significa que o veículo encontrava-se parado na última marcação de tempo. Dependendo da finalidade, os dados podem ser coletados do início do movimento ou somente do final. É possível utilizar os dados das Tabelas 1 e 2 como fonte de informação para a determinação de uma posição qualquer? Qual é a relação existente entre os valores das tabelas?

A partir de agora a imaginação do aluno é o ponto chave para o desenvolvimento da questão. Após a coleta de dados, é possível realizar a construção de um gráfico, e assim facilitar a visualização do fenômeno que está ocorrendo. A criação de um gráfico permite que alguns paralelos sejam traçados. Como exemplo, pode ser citada a relação entre o aumento da distância em função do tempo com a disposição da curva no gráfico. Outro exemplo é a relação entre o formato do gráfico e o tipo de movimento que a ele está associado.

O Gráfico pode estar associado a algum assunto já estudado pelos alunos. Com isso pode ser vista a aplicabilidade de conceitos matemáticos na vida real. É justamente nesse ponto que a criatividade da turma é trabalhada. Uma tempestade de ideias surge quando estão confrontados com o problema e a criatividade proporciona a direção mais coerente dentro daquilo que é discutido. O Gráfico 1 relaciona os dados que foram apresentados nas Tabelas 1 e 2:

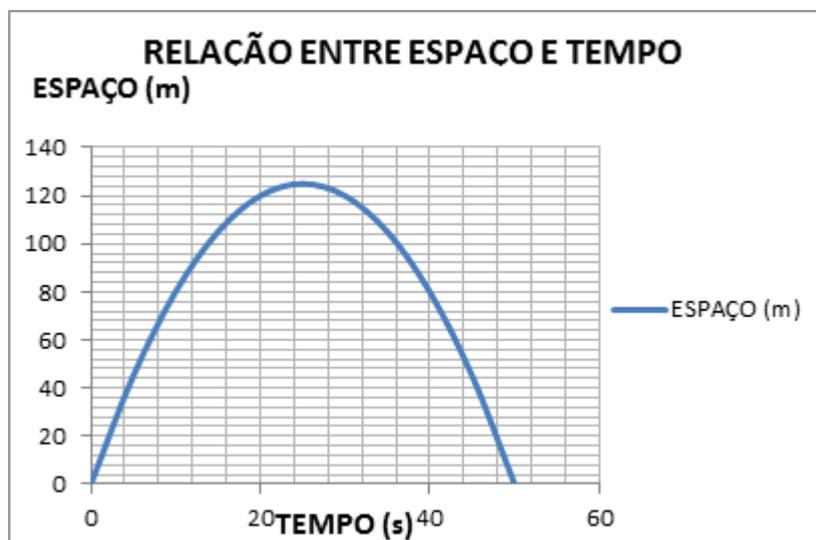


Gráfico 1: Relação entre espaço e tempo.

Verifica-se que a relação entre os dados levantados realiza a construção de uma parábola. Percebe-se também que a parábola está com a sua concavidade voltada para baixo e que o gráfico corta o eixo das abscissas em dois valores reais e distintos. Fisicamente, a parábola pode ser associada ao movimento de corpos. O Movimento Retilíneo Uniformemente Variado de um corpo que possui aceleração negativa é representado graficamente por um arco de parábola com a concavidade voltada para baixo.

A partir do momento em que o automóvel em questão inicia a frenagem, os valores do gráfico começam a diminuir em relação ao eixo y, chegando à zero. Quando isso ocorre, o gráfico no eixo x encontra-se sobre o valor de 50 segundos. Após o levantamento dessas e de outras informações que se acharem pertinentes, o aluno possui condições para adotar uma equação que rege o fenômeno e assim descobrir qualquer valor que pertença ao gráfico.

Caso ainda sinta dificuldades em obter a regra matemática que define os valores do gráfico, o aluno pode observar que a variação dos valores no eixo y (espaço) com os valores que estão no eixo x (tempo) pode ser utilizada para a montagem de um sistema de equações do 1º grau.

Sendo, $ax^2+bx+c=0$ com $a \neq 0$, a forma geral da equação do 2º grau, e sabendo que os valores de x, da equação geral, correspondem aos mesmos valores presentes no eixo x do gráfico, podem ser escolhidos qualquer dupla de pares ordenados a fim de que possam ser determinados os valores de a, b e c da equação. Uma boa sugestão de par ordenado que possa ser utilizado está na tabela 2, quando se tem o tempo igual há 50 segundos. O outro par ordenado sai da relação entre o tempo de 5 segundos e a distância percorrida de 45 metros. O valor de c aparece instantaneamente quando é utilizada a primeira combinação de valores, pois temos $0x^2 + 0x + c = 0$, e consequentemente $c = 0$. Observe como fica o sistema:

$$\begin{cases} a5^2 + b5 = 45 & (1) \\ a50^2 + b50 = 0 & (2) \end{cases}$$

Multiplica-se a Equação (1) por (-10):

$$\begin{cases} 25a + 5b = 45 \times (-10) \\ 50^2 a + 50b = 0 \end{cases}$$

Passa-se a ter o seguinte sistema:

$$\begin{cases} -250a - 50b = -45 \\ 2500a + 50b = 0 \end{cases}$$

Fazendo a adição da primeira equação com a segunda do sistema anterior, obtém-se:

$$2250a + 0b = -450 \quad (3)$$

Resolvendo a equação (3), é obtido o valor de $a = -1/5$, e substituindo o valor de a na 2ª equação obtemos o valor de $b = 10$. Assim obtêm-se os valores fixos a, b . Sendo o valor de c igual à zero, torna-se fácil concluir qual é a equação procurada. Retornando a forma geral da equação do 2º grau com os valores de a, b e c encontrados, chega-se a equação $\frac{-x^2}{5} + 10x = 0$.

O pensamento matemático, além do caráter lógico manifesto na racionalidade, no discurso, também inclui uma componente ligada aos processos intuitivos: imaginação, criação, sensibilidade (SERENATO, 2008). Conforme visto, o conceito matemático possui aplicações importantes na vida real em diversas situações. A modelagem do problema para o cotidiano faz com que o aluno perceba a importância do assunto que está sendo tratado.

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É interessante o uso da relação entre várias áreas do conhecimento. Existe um cuidado associado a esse tipo de metodologia, para que a atenção não fique dispersa e ocorra a fuga do tema. O aluno quando verifica a contextualização do problema, muitas vezes tende sentir mais dificuldade do que o normal para encontrar a sua resolução. Quando o aluno é desafiado e coloca a sua imaginação no desenvolvimento da atividade, percebe-se que a compreensão é mais sólida. Questões que envolvem a interdisciplinaridade proporcionam essa experiência e assim o aluno compreende não só a resolução do problema mas também a sua aplicação no cotidiano. O grande obstáculo a ser vencido é exatamente a contextualização dos assuntos de modo que o cidadão a ser formado por este sistema educacional seja criativo e colaborador para o desenvolvimento da sociedade.

REFERÊNCIAS

- CAVALCANTE, Kleber. Gráficos do Movimento Uniformemente Variado. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/graficos-movimento-uniformemente-variado.htm>>. Acesso em: 17 maio 2013.
- MARQUES, Domiciano. Função Horária do MUV. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/funcao-horaria-muv.htm>>. Acesso em: 20 maio 2013.

LIBÂNEO, José Carlos. Didática, velhos e novos temas. Goiânia: Cortêz, 1994. 263 p.

SANTOS, Maria Das Graças Silva. A MATEMÁTICA E A INTERDISCIPLINARIDADE. Disponível em: <<http://www.infoeducativa.com.br/index.asp?Page=artigo&id=172>>. Acesso em: 20 maio 2013.

SERENATO, Liliana Junkes. Aproximações interdisciplinares entre matemática e arte : resgatando. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Setor de Educação, Programa de Pós-graduação em Educação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <http://www.ppge.ufpr.br/teses/M08_ser Renato.pdf>. Acesso em: 22 maio 2013.

Jorge Bertoldo Junior

Universidade de Taubaté
jorgeengmecanico@yahoo.com.br

**Pedro Marcelo Alves Ferreira
Pinto**

Universidade de Taubaté
pmarcelo.aero@hotmail.com

Adilho Teixeira de Souza

Universidade de Taubaté
adilhoteixeira@hotmail.com

Guilherme Apoena Silva Vieira

Universidade de Taubaté
guilhermeapoena@hotmail.com

BRAÇO MECÂNICO HIDRÁULICO PARA TRANSPORTE DE PRODUTOS E OPERAÇÃO DE PINTURA SIMULTANEAMENTE

RESUMO

O presente trabalho irá apresentar a adição de uma operação ao processo de transporte realizado por um braço mecânico. Normalmente, esse tipo de equipamento só realiza uma operação por vez o que o deixa subaproveitado. Nesse trabalho iremos fazer a inserção da atividade de pintura do item transportado. Será construído um protótipo com estrutura de madeira com um sistema hidráulico fabricado por meio do uso de seringas médicas para realização das operações de transporte e de pintura. As diferentes performances do equipamento serão apresentadas, quando o mesmo utiliza em seu sistema hidráulico três fluidos de trabalho diferentes: água, detergente e óleo vegetal. A eficiência do sistema hidráulico está diretamente ligada ao fluido de trabalho escolhido para ser inserido no sistema hidráulico que movimenta o braço mecânico.

Palavras-chave: Sistemas de fluidos mecânicos; Teorema de Stevin; Teorema de Pascal.

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

INTRODUÇÃO

Desde o fordismo os empresários e líderes veem à grande necessidade de aproveitar melhor o tempo gasto para produzir um determinado produto além de diminuir a demanda de recursos humanos e naturais. Esta situação gera a necessidade da automatização dos processos de fabricação, e um dos itens mais pesquisados e que possui um papel fundamental na indústria são os braços mecânicos hidráulicos, equipamentos que realizam o transporte de materiais de um ponto para outro da linha de produção.

A incorporação de uma atividade específica durante o transporte de um produto em qualquer etapa do processo de manufatura tem por objetivo reduzir o tempo necessário para que um ciclo de produção seja completado.

REVISÃO DA LITERATURA

O princípio de Pascal representa uma das mais significativas contribuições práticas para a mecânica dos fluidos no que tange a problemas que envolvem a transmissão e a ampliação de forças através da pressão aplicada a um fluido.

Conforme apresentado por HALLIDAY, RESNICK e MERRILL HALLIDAY (2002) quando se aperta uma extremidade de um tubo de pasta de dentes para fazer a pasta sair na outra extremidade estamos vendo o princípio de pascal em ação. Este princípio também é a base da manobra de Heimlich, na qual um aumento brusco de pressão adequadamente aplicada ao abdome é transmitido à garganta, expulsando a força a comida ali alojada.

Uma mudança na pressão aplicada a um fluido incompressível confinado é transmitida integralmente a todas as partes do fluido. Considerando o caso no qual o fluido incompressível é um líquido contido em um cilindro alto, conforme a figura 1, coloca-se um pistão sem folgas no cilindro e sobre ele um recipiente de granalha de chumbo. O recipiente e a granalha exercem uma pressão P_{ext} sobre o pistão e conseqüentemente sobre o líquido. A pressão P em qualquer ponto P do líquido é:

$$P = P_{ext} + \rho gh \quad (1)$$

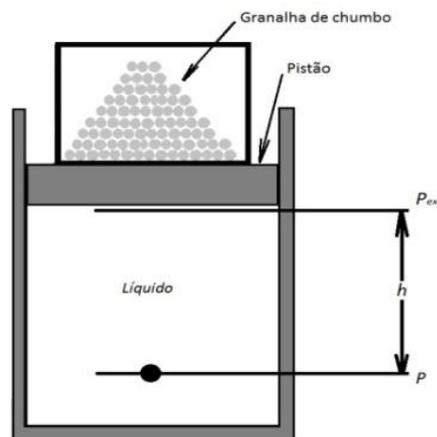


Figura 1. Teoria de Pascal

Fonte: HALLIDAY, RESNICK e MERRILL HALLIDAY, 2002.

Considere que acrescentemos um pouco mais de granalha de chumbo ao recipiente para aumentarmos P_{ext} de uma quantidade ΔP_{ext} . As grandezas ρ , g e h na equação (1) não se alteram, logo a variação de pressão em P é, equação (2):

$$\Delta P = \Delta P_{ext} \quad (2)$$

Está variação de pressão independe de h , logo ela deve valer para todos os pontos no interior do fluido, como estabelece o princípio de pascal, uma vez que consideremos um o fluido como um fluido incompressível.

A figura 2 mostra como o princípio de Pascal serve de base para uma alavanca hidráulica. Considere uma força externa com intensidade F_e dirigida para baixo aplicada sobre o pistão esquerdo (de entrada) cuja área é A_e . Um fluido incompressível atuando no interior do dispositivo produz então uma força para cima de intensidade F_s sobre o pistão direito (de saída), cuja área é A_s . Para manter o sistema em equilíbrio, deve existir uma força F_s no

pistão de saída oriunda de uma carga externa. A força \vec{F}_s para baixo, vinda da carga na direita, produz uma variação ΔP na pressão do líquido que é dada pela equação (3):

$$\Delta P = \frac{F_e}{A_e} = \frac{F_s}{A_s} \quad (3)$$

Então,

$$F_s = F_e \frac{A_s}{A_e} \quad (4)$$

A equação (4) mostra que a força de saída \vec{F}_s sobre a carga tem que ser maior do que a força de entrada \vec{F}_e , se $A_s > A_e$, como é o caso da figura 2.

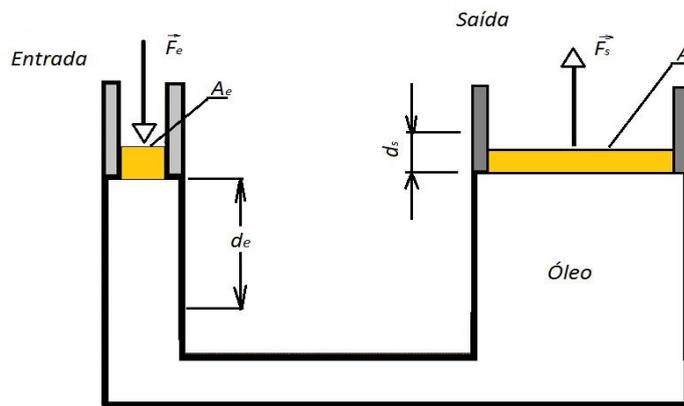


Figura 2. Teoria de pascal

Fonte: HALLIDAY, RESNICK e MERRILL, 2002.

Se deslocarmos o pistão de entrada para baixo segundo uma distância d_e , o pistão de saída se move para cima segundo uma distância d_s , de modo que o mesmo volume V do fluido incompressível é deslocado nos dois pistões. Então podemos escrever a equação (5):

$$V = A_e d_e = A_s d_s \quad (5)$$

Que podemos reescrever na forma da equação (6).

$$d_s = d_e \frac{A_e}{A_s} \quad (6)$$

Isto mostra que, se $A_s > A_e$ (conforme a figura 2), o pistão de saída se move uma distância menor do que se move o pistão de entrada.

Das equações (4) e (6) podemos escrever o trabalho de saída como, equação (7):

$$W = F_s d_s = \left(F_e \frac{A_s}{A_e} \right) \left(d_e \frac{A_e}{A_s} \right) = F_e d_e \quad (7)$$

O que mostra que o trabalho W realizado sobre o pistão de entrada pela força aplicada é igual ao trabalho W realizado pelo pistão de saída ao levantar a carga colocada sobre o mesmo.

Conforme apresentado por BRUNETTI (2005), o teorema de Stevin também é conhecido por teorema fundamental da hidrostática e sua definição é de grande importância para a determinação da pressão atuante em qualquer ponto de uma coluna de líquido. Este teorema afirma que a diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas dos dois pontos, como por exemplo, um recipiente que contém um fluido e dois pontos genéricos M e N. A união entre os pontos M e N da forma a um cilindro, cuja área da base é de A , entorno do eixo MN, conforme mostrado na figura 3.

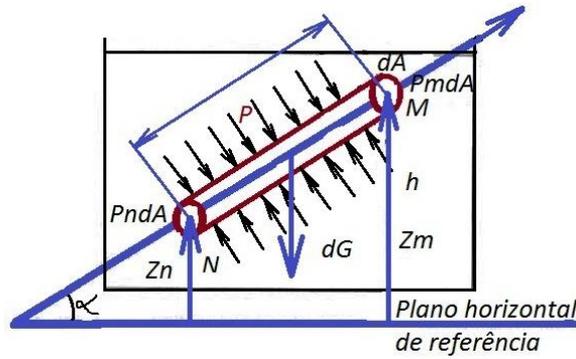


Figura 3. Teoria de Stevin
 Fonte: BRUNETTI, 2005.

Orienta – se o eixo MN de N para M e seja α o ângulo formado com a horizontal. Seja Z_N a cota do ponto N e Z_M a cota do ponto M, em relação a um plano horizontal qualquer, adotado como referência.

Seja h a diferença de cotas dos dois pontos, isto é, equação (8):

$$h = Z_M - Z_N \tag{8}$$

Como por hipótese, o fluido está em repouso, a resultante das forças que agem sobre o cilindro em qualquer direção deve ser nula, ou haveria um deslocamento nessa direção, contrariando a hipótese.

As forças que agem são:

$$dF_N = P_N dA \text{ no ponto N.}$$

$$dF_M = P_M dA \text{ no ponto M.}$$

$$F = P dA_\ell \text{ na superfície lateral.}$$

$$dG = \text{peso do fluido contido no cilindro} = \text{volume de fluido} \times \text{peso específico} = \ell \cdot dA \cdot \gamma$$

Todas essas forças são projetadas na direção do eixo NM. Deve-se lembrar de que, como as forças devidas a pressão são normais à superfície, então as que agem na superfície lateral terão componente nula sobre o eixo.

O equacionamento das demais forças existentes, respeitando o sentido do eixo, resulta, equações (9) – (12):

$$P_n dA - P_m dA - dG \sin \alpha = 0 \tag{9}$$

$$P_n dA - P_m dA - \gamma \ell dA \sin \alpha = 0 \tag{10}$$

$$P_n - P_m = \gamma \ell \sin \alpha = 0 \tag{11}$$

$$\ell \sin \alpha = h_n = Z_m - Z_n \tag{12}$$

Logo a diferença de pressão entre dois pontos genéricos é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas entre os dois pontos. Assim o ponto importante da teoria é:

Na diferença de pressão entre dois pontos não interessa a distância entre eles, mas a diferença de cotas;

A pressão dos pontos em um mesmo plano ou nível horizontal é a mesma;

O formato do recipiente não é importante para o cálculo da pressão em algum ponto. Na figura 4 em qualquer ponto do nível A, tem-se a mesma pressão P_A , em qualquer ponto do nível B, tem-se a pressão P_B , desde que o fluido seja o mesmo em todos os ramos.

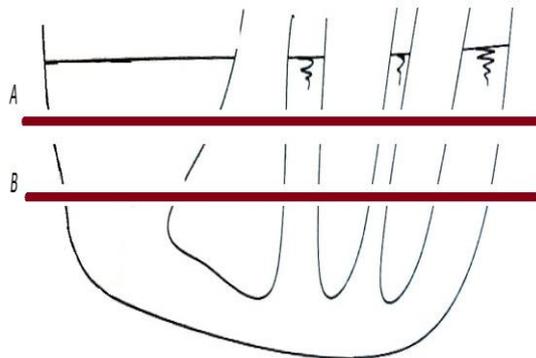


Figura 4. Teoria de Stevin
 Fonte: BRUNETTI, 2005.

Se a pressão na superfície livre de um líquido contido em um recipiente for nula, a pressão num ponto à profundidade h dentro do líquido será dada por, ver equação (13) e exemplo na figura 5.

$$p = \gamma h \tag{13}$$

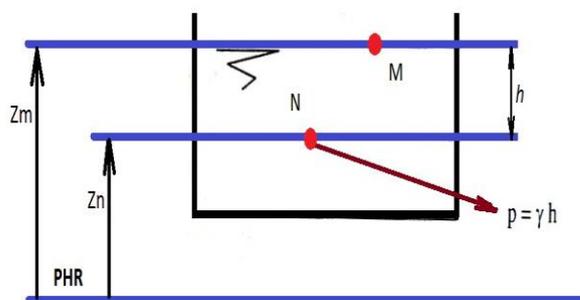


Figura 5. Teoria de Stevin
 Fonte: BRUNETTI, 2005.

O braço mecânico é um manipulador projetado para realizar diferentes tarefas repetidamente. O robô move partes, objetos, ferramentas, e dispositivos especiais segundo movimentos e pontos pré – programados, executa movimentos no espaço, transferindo objetos e ferramentas de um ponto para outro, instruído pelo controlador e informado sobre o ambiente por sensores, para realizar determinadas tarefas.

Na extremidade do braço existe um atuador usado pelo robô na execução de suas tarefas. Todo braço de robô é composto de uma série de vínculos e juntas ou articulações, onde a junta ou a articulação conecta dois vínculos permitindo o movimento relativo entre eles, como pode ser visualizado na figura 6.

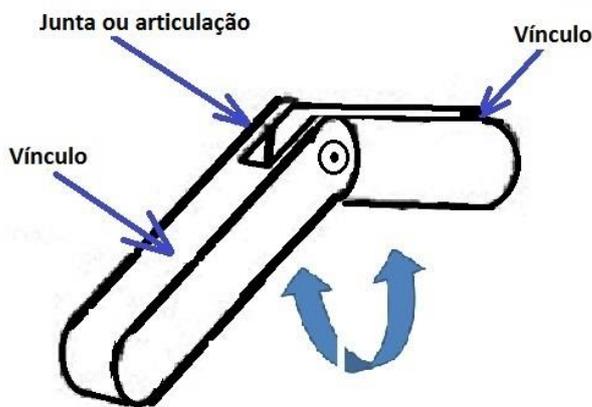


Figura 6 - Junta e vínculos em um braço de robô
 Fonte: Modificado de FRANCHIN, 2005.

Os robôs em geral possuem uma base fixa e o primeiro vínculo está preso a esta base.

Na tabela 1 a seguir são apresentadas as principais categorias de aplicação de robôs na indústria, bem como as suas capacidades e os principais benefícios gerados pelo seu uso, principalmente em células de trabalho (ou de produção).

Tabela 1: Principais aplicações de robôs na indústria e suas vantagens.

Fonte: FRANCHIN, 2005.

Movimento
Manipulação de materiais
Carga e descarga de máquinas
Trabalho com spray
Solda
Maquinário de acabamento
Montagem
Inspeção

Capacidades

X = transporte

Y = manipulação

Z = sensoriamento

Principais benefícios

A = Melhoria do produto

B = Aumento da produtividade

C = Redução de custos

D = Eliminação do trabalho perigoso

Os robôs manipuladores simulam de forma satisfatória o comportamento do braço humano. Os mesmos são constituídos por um conjunto de componentes, montados segundo uma sequência de juntas hidráulicas para orientar e manipular o elemento terminal, responsável por efetuar a tarefa requerida (MARTINS, 2008).

Em robótica de manipulação, existem cinco tipos principais de braços: cartesiano, cilíndrico, polar, antropomórfico e SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) (MARTINS, 2008).

Como pode ser visto na figura 7 o braço mecânico hidráulico é composto de várias partes como punho, braço, ombro, garra, articulações e base sistema de movimentação.

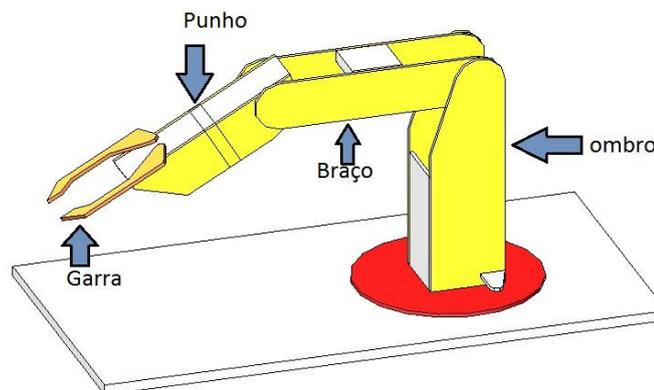


Figura 7: Partes do braço mecânico

Fonte: Dos autores.

As partes apresentadas na figura 7 têm a finalidade de operar como um braço humano, sendo capaz de realizar os movimentos próximos ao do real. Contudo a grande vantagem é a capacidade de realizar os movimentos com grande precisão e repetição dos movimentos.

2. Os três tipos de fluidos que serão estudados nesse trabalho tem a sua massa específica mostrada na tabela

Tabela 2 – Massa específica, kg/m³

Fluido	Massa específica
Detergente	1020 kg/m ³
Óleo	891 kg/m ³
Água	1000 kg/m ³

Os três tipos de fluidos que serão estudados nesse trabalho tem a sua viscosidade dinâmica apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Viscosidade Dinâmica

Fluido	Viscosidade
Detergente	0,25 PA.s
Óleo	0,06 PA.s
Água	$9,81 \times 10^{-4}$ PA.s

MATERIAS E MÉTODOS

Um protótipo foi construído conforme apresentado nas figuras 8, 9 e 10 com isopor comum para definirmos os pontos de articulação, verificar se as dimensões estipuladas estavam de acordo, e onde seria posicionado o sistema hidráulico.



Figura 8: Protótipo em isopor (vista lateral)

Fonte: Dos autores.



Figura 9: Protótipo em isopor (frontal)

Fonte: Dos autores.

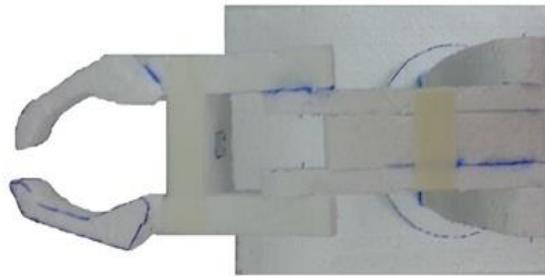


Figura 10: Protótipo em isopor (vista superior)

Fonte: Dos autores.

Após a verificação do protótipo foi construído um modelo definitivo em madeira com espessura de 5,0 mm, sobre o mesmo foi acoplado um sistema hidráulico constituído por seringas médicas com diâmetros de 16,0 mm, 13,0 mm e 9,0 mm e tubos flexíveis com diâmetro de 4,0 mm de diâmetro.

O sistema hidráulico foi carregado com três fluídos: água, óleo de cozinha e detergente.

A eficiência do sistema hidráulico foi verificada por meio de testes em que o sistema necessita transportar uma determinada massa de um ponto a outro.

Logo após a conclusão dos itens dimensionais e hidráulicos foi inserido um sistema com mais uma seringa e tubos para realizar uma atividade extra do braço mecânico. Esse sistema irá desenvolver um processo de pintura o que apresentará uma nova função no braço mecânico.

Foram desenvolvidos dois testes para avaliar primeiramente qual o tipo de fluido se adequa melhor ao sistema apresentado e em segundo a avaliação na redução do tempo.

A primeira avaliação era o braço mecânico levantar 3 objetos diferentes (trena, alicate e uma chave de boca 1”), durante um tempo determinado. Para esse trabalho foi determinado que para cada fluido testado, o braço deveria suportar o objeto em questão por 4 tempos distintos, que eram cinco, quinze, trinta e sessenta segundos. Portanto, como por exemplo, para o teste que o sistema hidráulico estava carregado com água e o item a ser erguido era a trena o braço foi testado no tempo de cinco, quinze, trinta e sessenta segundos. Com isso serão realizados quatro verificações por tipo de fluido, nos três tipos de objetos previamente determinados.

A segunda avaliação era realizar uma comparação entre duas operações. As operações que serão comparadas têm como similaridade o transporte de um produto qualquer e uma operação de pintura, diferenciando se no local de realização da pintura. Iremos verificar o tempo gasto para se transportar um item qualquer de um ponto A até o ponto B e após a chegada ao ponto final à realização do processo de pintura. Esse tempo gasto será confrontado com o processo de transporte do mesmo ponto A até o ponto B, no entanto ao invés de se realizar o processo de pintura após a chegada ao ponto B, ele aconteceria durante o transporte entre A e B, sendo realizado pelo próprio braço mecânico durante o transporte.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro teste realizado foi verificar qual era o melhor fluido de trabalho. Cada fluido foi inserido no sistema hidráulico, e mediu – se o tempo que cada fluido suportava sem nenhuma oscilação. Os resultados foram obtidos através da comparação do levantamento de uma massa de 3 objetos diferentes (trena, alicate e uma chave de boca 1”). O procedimento que foi utilizado para o teste considerou a possibilidade de o equipamento levantar os objetos solicitados e mantê – los suspensos, pelos períodos de tempos de 5 segundos, 15 segundos, 30 segundos, e por último o tempo de 60 segundos.

Os resultados obtidos foram inseridos na tabela 4 e posteriormente em formato de gráfico para orientar a análise, conforme pode ser visto na figura 11.

Tabela 4. Resultados obtidos no levantamento de peso

Fluido	1º teste 5 segundos	2º teste 15 segundos	3º teste 30 segundos	4º teste Máximo
Óleo vegetal	5	15	30	60
Detergente	5	15	30	60
Água	5	15	30	60

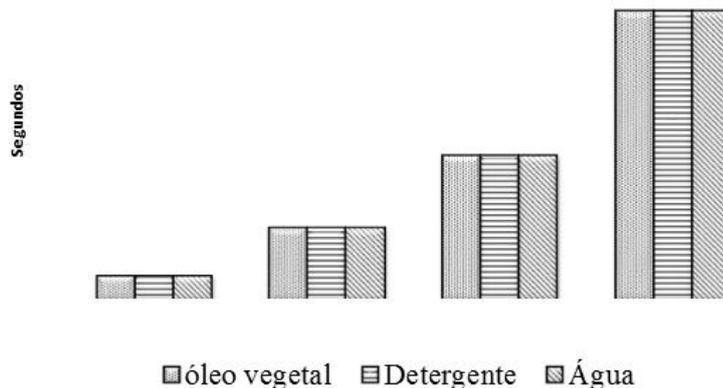


Figura 11: Gráfico com os resultados obtidos no levantamento de peso

A análise tinha como objetivo principal a comparação dos três fluidos e os seus desempenhos em situações iguais de uso e os resultado podem ser visto na figura 11. Em relação ao tempo de sustentação dos objetos os três fluidos apresentaram o mesmo desempenho, para esse sistema hidráulico.

O segundo teste realizado foi cronometrar o tempo necessário para realizar o transporte de um ponto até outro. O teste foi dividido em duas etapas: na primeira etapa do teste o ciclo de operação do equipamento se desenvolveu conforme o equipamento está alocado dentro das empresas atualmente e na segunda etapa o equipamento realiza o mesmo ciclo, mas neste caso a operação de pintura foi realizada durante o transporte da peça. O 1º teste é levantar a peça e transportar para o ponto onde será realizada a pintura, já o 2º teste a pintura é realizada durante o processo de transporte.

Essa atividade foi feita por duas pessoas seguindo os mesmos procedimentos para que os resultados fossem comparados.

Os resultados obtidos foram plotados no gráfico apresentado na figura 12.

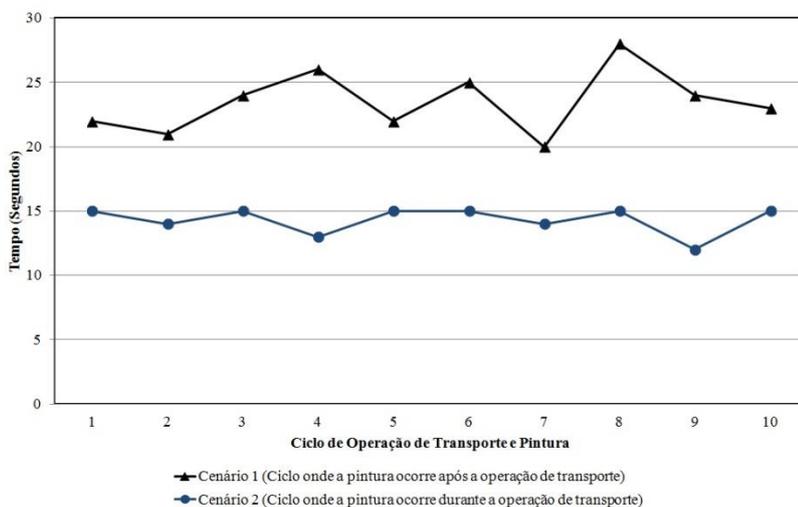


Figura 12: Tempo decorrido para a realização de cada ciclo, adicionando a operação de pintura e não adicionando a operação de pintura. Nota: Tempo em segundos

Na tabela 5 são apresentados os valores de tempo máximo, tempo mínimo e desvio padrão e em todos esses itens o 1º teste apresentou valores maiores. Os resultados do 2º teste foram menores do que o do 1º teste.

Tabela 5. Análise estatística dos dados obtidos

Teste	Máx	Mín	Média	Desvio Padrão
1º teste	24,90	18,87	21,69	2,34
2º teste	15,67	8,53	11,72	2,19

Nota: Tempo em segundos

Como pode ser observado na tabela 5, o tempo médio para realização do teste 1º (teste com pintura no final do processo) foi de 21,69 segundos e o do 2º teste (teste com pintura durante o transporte) foi de 11,72 segundos.

Para realização dos testes foi utilizado o braço mecânico definitivo conforme mostrado na figura 13.

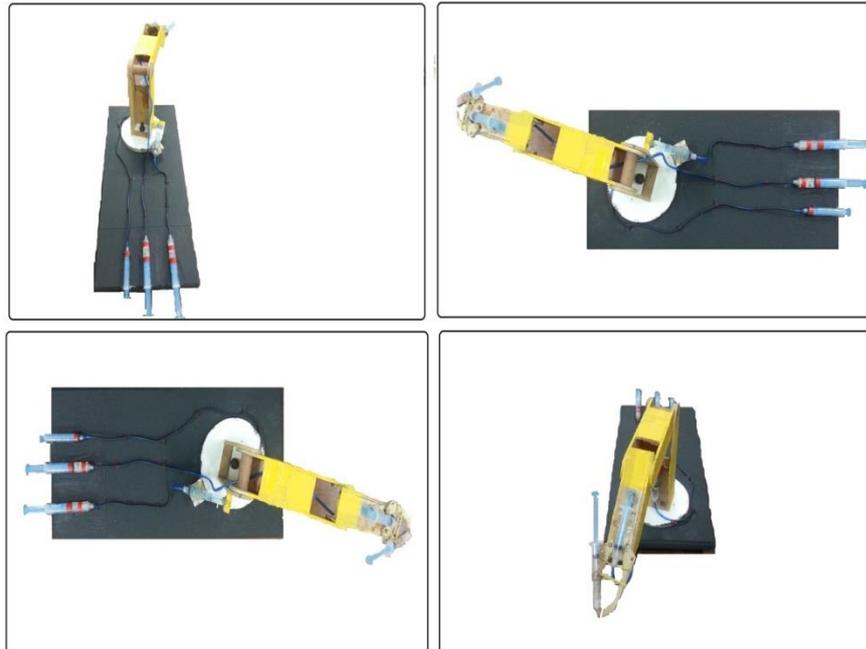


Figura 13: Equipamento pronto (vista superior)

Fonte: Dos autores.

CONCLUSÕES

Apesar dos valores de massa específica e viscosidade dinâmica para os fluidos estudados, serem diferentes, para o sistema avaliado, o desempenho deles foi igual conforme pode ser visto na figura 11. Portanto não houve diferença. Como não houve diferença foi definido que para efeito de estudos futuros que o detergente será o fluido utilizado para mover o braço mecânico.

Para a segunda avaliação constatou – se que existe um grande potencial de melhoria em respeito a melhor utilização desse equipamento. Assim foi possível concluir que se esse equipamento fosse utilizado para realizar uma operação simples que não exige precisão dimensional, os ganhos seriam satisfatórios na redução de tempo de produção. Utilizando os números de média dos testes realizados, sendo o 1º teste com 21,96 segundos de média e o teste 2º com 11,72 segundos foi possível validar que se pode melhorar significativamente a utilização dos braços mecânicos na indústria, pois foi possível constatar com esse teste uma redução de 45,96% no tempo de realização de uma operação e esse valor dentro de um ciclo produtivo, propiciará uma melhor utilização de recursos na organização além de aperfeiçoar o processo.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, F. *Mecânica dos fluidos*. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

FRANCHIN N. M. *Apostila da disciplina de Elementos de Robótica*. Disponível em: <http://www.dee.feb.unesp.br/~marcelo/robotica/conteudo.html>. Acesso em: 05 de maio de 2013.

MARTINS. H, R. *Projeto de um protótipo de um manipulador tele operado*, 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Computação) – Universidade do Vale do Itajaí, São José. 2008.

RESNICK R.; HALLIDAY D.; J. MERRILL. *Fundamentos de Física*. 6 ed. São Paulo: LTC, 2002. vol. 2.

ZERBONE. E.; BASTOS, S. *Robótica aplicada a sistemas produtivos de fabricação*. Centro Federal de Educação Tecnológico do Rio de Janeiro, 2005.

Vinícius Reis Leite

Universidade de Taubaté

viniciusreisleite@gmail.com

ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICAÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE

RESUMO

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas e testes realizados em materiais acabados ou não acabados para verificar a existência ou não de descontinuidade, anomalias e ou defeitos. Estes ensaios são feitos através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Eles determinam a integridade do material, peça ou estrutura e medem quantitativamente uma dada característica do material, ou seja, por não danificar na inspeção ou medição do material esse tipo de ensaio é denominado não destrutivo. END é atualmente uma ferramenta indispensável na indústria, diversas empresas reconhecem esta área tecnológica como essencial para contribuir na redução dos custos, aumentar a confiabilidade e garantir uma maior qualidade na inspeção de matérias e produtos.

Palavras-chave: líquido penetrante, ensaio não destrutivo, defeitos, confiabilidade.

ABSTRACT

The nondestructive testing (NDT) techniques and tests are conducted on finished or unfinished materials to verify the existence or not of discontinuity, and anomalies or defects. These tests are done through defined physical principles, without changing its physical, chemical, mechanical, dimensional and without interfering in its later use features. They determine the integrity of the material, part, or structure and quantitatively measure a given characteristic of the material, ie, by not damage inspection or measurement of the material this type of test is called non-destructive. END is now an indispensable tool in the industry, many companies recognize this technological area as essential to contribute to the reduction of costs, increase reliability and provide greater quality inspection of materials and products.

Keywords: liquid penetrant, non-destructive testing, defects, reliability.

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profª. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

1 INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica é um setor que se descreve por uma credibilidade elevada em seus componentes, devido aos rigorosos métodos de construção e desenvolvimento utilizados e seus precisos sistemas de manutenção e inspeção aplicados durante a vida útil. Devido ao conjunto de situações ligadas em comum, que permite o avião realizar voos e permanecer voando a todo o momento com índice de falhas zero, os END (ensaios não destrutivos) são amplamente utilizados na aeronáutica, que se prende com a necessidade de assegurar que os componentes em serviço não falhem, o que torna necessário aumentar a produtividade e confiabilidade destes procedimentos.

Dentro da indústria aeronáutica, entre os diversos tipos de ligas e materiais que são trabalhados, há as ligas não ferrosas, que precisam absolutamente de detecção de defeitos superficiais diferentes do ensaio por partículas magnéticas, que são aplicáveis somente em materiais magnéticos, dessa forma foi desenvolvido o ensaio por líquido penetrante para realizar testes em materiais não magnéticos, como as ligas não ferrosas. A inspeção e manutenção com intervalos regulares dos componentes aeronáuticos exige que as aeronaves permaneçam longos períodos de tempo estacionadas em um hangar, o que origina para a companhia área grandes perdas financeiras, por si só, elas também acarretam elevados custos que podem ser reduzidos se os procedimentos de inspeção e manutenção criarem condições mais favoráveis, uma melhor otimização do trabalho a ser realizado, reduzindo-se assim a mão de obra e o tempo estacionado da aeronave.

O setor aeronáutico é muito conservador, com argumentos que se enlaçam com as garantias oferecidas pelos métodos muito mais antigos devidamente certificados, dessa forma torna-se necessário um aprofundado estudo de todas as alternativas existentes de END que devem ser exaustivamente inseridas na indústria aeronáutica, seguindo as normas brasileiras e internacionais de uso, aplicação e revisão.

2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Entre os diversos métodos de END empregados, existem diversos que possuem a capacidade de oferecer informações a respeito do conteúdo de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, da monitoração da degradação dos componentes e estruturas. Os mais utilizados no setor aeronáutico são:

- Inspeção Visual;
- Líquido Penetrante;
- Partículas Magnéticas;
- Ultrassom;
- Radiografia (Raios X e Gama);
- Correntes parasitas;
- Análise de vibrações;
- Termografia;

Para que os resultados sejam satisfatórios e tenham validade, é de extrema importância que os ensaios sejam realizados por profissionais treinados e qualificados.

Todas as técnicas para a realização dos END, também devem seguir os procedimentos de execução de ensaios qualificados com base nas normas e critérios de aceitação, além de que os equipamentos tem a necessidade de estar devidamente calibrados.

Com o decorrer do tempo melhorias foram desenvolvidas para esse tipo de ensaio e conforme ANDREUCCI (2008), “o ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material. Esse método teve início antes da primeira guerra mundial, principalmente pela indústria ferroviária na inspeção de eixos, porém tomou impulso quando em 1942, nos EUA, foi desenvolvido o método de penetrantes fluorescentes. Nessa época, o ensaio foi adotado pelas indústrias aeronáuticas, que trabalhando com ligas não ferrosas, necessitavam um método de detecção de defeitos superficiais diferentes do ensaio por partículas magnéticas (não aplicável a materiais não magnéticos). A partir da segunda guerra mundial, o método foi se desenvolvendo, através da pesquisa e o aprimoramento de novos produtos utilizados no ensaio, até seu estágio atual.”

Na indústria aeronáutica, todos os ensaios e técnicas de END são aplicados em fases, esse procedimento garante uma maior credibilidade para seus componentes e, conseqüentemente, um maior nível de segurança. Os materiais utilizados para a construção dos componentes, antes de entrar em fase de produção, são inspecionados pelas técnicas e métodos de END para garantir que não exista nenhum tipo de defeito em sua estrutura e que possuam as propriedades mecânicas esperadas. Durante a fase de produção e ou rapidamente após ter sido concluída, todos os componentes são situados em fase de inspeção, com o objetivo de garantir que se encontre em

plenas condições de serem colocados em serviço, sem defeitos, anomalias e fissuras que comprometam o desempenho e a sua confiabilidade.

Atualmente as técnicas de END tornam-se cada vez mais desenvolvidas, baseando-se nos mesmos princípios físicos e químicos que suas antecessoras, mas com a possibilidade de tirar vantagem das novas tecnologias, fazendo com que haja uma maior eficácia na detecção dos defeitos e redução do tempo dos ensaios e procedimentos.

Sendo assim, algumas das melhorias que os END podem proporcionar para a inspeção dos componentes aeronáuticos é a diminuição do tempo de inspeção dos componentes e consequentemente diminuição do tempo da aeronave estacionada, aumento da confiabilidade e dos resultados inicialmente pretendidos na detecção de defeitos da inspeção e redução da mão de obra para as tarefas de manutenção.

Todas essas melhorias, fundamentalmente, ajudam a reduzir os custos de inspeção e a aumentar sua confiabilidade, o que contribui também para garantir que normas e boas práticas de inspeção sejam cumpridas por todas as empresas e profissionais do setor.

2.1 Líquido Penetrante

Dentre todas as técnicas utilizadas no END, optei, através desse artigo, a explanar sobre a identificação de fissuração superficial, que utiliza o END denominado de Líquidos Penetrantes.

O ensaio por Líquidos Penetrantes é ponderado como um dos métodos com maior eficácia para a detecção de descontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidade, dentre esses tipos de materiais podemos citar: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio aeronáutico, magnésio, aços inoxidáveis, ligas metálicas e de titânio, cerâmicas, vidros e plásticos. Eles também são amplamente utilizados para a detecção de vazamentos em tanques, soldas, tubos e componentes.

2.2 Objetivo

Promover material didático para constituir conhecimento aos profissionais do setor aeronáutico sobre o tratamento de materiais e superfícies utilizados na indústria aeronáutica.

O propósito da técnica de END por Líquido Penetrante é afirmar a credibilidade do produto (qualidade), conseguindo uma imagem que descobre algum tipo de fissura e descontinuidade na superfície da peça por meio de uma mancha, do qual não são perceptíveis no ensaio visual, sem danificá-la ou destruí-la, o que torna possível separar as peças seguindo os critérios e normas de avaliação aceitáveis.

2.3 Normas de Referência

As normas que administram o END de líquidos penetrantes no Brasil são a ABNT NBR 1591:2009 e a ABNT NBR 8407:2007, para os Estados Unidos é a ASTM (American Society for Testing and Materials) E1417.

2.4 Preparação do Roteiro para Aplicação

Todos os ensaios não destrutivos exigem um procedimento de acordo com a norma ou código aplicável ao elemento inspecionado. O processo para ensaio por líquidos penetrantes contém itens relevantes para sua aplicação. Abaixo segue o código ASME (American Society of Mechanical Engineers) Sec. V Art. 6:

- Materiais, formas ou tamanhos das peças a ser inspecionadas e extensão do ensaio;
- Tipo (número ou letra de designação se disponível de cada penetrante, removedor, emulsificador, e revelador);
- Detalhes de processamento para pré-limpeza, e secagem, incluindo materiais de limpeza usados, e tempo mínimo permitido para secagem;
- Detalhes de processamento para aplicação do penetrante, o tempo que o penetrante deve permanecer na superfície (tempo de penetração) temperatura da superfície e do penetrante durante o ensaio se diferente da faixa de 10 0C até 52 0C;
- Detalhes de processamento de remoção do excesso de penetrante da superfície, e para secagem da superfície antes de aplicar o revelador;
- Detalhes de processamento para aplicação do revelador, e o tempo de revelação antes da interpretação;
- Detalhes de processamento para limpeza após o ensaio.

Em caso de haver qualquer tipo de alteração ou substituição nos diversos tipos de materiais penetrantes (incluindo reveladores, emulsificadores, etc..) ou na técnica de processamento, o procedimento deverá ser revisado.

2.5 Classificação dos Penetrantes, Métodos e Materiais

As normas definem as características elementares para o controle e aplicação do ensaio e deve ser usada em conjunto com um procedimento detalhado.

Quando o objetivo é relevar a existência de descontinuidades em peças de aeronaves, é necessário seguir os critérios definidos no manual do fabricante e/ou boletins de serviços e no final do ensaio emitir um documento especificando o nível de aceitação ou rejeição. Dessa forma, os materiais utilizados no ensaio devem ser obrigatoriamente qualificados, somente os aprovados e listados na QPL (Qualified Products List) -AMS (Aerospace Material Specification) 2644 podem servir no ensaio por líquido penetrante, em casos que venha a utilizar materiais não listados na QPLAMS 2644, é necessário comprovar que o produto forneça a sensibilidade adequada, seja de excelente qualidade e que haja uma autorização da agência contratante.

Nem todos os materiais disponíveis no mercado Brasileiro para o ensaio por líquido penetrante estão listados na QPL-AMS 2644. Abaixo segue a classificação dos tipos de materiais e métodos definidos na ASTM E1417:

- **Tipo -Classificação dos Penetrantes**

Tipo I – fluorescente.

Tipo II – visível.

- **Classificação dos Métodos**

Método A – Lavável com água.

Método B – Pós-emulsificante, Lipofílico.

Método C – Removível com solvente.

Método D – Pós-emulsificante, Hidrofílico.

- **Sensibilidade: Os níveis de sensibilidade aplicam-se somente aos sistemas de penetrante Tipo I**

Sensibilidade Nível 1/2 -Muito baixa

Sensibilidade Nível 1 -Baixa

Sensibilidade Nível 2 – Média.

Sensibilidade Nível 3 – Alta.

Sensibilidade Nível 4 -Ultra-alta.

- **Classificação dos Reveladores:**

Forma a – pó seco.

Forma b – solúvel em água.

Forma c – suspensa em água.

Forma d – não aquoso.

Forma e – aplicação específica.

- **Classificação dos Solventes:**

Classe 1 – halogêneos.

Classe 2 – não halogêneos.

Classe 3 – aplicação específica.

Os profissionais envolvidos no ensaio devem ser qualificados por uma das seguintes normas:

- SNT-TC-1A;
- ANSI/ASNT CP 189;
- NAS 410. (Norma adotada para qualificação de profissionais em ensaios não destrutivos na área aeronáutica);

2.6 APLICAÇÃO

O procedimento para execução em que se baseia esta técnica de END segundo BRAY e McBRIDE (1992) consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido de características especiais. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície. Pode-se descrever o método em seis etapas principais no ensaio, quais sejam: a) Preparação da superfície – Limpeza inicial; b) Aplicação do penetrante; c) Remoção do excesso de penetrante; d) Revelação; e) Avaliação e Inspeção; f) Limpeza após o ensaio.

O líquido penetrante contém uma elevada capilaridade, baixa tensão superficial e viscosidade, a que é adicionado um corante para contraste, que pode ser avermelhado ou fluorescente. O ensaio é semelhante para muitos tipos de peças, com formatos e dimensões diferentes, deve-se haver um modo de atuar geral, que seja capaz de gerar informações comuns para todos os tipos de peças e componentes. A norma ASTM E1417 define que cada peça ou componente deve ter um procedimento específico, trazendo informações detalhadas da técnica adotada, ela fornece os requisitos para o procedimento geral e os manuais e boletins de serviços para o específico. Abaixo segue o que o procedimento específico deve conter segundo a ASTM E1417:

- Detalhes da limpeza e pré-limpeza, incluindo os materiais utilizados;
- Parâmetros de secagem e tempo das etapas do processo;
- Documentos utilizados;
- Classificação dos materiais;
- Parâmetros completos de todas as etapas do processo, incluindo os tempos, concentração, temperaturas, controles de todas as etapas e controles para evitar a secagem excessiva etc..

Formas a e b (reveladores secos e solúveis em água), não podem ser usados com o penetrante tipo II (visível). O penetrante tipo II não deve ser usado antes do tipo I na mesma superfície. Isto não se aplica para ensaios realizados durante a fabricação, pois a superfície ensaiada será trabalhada e poderá ser ensaiada posteriormente com o tipo I. A inspeção/vistoria de componentes críticos de turbina deve ser feitas somente com penetrantes Tipo I (fluorescente) e Métodos C e D (removíveis com solvente ou pós emulsificável hidrofílico), sendo que o penetrante deverá ter a sensibilidade 3 ou 4.

Ao iniciar o END o elemento deve estar totalmente limpo, seco, isento de óleo, graxa, tinta, corrosão ou camada que possa impedir a ação do penetrante e sem nenhum tipo de impureza sobre a superfície. Contaminantes tornam o ensaio não confiável. O material que será utilizado na limpeza do componente deve ser compatível com o contaminante a ser removido e em hipótese alguma deve ser nocivo ao componente. A tarefa de selecionar qual é o melhor tipo de penetrante e o método de remoção apropriado envolve um grau de dificuldade, pois exige conhecimento a respeito do processo de fabricação de cada elemento a ensaiar, as fissuras esperadas, o tipo de material, o peso e o tamanho. É recomendado utilizar o penetrante mais sensível, junto ao melhor método de remoção dos excessos.

Na aplicação do líquido é utilizado um pincel, lata de aerossol (como pode ser visualizado na Figura 1), pistola ou mesmo a imersão do produto que receberá o ensaio em tanques, em qualquer dos casos o líquido penetrante sempre é aplicado em excesso, toda a superfície deve ser coberta. As partes que não puderem ser afetadas pelo penetrante devem ser protegidas.



Figura 1 – Aplicação do líquido penetrante utilizando lata de aerossol.

Fonte: <http://www.faend.com.br/galeria/liquido6.jpg>

Depois de aplicado, deve-se aguardar algum tempo para realizar a penetração do líquido no interior das eventuais fissuras superficiais existentes, como, normalmente, elas são pequenas e estreitas, o fenômeno da capilaridade propicia a penetração, o tempo mínimo de penetração deve ser de 5 minutos, e em casos que exceda duas horas, o penetrante deve ser reaplicado para prevenir a secagem.



Figura 2 – Aguardando tempo de penetração do líquido.
 Fonte: <http://www.faend.com.br/galeria/liquido14.jpg>

Tabela 1 – Tempos mínimos de penetração recomendados pelo ASME Sec. V Art. 6.

Material	Forma	Tipo de Descontinuidade	Tempo de Espera	
			Penetrante	Revelador
Alumínio, magnésio, aço, bronze, titânio, altas ligas	Fundidos e Soldas	Porosidade, trincas, (todas as formas) falta de fusão, gota fria	5	7
Plásticos	Todas as formas	Trincas	5	7
Vidros	Todas as formas	Trincas	5	7
Cerâmicas	Todas as formas	Trincas, porosidades	5	7

Em seguida, remova o penetrante do produto por meio de lavagem com água ou remoção com solventes (não usar solvente em excesso, isto pode remover o penetrante da descontinuidade), um revelador (talco) mostra a localização das descontinuidades superficiais com precisão. O revelador deve ter a capacidade de absorver o penetrante da descontinuidade, de cobrir a superfície evitando confusão com a imagem do defeito, ser facilmente removível e não deve conter elementos prejudiciais ao elemento inspecionado e ao operador do ensaio. Se o penetrante for do tipo I, a remoção deve ser feita sob luz negra (Figura 3), para que seja possível controlar melhor o enxague.

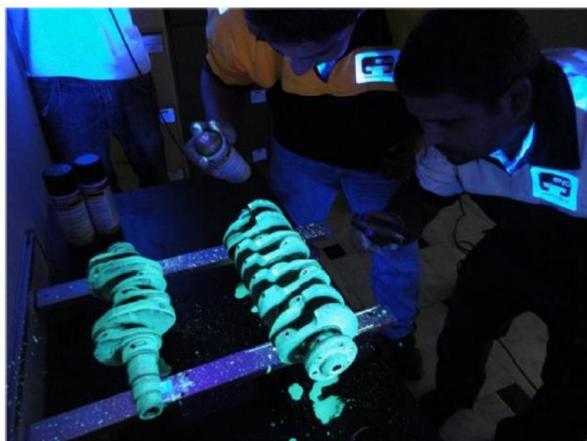


Figura 3 – Remoção do penetrante utilizando luz negra.
 Fonte: <http://www.faend.com.br/galeria/232012173538.JPG>

Se for do tipo II, visualmente se não constatar traços vermelhos na peça ou no pano utilizado, garante que houve uma completa remoção. Neste momento todo o líquido penetrante excedente é removido e permanece apenas aquele que penetrou nas fissuras (Figura 4).



Figura 4 – Descontinuidades destacadas na peça.

Fonte: <http://soudap.com.br/wp-content/uploads/2012/11/e.jpg>

Para o processo de inspeção, a norma ASTM E1417 diz que:

- Os componentes devem ser examinados (inspecionados) antes do tempo máximo de revelação, e se requerido em procedimento, deve ser monitorado durante o tempo de revelação.
- Componentes não inspecionados antes do tempo máximo de revelação, devem ser limpos e reprocessados.
- Se o intervalo entre a remoção do penetrante e a inspeção exceder 5 horas, o completo reprocessamento do componente é requerido.
- Para penetrantes do TIPO I: o tempo de adaptação ao escuro deve ser no mínimo de 1 minuto, antes de inspecionar os componentes. Tempos maiores para a adaptação ao escuro, deverão ser usados se necessário.
- O inspetor não deve usar óculos com lentes fotocromáticas ou com lentes escuras quando estiver processando ou inspecionando as peças sob luz negra.
- Todas as áreas de fluorescência devem ser interpretadas.
- Componentes sem indicações ou somente com indicações não relevantes devem ser aprovados.
- Componentes com indicações relevantes, devem ser avaliados de acordo com o critério de aceitação aplicável.
- Componentes com excessiva fluorescência de fundo, devem ser limpos e reprocessados.
- Para penetrantes do TIPO II: todas as indicações devem ser interpretadas.
- Componentes sem indicações ou somente com indicações não relevantes, devem ser aprovados.
- Componentes com indicações relevantes devem ser avaliados de acordo com o critério de aceitação aplicável.
- Componentes com excesso de fundo vermelho, dificultando o contraste e com a possibilidade de estar mascarando uma indicação verdadeira, devem ser limpos e reprocessados.

O resultado positivo deste END depende se é possível visualizar a descontinuidade ou não. Por esse motivo o líquido penetrante possui um corante, de cor vermelha, que pode ser analisado sob a luz branca, ou agente químico fluorescente, de cor amarelo-esverdeada, para ser analisado sob a luz ultravioleta. Ele pode ser aplicado durante ou no final do processo de fabricação e também durante a manutenção, para revelar o surgimento do que está oculto nas descontinuidades de serviço do produto. Todas as peças necessariamente devem ser limpas logo após o ensaio (Tabela 2), independente se o elemento foi aprovado ou rejeitado, apenas não necessita de limpeza as peças que tiver um destino onde os resíduos não causem nenhum tipo de problema.

Tabela 2 – Etapas de realização do ensaio.

Etapas do ensaio	Resumo
Preparação da superfície	Avaliação da superfície a ser examinada
Limpeza da superfície	A superfície deve estar limpa, normalmente utiliza-se um solvente para esse efeito
Aplicação do Penetrante	Consiste na aplicação do líquido penetrante, geralmente de cor vermelha ou fluorescente, para que toda a área de interesse seja coberta, formando um filme sobre a mesma
Remoção do excesso	Após aguardar o tempo de penetração, o líquido em excesso deve ser removido da superfície
Aplicação do revelador	Consiste na aplicação do revelador sobre a superfície da peça
Avaliação ou inspeção das indicações produzidas	A avaliação deve ser feita em boas condições de luminosidade, podendo esta ser feita com luz natural ou luz negra
Limpeza após o ensaio	É necessário limpar completamente a superfície da peça, para remover todos os resíduos das etapas anteriores

Todo o processo do END por líquido penetrante, desde a preparação da peça até a limpeza após ensaio, deve obrigatoriamente seguir os requisitos mínimos que são exigidos em suas respectivas normas, esse cuidado busca aumentar o grau de qualidade na realização do ensaio, bem como orientar o profissional a frente da tarefa.

2.7 VANTAGENS

É um tipo de ensaio muito fácil e prático de realizar, entretanto, Andreucci (2008) esclarece que “[...] Como a indicação assemelha-se a uma fotografia do defeito, é muito fácil de avaliar os resultados. Em contrapartida o inspetor deve estar ciente dos cuidados básicos a serem tomados (limpeza, tempo de penetração, etc), pois a simplicidade pode se tornar uma faca de dois gumes [...]”.

O sucesso do ensaio está sujeito a visibilidade da indicação da fissura, e entre suas vantagens, posso citar: é barata e não necessita de equipamentos sofisticados, pode detectar descontinuidades superficiais em fissuras minúsculas, possui a capacidade de examinar peças com várias formas e tamanhos diferentes e também áreas isoladas em uma superfície, a imagem da descontinuidade fica desenhada sobre a superfície, tornando fácil a interpretação, avaliação e é aplicado em uma grande quantidade de materiais, desde que não sejam porosos.

2.8 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

- A superfície deve estar completamente limpa e seca; não pode ser porosa ou absorvente;
- Excesso de ferrugem e rugosidade torna o ensaio não confiável;
- A aplicação deve ser feita em uma faixa de temperatura permitida pelo fabricante do produto, não muito fria ou muito quente;
- Os líquidos utilizados no END podem danificar alguns materiais ou ficarem permanentemente retidos em materiais porosos, além de causar irritação na pele do profissional que o manuseia.

O END por líquido penetrante é muito prático e de fácil execução, ele revela fissuras extremamente finas, pouco profundas e de largura apreciável (na ordem de 0,001 mm de abertura). Para as fissuras mais profundas, normalmente onde os líquidos não penetram ou onde a superfície não favorece a observação da revelação do desenho, são usados outros métodos de END, dentre eles pode-se citar as partículas magnéticas.

2.9 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8:

- **Avaliação das indicações:** Indicação é evidência de imperfeição mecânica. Devem ser consideradas relevantes somente as indicações que tenham dimensões maiores do que 1,6mm.
 - a) Indicação linear é a que apresenta um comprimento maior que três vezes a largura.
 - b) Indicação arredondada é a que apresenta formato circular ou elíptico, com comprimento igual ou menor que três a largura.
 - c) Quaisquer indicações questionáveis ou duvidosas devem ser submetidas a um reexame, para que se defina se as mesmas são relevantes ou não.
- **Padrões de aceitação:** Devem se aplicados os seguintes padrões de aceitação, exceto se outros padrões mais restritivos forem estipulados para aplicações ou materiais específicos, dentro dos limites desta Divisão. Todas as superfícies examinadas devem estar isentas de:
 - a) Indicações lineares relevantes
 - b) Indicações arredondadas relevantes, maiores do que 4,8mm
 - c) Quatro ou mais indicações arredondadas relevantes alinhadas, separadas por uma distância igual ou menor que 1,6mm, medidas entre bordas de indicações consecutivas.
 - d) A indicação de uma descontinuidade pode ser maior do que a própria descontinuidade; entretanto, a indicação é que deve ser utilizada para a aplicação do critério de aceitação.

3 CONCLUSÃO

A técnica de END utilizando líquido penetrante é útil para detectar poros, dobras e trincas que estão abertas na superfície e que aparentemente não demonstrava nenhum tipo de risco, ela pode ser utilizada em todos os tipos de materiais sólidos, desde que não sejam porosos e possuam alta rugosidade. É muito utilizado em material não magnético como alumínio, ligas de titânio, magnésio, aços inoxidáveis, vidro, cerâmica, plásticos e também em materiais magnéticos. Os ensaios por líquido penetrante exigem a correta aplicação das técnicas de ensaio e um grande conhecimento e prática para a interpretação e avaliação das indicações, conhecimento prévios sobre os documentos aplicáveis ao ensaio, o tipo de material, o processo de fabricação da peça e uma grande dose de bom senso, somando tudo isso à qualificação do profissional segundo as normas.

Ele é um método simples e muito eficiente, pois consiste em um líquido penetrar na descontinuidade da peça e após a remoção do excesso desse líquido da superfície, através de um revelador, a imagem da descontinuidade fica desenhada sobre a superfície. O que pode prevenir acidentes, diminuir os custos, aumentar o nível de confiabilidade e obter informações de reparo, por isso os resultados de todos os ensaios obrigatoriamente devem ser registrados e arquivados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS -ASME Boiler and Pressure Vessel
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Metals Handbook*, 8ed, vol. 8, Metals Park, 1973, p.207
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS, ASTM E1417, ASTM, Philadelphia, 1980.
- ANDREUCCI, R. *Ensaio por líquidos penetrantes*. ABENDE Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos. São Paulo, 2008. 68 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT 1591:2009, NBR 8407:2007, ABNT, Rio de Janeiro, 1969.
- BRAY, D. E.; McBRIDE, D. *Nondestructive Testing Techniques*. NY. A Wiley-Interscience Publication, 1992.765p.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. *Ensaios dos Materiais*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora. UNICAMP, Campinas. 2000.
- MAC Master R ; *Non Destructive Testing Handbook*, N.York, Ronald Press,
- Sakamoto, A, *Ensaio por Líquidos Penetrantes*, ABENDE

Antonio Faria Neto

Universidade Estadual Paulista
antfarianeto@gmail.com

Francisco Antonio Lotufo

Universidade Estadual Paulista
falotufo@feg.unesp.br

Leonardo Mesquita

Universidade Estadual Paulista
mesquita@feg.unesp.br

**Antonio de Pádua da Cunha
Coelho**

Universidade de Taubaté
paduapatentes@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO AO ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA

RESUMO

Pode-se afirmar com segurança que as baterias, tanto as células primárias, como as células secundárias são a forma mais popular de armazenamento de energia e sua aplicação vem aumentando de forma significativa ao longo das últimas décadas, estando ainda longe de alcançar o seu ápice. Apesar da crescente aplicação das baterias e do montante dos negócios envolvidos nesta área os cursos de engenharia elétrica ainda não oferecem cursos voltados para a aplicação de baterias. O objetivo deste artigo é apresentar uma resenha envolvendo os principais conceitos que abrangem o tema sem a profundidade requerida por um físico, químico ou engenheiro de materiais, mas que sejam suficientes para que o Engenheiro Eletricista seja capaz de acompanhar as principais novidades tecnológicas na área; especificar corretamente uma bateria para uma dada aplicação e entender e vislumbrar novas aplicações para esses dispositivos.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, células primárias, células secundárias, Baterias.

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

1 INTRODUÇÃO

Uma vez que a eletricidade não pode ser armazenada diretamente, exceto em capacitores ou bobinas supercondutoras, é necessário utilizar uma forma indireta de armazenamento. É possível converter a energia elétrica em energia potencial, em energia cinética, em energia térmica ou em energia química. Uma forma de armazenamento de energia química é o hidrogênio, gerado por eletrólise, o qual pode ser armazenado e subsequentemente reconvertido em eletricidade numa célula combustível. Tais dispositivos, como as baterias, são dispositivos de conversão de energia. Contudo, estes dispositivos não estão no escopo deste trabalho.

Pode-se afirmar que as baterias são uma forma conveniente de armazenar energia elétrica, uma vez que podem ser fabricadas em diversos tamanhos, podem ser associadas formando bancos de baterias de diversas capacidades, são capazes de suprir potência elétrica imediatamente, são portáteis e permitem uma diversa gama de aplicações. As baterias podem ser classificadas em duas grandes categorias, a saber, baterias primárias, as quais podem ser utilizadas em uma única descarga; baterias secundárias, que podem ser recarregadas e reutilizadas. O ciclo de carga/descarga pode ser repetido até que a capacidade de armazenamento se deteriore e fique abaixo de um nível mínimo considerado razoável.

O uso de baterias aumentou significativamente ao longo do último século, atualmente, baterias primárias ou secundárias são empregadas em um grande número de eletrodomésticos. Ao mesmo tempo o desenvolvimento da ciência dos materiais e da tecnologia proporcionou projetos e construções mais avançados de baterias com elevado desempenho.

Mas as baterias recarregáveis não ficaram restritas a aplicações domésticas, elas se desenvolveram em tamanho e capacidade para atender outras necessidades, como por exemplo, as baterias de chumbo-ácido utilizadas para dar partida em motores à combustão. Com os veículos se tornando cada vez mais sofisticados, o número de motores e de outros dispositivos elétricos aumentou, fazendo com que a demanda sobre a bateria também aumentasse. Tal aumento chegou ao ponto de serem necessárias duas baterias, uma para dar partida no motor à combustão e outra para atender aos demais dispositivos elétricos.

Houve também uma proliferação na demanda por baterias de maior porte. Uma de suas aplicações reside nos equipamentos de suprimento ininterrupto de potência. Tal equipamento requer um banco de baterias a fim de que, no caso de uma falta elétrica, a energia elétrica continue sendo suprida até que um gerador entre em operação e seja capaz de suprir toda a demanda por energia. Outras aplicações de porte semelhante são encontradas em sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica, etc.

Embora muitas dessas aplicações utilizem as já estabelecidas baterias recarregáveis de chumbo-ácido ou níquel-cromo, baterias utilizando novas químicas têm sido colocadas no mercado.

Outro fato marcante é que a faixa de capacidade das baterias aumentou significativamente. Esta escala de tamanho vai desde as células botão (0,1 Wh) até as baterias aplicadas ao nivelamento de carga (10 MWh).

Apesar da crescente aplicação das baterias e do montante dos negócios envolvidos nesta área os cursos de engenharia elétrica ainda não oferecem cursos voltados para a aplicação de baterias. O objetivo deste artigo é apresentar os principais conceitos que envolvem o tema sem a profundidade requerida por um físico, químico ou engenheiro de materiais, mas que sejam suficientes para que o Engenheiro Eletricista seja capaz de acompanhar as principais novidades tecnológicas na área; especificar corretamente uma bateria para uma dada aplicação e entender e vislumbrar novas aplicações para esses dispositivos.

Este trabalho não traz nenhuma novidade, mas visa apresentar didaticamente o tema, em língua portuguesa, tratando-se de uma resenha de Dell e Rand (2001).

2 CONCEITOS E TERMINOLOGIAS BÁSICOS

Uma célula eletroquímica é um dispositivo para geração de eletricidade. Ela consiste de um eletrodo positivo e um eletrodo negativo, separado por um eletrólito que é capaz de conduzir íons entre os dois eletrodos, mas que é em si um isolante para o fluxo de elétrons. Se o eletrólito fosse um condutor para os elétrons ele se comportaria como um curto-circuito interno, provocando a auto-descarga da bateria. A maioria dos eletrólitos são soluções ácidas, alcalinas ou salinas. Outros condutores iônicos que têm sido empregados como eletrólitos são soluções de sais orgânicos, polímeros, cerâmicas e sais fundidos.

Quando duas ou mais células são associadas eletricamente, em série, em paralelo, ou ainda em série-paralelo, o arranjo final resultante é denominado de bateria. A rigor o termo bateria só deveria ser empregado para arranjos com várias células. Contudo, no cotidiano é comum chamar-se dispositivos constituídos de uma única célula de bateria, principalmente em se tratando de células primárias.

Quando diversas baterias são associadas entre si para aumentar os requisitos de potência e energia, o arranjo resultante é denominado de banco de baterias.

3 REAÇÕES QUÍMICAS NA CÉLULA ELETROQUÍMICA

Os componentes essenciais de uma célula eletroquímica são: os eletrodos; um separador e um *container* para abrigar todo o conjunto. Os eletrodos positivo e negativo devem estar o mais próximo possível um do outro a fim de minimizar a resistência interna da célula, que, tipicamente, é da ordem de miliohms ($m\Omega$). Mesmo para eletrólitos de alta condutividade, esta baixa resistência só é possível quando a separação entre os eletrodos é da ordem de 1 mm. Para manter uma distância tão pequena entre os eletrodos, estes são separados por meio de um material isolante fino e poroso, denominado separador, cujo papel é prevenir o contato elétrico entre os eletrodos. Os poros do separador são preenchidos com o eletrólito de modo que a corrente iônica flua através desses poros.

Cada eletrodo é composto de duas partes, uma delas chamada de material ativo (ou massa ativa), que é onde efetivamente ocorre a reação química; e a outra é a parte metálica sobre a qual a massa ativa é montada e que é responsável pela condução da corrente elétrica para o meio externo e que é chamada de coletor de corrente, conforme ilustrado na Fig. 1.

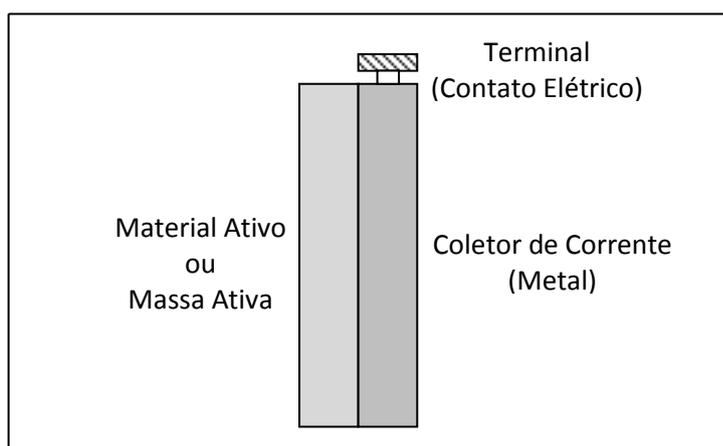


Figura 1. Perfil de um eletrodo de uma célula eletroquímica

As reações químicas que geram eletricidade ocorrem nos dois eletrodos. Cada eletrodo é responsável por metade da reação da célula. A corrente elétrica produzida externamente à bateria é devida à diferença de potencial dos eletrodos. Durante a descarga, ocorre uma reação de oxidação (ou reação anódica), no eletrodo negativo, com a liberação de elétrons, que fluem para o meio exterior através da carga no sentido do eletrodo positivo, onde ocorre uma reação complementar denominada de reação de redução, com a absorção de elétrons.

A reação no eletrodo negativo pode ser representada pela equação (1):



No eletrodo positivo a reação pode ser representada pela equação (2):



Onde M é um metal; X é um agente oxidante, um óxido metálico em alto estado de valência e e^{-} representa um elétron.

Quando a célula eletrolítica opera em descarga ela é chamada de célula galvânica, e quando esta sendo carregada ela é chamada de célula de eletrólise. A Fig. 2 ilustra uma célula eletrolítica sendo carregada e descarregada, bem como a movimentação das cargas elétricas envolvidas.

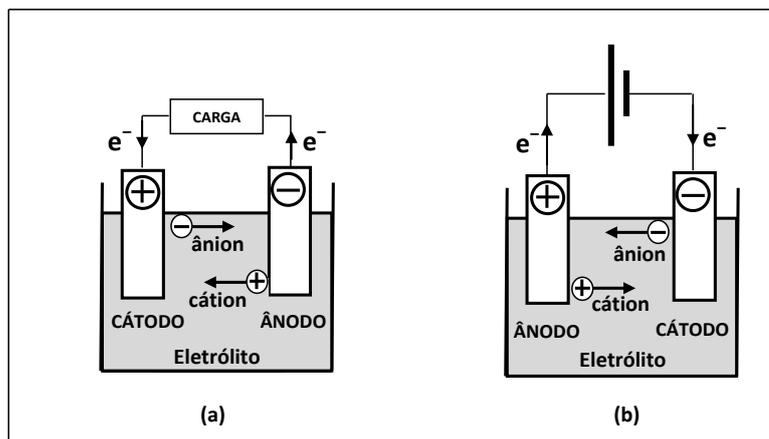


Figura 2. (a) Célula eletrolítica (galvânica) durante a descarga. (b) Célula eletrolítica (eletrólise) durante a carga.

Os metais típicos utilizados como material ativo para o eletrodo negativo são o zinco (Zn), o cádmio (Cd), o chumbo (Pb) e o lítio. A massa ativa tipicamente utilizada no eletrodo positivo pode ser um óxido como, por exemplo, o óxido de manganês (MnO₂), o óxido de níquel ou o óxido de chumbo (PbO₂), todos em alto estado de valência; sulfetos ou haletos metálicos. As diferentes combinações desses materiais dão origem aos diferentes tipos de baterias, e esse conjunto é comumente referido como química das células. É importante mencionar que sendo a condutividade eletrônica da massa ativa do eletrodo positivo baixa, é comum misturar esse material com uma substância condutiva tal como o grafite.

Quanto ao eletrólito, pode-se reafirmar que sua única função é conduzir os íons de um eletrodo a outro, não sendo comum tomar parte nas reações químicas de qualquer um dos eletrodos. Uma exceção é a bateria chumbo-ácido.

A tensão de uma célula é a diferença de potencial entre os eletrodos, ou seja, a diferença entre os potenciais de cada uma das massas ativas. É importante observar que não se pode determinar o potencial absoluto de qualquer eletrodo, uma vez que qualquer método prático de medida de diferença de potencial dependeria de um segundo eletrodo. Portanto, o potencial de todos os eletrodos é determinado em relação a um eletrodo padrão (hidrogênio) em condições padrões.

A diferença entre os eletrodos de potencial positivo e negativo resulta numa d.d.p. denominada de tensão reversível (V_r) ou tensão de circuito aberto da célula. Sob condições padrões, esta é a tensão padrão da célula (V_o).

4 CARGA E DESCARGA DA CÉLULA

A tensão de uma bateria medida sob carga é menor do que aquela medida em circuito aberto. Isso ocorre devido à impedância interna da bateria, que é formada por:

Perdas por polarização nos eletrodos;

Perdas ôhmicas ocorridas nos eletrodos, tanto no coletor de corrente como na massa ativa, e no eletrólito.

A medida de quanto o potencial de um eletrodo se afasta de seu potencial de equilíbrio é denominada de sobrepotencial do eletrodo (η). Este sobrepotencial é composto por duas partes:

Sobrepotencial de ativação - causado por limitações cinéticas do processo de transferência de carga no eletrodo; é uma propriedade intrínseca do material do eletrodo imerso no eletrólito, isto é, trata-se de um fenômeno de interface.

Sobrepotencial de concentração - resulta da depleção dos reagentes nas vizinhanças do eletrodo devido à difusão lenta da solução; é uma propriedade que depende da espessura e porosidade do eletrodo, bem como dos processos de transporte no eletrólito.

Juntos, esses dois sobrepotenciais resultam em uma queda de tensão nos eletrodos, a qual é denominada perda por polarização, e o eletrodo é dito polarizado.

As perdas por polarização ocorrem em ambos os eletrodos e são responsáveis pela diminuição da tensão da célula durante a descarga (V_d) e por um aumento da tensão da célula durante a carga (V_c), conforme ilustram (3) e (4).

$$V_d = V_r - \eta_+ - \eta_- - IR \quad (3)$$

$$V_c = V_r + \eta_+ + \eta_- + IR \tag{4}$$

Onde η_+ e η_- são os sobrepotenciais dos eletrodos positivo e negativo, respectivamente.

A Fig. 3 ilustra a representação esquemática das Equações (3) e (4).

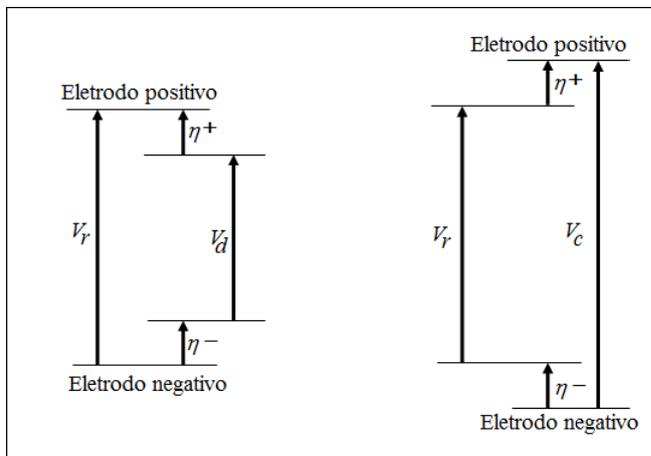


Figura 3. Representação esquemática das equações (3) e (4).

Para baixos sobrepotenciais, a relação entre η e a corrente I é aproximada pela Lei de Ohm, de modo que (3) e (4) podem ser reescritas como:

$$V_d = V_r - IR' \tag{5}$$

$$V_c = V_r + IR' \tag{6}$$

onde R' é a soma das resistências internas da célula e as resistências dos sobrepotenciais de ativação e concentração em ambos os eletrodos.

A Fig. 4 apresenta algumas curvas experimentais para a carga e descarga de uma pequena célula de sódio-cloreto metálico. Observa-se de imediato na Fig. 4, que a tensão nos terminais da célula é inferior à tensão reversível de 2,35V, e que a tensão durante a carga da bateria se eleva acima desse valor. O desvio da tensão V_r é a influência combinada da resistência interna e das perdas de polarização. À medida que a corrente de carga/descarga aumenta, esse desvio torna-se cada vez maior.

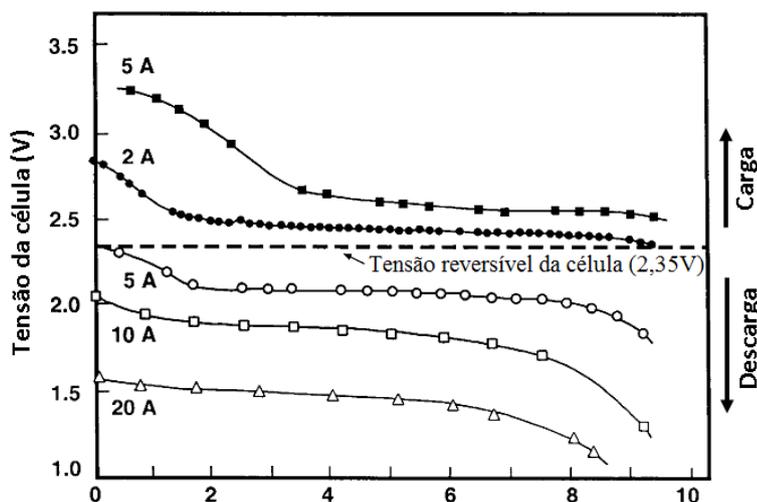


Figura 4. Curvas experimentais para a carga e descarga para uma célula de sódio-cloreto metálico de 7,7Ah (os símbolos abertos representam descarga; símbolos fechados representam carga).

Observa-se também na Fig. 4, que à medida que a célula/bateria se descarrega, a tensão em seus terminais vai diminuindo até atingir um valor denominado tensão de corte, que é a tensão abaixo da qual se pode considerar a célula/bateria descarregada. O perfil da tensão durante a descarga de uma célula/bateria não é o mesmo para todos os tipos de células/baterias. Algumas delas têm uma curva de descarga bastante plana, particularmente para baixas correntes de descarga, com uma queda abrupta da tensão quando o fim da descarga se aproxima. Esse é o caso, por exemplo, da célula de sódio apresentada na Fig. 4. Nesses casos é relativamente simples definir o ponto final da descarga. Para muitas outras baterias, a tensão de descarga declina progressivamente e o ponto final de descarga é definido arbitrariamente, como ocorre com as baterias de chumbo-ácido, conforme ilustrado na Fig. 5.

5 CAPACIDADE DE UMA CÉLULA/BATERIA

Se uma célula/bateria for descarregada a uma corrente constante, a sua capacidade de armazenamento é o produto da corrente pelo número de horas (Ah), para o qual a célula/bateria pode ser descarregada até que a tensão em seus terminais atinja a tensão de corte. Se a corrente não for constante, a capacidade de armazenamento é a integral da corrente ao longo do tempo de descarga. No sistema internacional de unidades 1Ah é igual a 3600 C.

É importante salientar que a capacidade de armazenamento depende de vários fatores, entre eles a temperatura ambiente, o histórico de cargas/descargas da célula e da taxa de descarga, ou seja, quanto maior a taxa de descarga empregada menor a capacidade de armazenamento.

Para ilustrar a influência da taxa de descarga na capacidade da bateria, considere a Fig. 5 que mostra uma família de curvas de descarga de uma bateria de chumbo-ácido com capacidade nominal de 100Ah quando descarregada em 5h. Cada uma das curvas apresenta a corrente a que a bateria foi descarregada e o tempo de descarga, isto é, o tempo decorrido até que a tensão no terminal da bateria alcance o valor de corte previamente definido.

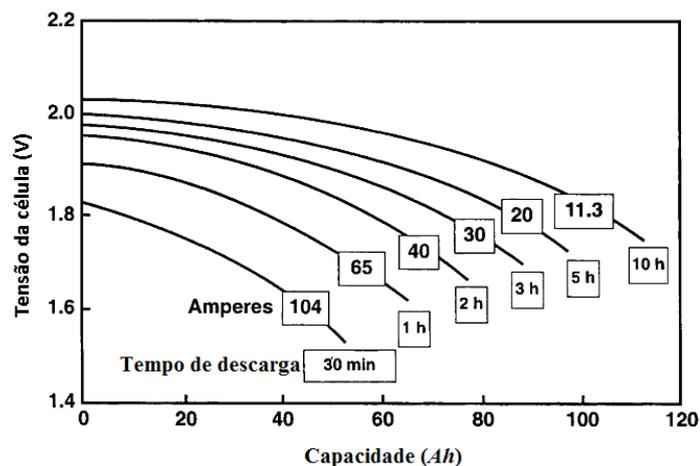


Figura 5. Curvas de descarga para uma bateria chumbo-ácido de 100Ah a uma taxa de descarga de 5h.

Pode ser visto na Fig. 5 que a capacidade fornecida pela bateria para uma descarga em um intervalo de tempo de 30 minutos, para uma tensão de corte de 1,7V, é de aproximadamente 30Ah, ou seja, é menor do que aquela apresentada para a descarga ocorrida durante 5h. De forma análoga, pode-se observar que quando o tempo de descarga é de 10h, a capacidade de armazenamento alcança um valor cerca de 20% maior do que o nominal. A Fig. 6 ilustra a leitura desses valores.

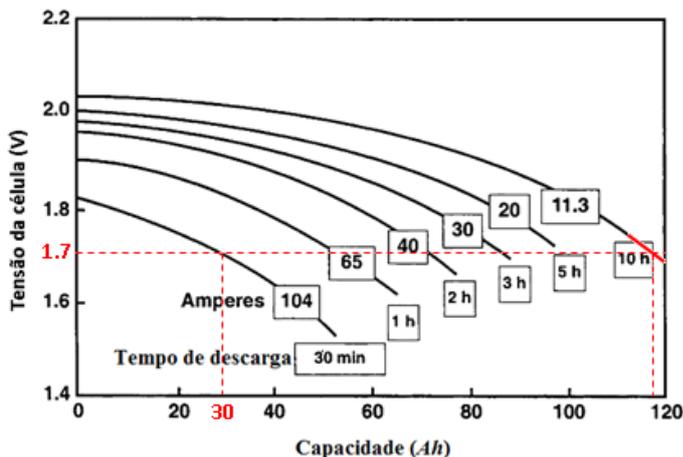


Figura 6. Capacidade de uma bateria chumbo-ácido de 100Ah a taxas de descarga de 30 min e 10h.

Também é importante notar nas Figs. 5 e 6 que a tensão de operação da célula diminui acentuadamente quanto mais elevada for a taxa de descarga. Isso ocorre por causa do fenômeno de polarização, já discutido anteriormente.

Os fabricantes especificam a capacidade nominal de uma célula, ou bateria, sob algumas condições de descarga, como a duração da descarga, em geral 5h; a temperatura em que ocorre a descarga (25 °C) e a tensão de corte, ou seja, a tensão abaixo da qual a bateria é considerada descarregada. Em geral, os fabricantes informam a capacidade de uma bateria da forma C/t, onde C significa a capacidade da bateria em Ah e t é o tempo de descarga da bateria. Assim, C/5 é a capacidade da bateria para um tempo de descarga de 5h, enquanto que 2C significa a capacidade para um tempo de descarga de 30 min. Um refinamento é expressar a taxa de descarga como C_x/t , onde x é o tempo de descarga para o qual a capacidade foi definida. Por exemplo, $C_{5/5}$ é a taxa de descarga de uma bateria cuja capacidade medida em 5h é C_5 . Assim, a taxa $C_{5/5}$ é 20A para uma bateria de capacidade nominal de 100Ah para um tempo de descarga de 5h. A descarga da mesma bateria a uma corrente constante de 50A, poderia ser representada por $C_5/2$.

O montante de carga retirada da bateria comparada com o montante total disponível para a mesma taxa de descarga é chamado de profundidade de descarga (em inglês *depth-of-charge* – DoD), geralmente expresso em porcentagem. Outro conceito importante é o de estado de carga da bateria (em inglês *state-of-charge* – SoC), que é uma fração da capacidade total da bateria, expressa em porcentagem, é a carga ainda disponível para descarga. O estado de carga e a profundidade de descarga estão relacionados conforme a equação (7).

$$SoC\% = (100 - DoD\%) \tag{7}$$

Outro termo que é bastante empregado, sobretudo quando se fala de eletrodos é a densidade de corrente, que é a corrente por unidade de área do eletrodo, geralmente expressa em mA/cm² ou mA cm⁻².

Para baterias de pequeno porte, utilizadas em aparelhos eletroportáteis, é usual medir sua capacidade em horas de uso como uma função de uma carga resistiva. Por exemplo, a Fig. 7 ilustra as curvas de descarga para uma célula primária alcalina de manganês tamanho AA, em função da carga resistiva aplicada a ela para uma tensão de corte de 0,8V a uma temperatura de 21°C. A vida útil varia de 140h para uma carga de 62Ω até 8h para uma carga de 3,9Ω.

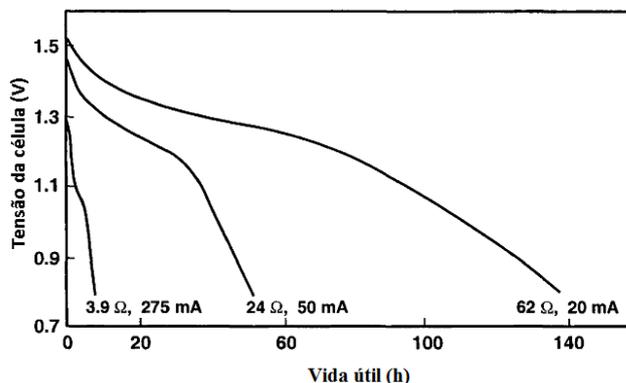


Figura 7. Curvas de descarga para uma célula primária alcalina-manganês, tamanho AA

6 ENERGIA E POTÊNCIA ESPECÍFICAS E DENSIDADES DE ENERGIA E POTÊNCIA

Os conceitos de energia específica e densidade de energia são importantes quando se deseja comparar baterias, sobretudo quando o volume e o peso da bateria se tornam características importantes para a aplicação em questão.

A energia específica, também denominada densidade gravimétrica de energia, é definida como energia armazenada por unidade de massa, expressa em Whkg^{-1} . Já a densidade de energia ou densidade volumétrica de energia é definida como a energia armazenada por unidade de volume, expressa em Whl^{-1} , ou Whdm^{-3} .

Outro termo importante é a energia específica teórica de uma bateria. Este parâmetro é calculado para a célula reversível, o número de elétrons transferidos na reação da célula e a massa dos materiais ativos. Não leva em consideração a massa dos componentes inertes da bateria, tais como o *container* das células, os coletores de corrente, os barramentos, os separadores e o eletrólito. A energia específica prática de uma bateria é, normalmente, de 4 a 5 vezes menor do que a energia específica teórica. A utilidade da energia específica teórica é permitir a comparação de células com diferentes químicas antes de se construir a bateria.

De forma análoga à energia, é possível definir potência específica (Wkg^{-1}) e densidade de potência (Whl^{-1} , ou Whdm^{-3}). Dependendo da aplicação, os requisitos podem ser para o suprimento contínuo de potência, picos de potência por um curto período de tempo (1 a 10 min), ou pulsos de potência com duração máxima de 1s. A potência de saída de uma bateria não é determinada apenas por sua química, mas também por seu projeto e construção, tanto que é possível construir, com a mesma química, células das mais variadas potências de saída.

Infelizmente, há uma solução de compromisso entre potência de saída e energia armazenada. Quanto maior for a potência disponível, menor será a energia armazenada. A razão fundamental para isso é que alta potência de saída requer uma célula com baixa resistência interna e baixa polarização de eletrodo. Isto por sua vez requer eletrodos finos com grandes superfícies e acondicionados bem próximos uns dos outros. Isso implica em que os coletores de corrente dos eletrodos, os separadores, etc. se constituam em uma grande fração da massa e do volume da célula, enquanto o material ativo representa uma fração menor. Assim, a energia específica e a densidade de energia de uma célula de alta potência são menores do que aquelas para uma célula convencional de mesma química. A título de exemplo, a Tab. 1 apresenta uma comparação entre dois tipos de baterias de níquel-cádmio utilizadas para tração.

Tabela 1. Energias e potências de pico específicas para uma bateria de Ni-Cd para tração

Parâmetro	Célula Padrão	Célula de Alta Potência
Capacidade nominal (Ah)	100	56
Energia específica (Wh kg^{-1})	55	35
Potência de pico específica (W kg^{-1})*	120	220

*medida a DoD de 80%.

Observando a Tab. 1 vê-se que a bateria de alta potência tem uma potência de pico 83% maior do que o modelo tradicional, à custa de uma perda 36% na energia armazenada.

A título de ilustração uma bateria de alta potência estaria voltada a aplicações em veículos elétricos híbridos, onde um pequeno motor a combustão interna fornece autonomia ao veículo enquanto que a bateria alimenta um reforço na potência de tração por curtos períodos de tempo, por exemplo, durante ultrapassagens ou subidas. A versão padrão da bateria se aplica aos veículos elétricos tradicionais onde se requer da bateria tanto autonomia, quanto potência.

Na prática a máxima potência contínua fornecida por uma bateria é limitada por questões térmicas, especialmente em se tratando de bancos de bateria onde as baterias são dispostas muito próximas umas das outras, fato que faz com que as perdas por efeito Joule aumentem ainda mais a temperatura ambiente, criando a necessidade de aumentar a dissipação de calor, que em alguns bancos é feita pela circulação forçada de ar, ou até mesmo pela circulação de líquido refrigerante.

Para a descarga de potência pulsada, os efeitos térmicos não são tão significativos, de modo que altas potências podem ser fornecidas durante curtos intervalos de tempo. Algumas das modernas células de íons de lítio apresentam uma excepcional capacidade de fornecer um pulso de potência. Por exemplo, uma célula de 6,5Ah, quando totalmente carregada, é capaz de fornecer pulsos de potência da ordem de $1,5\text{kWkg}^{-1}$ (3kWdm^{-3}).

7 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DA BATERIA

Outro ponto bastante importante que deve ser considerado para a utilização das baterias é a faixa de temperatura dentro da qual elas irão operar. A maioria das baterias opera satisfatoriamente entre 15 e 30°C. À medida que a temperatura de operação se afasta desta faixa seu desempenho se deteriora, especialmente para baixas temperaturas. Para ilustrar esta característica a Fig. 7 apresenta a variação da energia específica de três células primárias, todas com eletrodo negativo de zinco, em função da temperatura ambiente.

Em cada um dos três tipos de bateria, a energia máxima é alcançada por volta dos 40°C. À medida que a temperatura se afasta deste ponto de máximo há uma degradação acentuada no desempenho das baterias, sobretudo para temperaturas baixas, o que se mostrou mais crítico para as células de zinco-óxido de mercúrio e zinco-carbono, que se tornam praticamente inúteis para temperaturas abaixo de 0°C.

A Fig. 8 ilustra o desempenho de uma célula de lítio-dióxido de manganês com eletrólito orgânico capaz de operar até em temperaturas da ordem de -40°C.

Muitas baterias, particularmente aquelas com eletrólito aquoso, sofrem uma autodescarga lenta quando armazenadas, obviamente em circuito aberto. A taxa em que isso ocorre depende de fatores como a química da bateria, sua construção e especialmente da temperatura de armazenamento. Normalmente a taxa de auto descarga aumenta à medida que a temperatura aumenta.

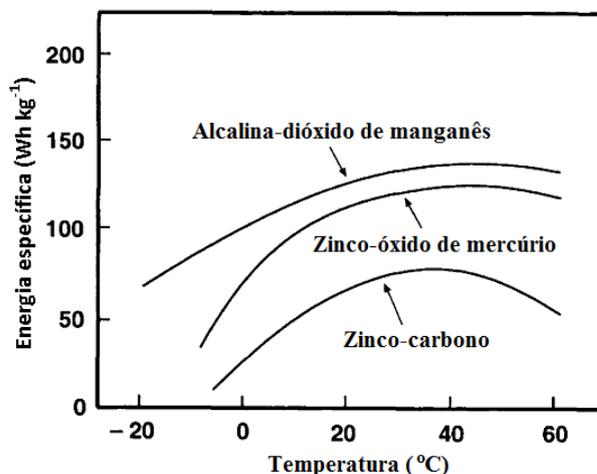


Figura 7. Energia específica de diferentes células primárias em função da temperatura.

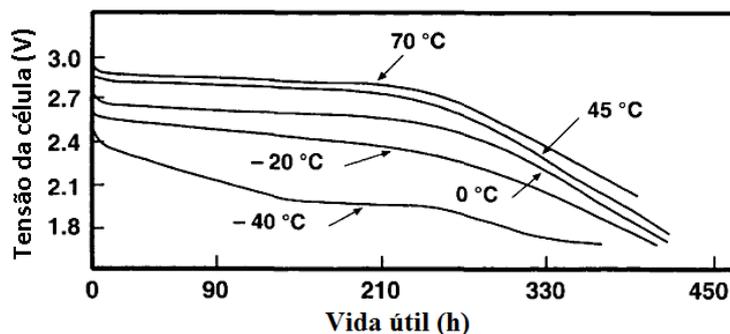


Figura 8. Curvas de descarga para uma célula de lítio-dióxido de manganês

8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TAXA DE RECARGA

Ao se descarregar uma bateria secundária, o montante de eletricidade recuperado é sempre menor do que aquele utilizado para carregar a bateria. A eficiência elétrica ou eficiência energética do ciclo carga/descarga pode ser definida como a razão entre a energia retirada da bateria e a energia utilizada para carregar a bateria. As perdas elétricas associadas com o ciclo de carga/descarga são compostas por duas partes:

- Eficiência coulombica. Esta perda está associada à corrente desperdiçada nas reações químicas, que não estão diretamente relacionadas com a produção de energia, tais como decomposição do eletrólito dando origem a formação de gases; corrosão dos componentes da bateria; etc.
- Eficiência voltaica. Conforme mostrado na Fig. 3 a tensão requerida para o carregamento da bateria é sempre maior do que a tensão de descarga, e a diferença entre elas, é a medida da ineficiência de todo o processo. Essa ineficiência está relacionada com a resistência interna da célula e com as perdas devido à polarização dos eletrodos. Quanto maior for a corrente durante a carga ou a descarga maior será o desvio da tensão terminal em relação à tensão reversível da célula, isto é, a tensão de circuito aberto.

O produto da eficiência coulombica pela eficiência voltaica fornece a eficiência global da bateria para uma dada condição de operação. A eficiência global da bateria não depende, somente, das taxas de carga e descarga e da temperatura, mas também das particularidades dos semiciclos de carga e descarga, uma vez que as perdas não se mantêm constantes durante todo o processo. Por exemplo, durante o processo de carga, quando a bateria se aproxima de sua carga máxima, aumenta o volume de gás liberado pela reação, diminuindo, desta forma, a eficiência coulombica. Ao mesmo tempo, o efeito de polarização dos eletrodos aumenta, levando a uma redução na eficiência voltaica. Quando a bateria está operando em regime de sobrecarga, há somente a decomposição do eletrólito o que leva a eficiência coulombica a zero. De maneira análoga, quando a bateria está operando em regime de sobredescarga destacam-se reações outras que não aquelas responsáveis pela produção de energia, de modo que a eficiência global da bateria também diminui drasticamente.

Para baterias operando em torno de suas condições nominais a eficiência coulombica gira em torno de 90% e a eficiência global gira em torno de 50 a 75%, de conformidade com as taxas de carga e descarga empregadas.

Outra consideração importante é o tempo gasto para recarregar uma bateria. As taxas de recarga recomendadas pela maioria dos fabricantes são substancialmente menores do que as taxas de descarga comumente empregadas. Contudo, muitas vezes deseja-se uma recarga rápida. Embora, para diversos tipos de baterias, seja possível um tempo menor de recarga, sem a ocorrência de danos, tal prática não é compatível com uma política de alta eficiência, embora a perda de eficiência possa ser mitigada se a bateria for carregada rapidamente até 80% de sua capacidade nominal e os outros 20% restantes forem carregados no regime normal.

9 VIDA ÚTIL DE UMA BATERIA

A vida útil de uma célula primária é normalmente definida pelo ponto final da tensão na parte mais íngreme da curva de descarga. Uma vez descarregada além desse ponto a célula é descarregada.

As células secundárias exibem uma perda gradual de desempenho, até que já não seja mais possível a sua utilização. Sendo assim, a vida operacional de uma bateria pode ser definida cronologicamente (anos/horas de uso), ou em termos do número de ciclos de carga-descarga (ciclo de vida da bateria). O fim da vida útil pode ser considerado o ponto no qual a capacidade da bateria esteja abaixo de um nível aceitável, ou o ponto no qual a capacidade máxima de potência a 80% DoD seja inferior a 80% de seu valor inicial.

O número de ciclos de carga/descarga de uma bateria é criticamente dependente do regime de carga/descarga a que está submetida à bateria, isto é, ao histórico de carga/descarga. Ciclos de descarga profunda e sobrecarga diminuem consideravelmente a vida útil da bateria. O contrário também é verdadeiro, ciclos de descargas rasos aumentam a vida útil da bateria. Quando são requeridas descargas profundas regulares, a maioria dos fabricantes recomenda que ela não exceda 80% da capacidade nominal da bateria.

10 CONCLUSÕES

Pelo exposto neste trabalho fica claro que a especificação de uma bateria para uma determinada finalidade não é imediata e envolve muitos pontos, tais como tensão nominal, capacidade nominal, dimensões, desempenho e custo. O desempenho técnico depende da aplicação destinada à bateria e para estimá-lo é necessário antecipar o ciclo de trabalho a ser atendido. A especificação de uma bateria pode ser definida em atributos vitais, aqueles que são indispensáveis; e atributos desejados, aqueles que devem ser avaliados considerando-se o custo e a capacidade de armazenamento. Entre as principais características que podem ser requeridas das baterias pode-se citar: um platô de tensão estável sobre uma boa profundidade de carga; alta energia específica e alta densidade de energia; alta potência de pico por unidade de massa e de volume; operação em uma faixa de temperatura bastante ampla; alta eficiência de energia; elevado número de ciclos de carga/descarga com profundidade de descarga; passível de carga rápida; boa retenção de carga em circuito aberto; capacidade de suportar sobrecarga e sobredescarga; confiabilidade de operação; pouca manutenção e, finalmente, robustez.

REFERÊNCIA

DELL, Ronald M.; RAND, David A. J. *Understanding Batteries*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2001. 223 p.

Jan Mateu Armengol

State University of Campinas
jan@fem.unicamp.br

Carlos Salinas Sedano

State University of Campinas
csalinas@fem.unicamp.br

DETERMINATION OF THE COMPLEX POTENTIAL FLOW AROUND TWO PARALLEL AIRFOILS

ABSTRACT

This paper aims to present a methodology to calculate the complex potential flow around two parallel airfoils. For this purpose, the complex potential flow around two circular cylinders is determined based on the Circle Theorem. Thereafter, a double application of the Joukowski Conformal Transformation transforms the two circular cylinders into the two airfoils. Moreover, the circulation around the airfoils is determined according to the Kutta Condition. To validate the formulation, the stream function over different configurations is presented and then the streamlines identifying the body surfaces are verified.

Keywords: Potential Flow, Complex Variables, Joukowski Transformation, Airfoil, Circle Theorem.

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profª. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

1 INTRODUCTION

The procedure presented in this paper could be divided in two main steps. The initial one of them consists in the determination of the potential flow past two circle cylinders. Regarding this solution, hardly any analytical results exist. Despite Burnside [1], D.G. Crowdy [2] who gets an analytical solution based on the circle domains and Williams [3] who gets the solution based on the work of W. Müller [4] for two lifting circles.

The two circles are then transformed into two parallel airfoils based on of the Joukowsky Conformal Transformation. Once the solution is established, pressure and velocity distributions around the airfoil are easily determined. Also, to calculate the forces experimented on the airfoil due to the flow it could be use, for example, the famous *Balsius formula* for the force acting on two-dimensional body in an inviscid flow.

Therefore, the target of this study is to solve complex potential flow around two parallel airfoils using the method of complex variables, the Joukowsky Transformation and the Circle Theorem. Complex formulation of potential flow is in Warsi [5]. This achievement could be applied, for instance, in general turbo machinery field to study the flow behaviour between compressor's or turbine's blades.

2 MATHEMATICAL FORMULATION

2.1 Method of Complex Variables

This method is very powerful for two-dimensional steady irrotational inviscid and incompressible flows. The complex potential function is defined as $w(z) = \phi(x,y) + i\psi(x,y)$, where $i = \sqrt{-1}$ and $z = x + iy$. Thus, both ϕ and ψ , which are the real and imaginary parts of the analytic function $w(z)$, satisfy the Laplace equation. We now define the conjugate complex velocity as $\bar{V} = u - iv$.

The basic linear analytic functions for inviscid flows used in this paper are:

$$\text{Uniform flow. } w_{flow}(z) = \bar{V}_{\infty} z, \quad (1)$$

$$\text{Flow due to a point vortex. } w_{vor}(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln(z), \quad (2)$$

$$\text{Flow due to a Dipole or Doublet. } w_{dip}(z) = \frac{m}{2\pi z}, \quad (3)$$

where, m is the intensity of a dipole, Γ is the circulation, and \bar{V}_{∞} is the conjugate complex velocity in a point placed in the infinity.

2.2 Flow Past a Circular Cylinder with Circulation at an Angle of Attack [5]

The potential complex function $w_{cil}(z)$ of the flow past a circular cylinder of a radius a , with circulation Γ , and center at the origin, can be obtained as a result of the superposition of three simpler potential complex function. As follows:

$$w_{cil}(z) = w_{flow}(z) + w_{dip}(z) + w_{vor}(z). \quad (4)$$

The null streamline $\psi = 0$ of the sum of the equation (1) and (3) must be the equation of a circle of radius a . This condition and the fact that $w_{vor}(z)$ is not considered, amounts to circumstance that the velocity at the surface of the cylinder must be everywhere tangential since the velocity normal to a stationary cylinder must be zero (As it is well known, the lines which ψ are constant due to a vortex are concentric circles around the its center). Besides $y = 0$, the other null streamline is obtained if: $x^2 + y^2 = a^2$. And then, $m = 2\pi a^2 u_{\infty}$.

Thus, the complex potential for the flow past a stationary circular cylinder with circulation placed on a uniform stream is:

$$w_{cil}(z) = \bar{V}_{\infty} z + \frac{V_{\infty} a^2}{z} - \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln(z), \quad (5)$$

this is a well known solution, and it has obvious application to basic problems in aerodynamics.

The complex conjugate velocity is then:

$$\bar{V} = \frac{dw}{dz} \quad (6)$$

2. 3 Flow Past two Circular Cylinders at an Angle of Attack

The potential complex function describing the flow past two circular cylinders is determined base on the work of Williams [3]. Thus, it has been calculated as the superposition of two components: a *streaming flow* past both circles and a *circulation flow*.

The potential function of the *streaming flow* past both circle is founded in the Circle Theorem [6], which states that if a circle $|\zeta| = a$ is introduced into a flow, represented by the complex potential, $w = f(\zeta)$, then the complex potential becomes:

$$w = f(\zeta) + \bar{f}\left(\frac{a^2}{\zeta}\right). \quad (7)$$

According to the Circle Theorem, a second cylinder is introduced in $f(\zeta)$, when $f(\zeta)$ is representing a flow past a circular cylinder. Nonetheless, due to the introduction of the second cylinder, the first one becomes modified. So, it is no more represented by a streamline. The Circle Theorem is again applied to all the singularities outside the first circle. This produces two new doublet images, which are the reflections of the images produced in the second circle by the previous step.

Thus, this process is repeated and after each step, either the first or the second circle is a streamline. Each reflection entails the addition of two image doublets. The strength of the doublets, which are added after each reflection, is monotonic decreasing and approaches zero. After several reflections, the new image doublets will only slightly change the complex potential of the system. This establishes a necessary condition for the series converging to the complex potential for the streaming flow past two circles. The proof of a sufficient condition for convergence is given in Williams [3].

In the case of this paper, the potential flow past two cylinders has been calculated applying the Circle Theorem five times, placing this way nine different dipoles. The potential complex results:

$$\begin{aligned} w_{\text{flow}}(\zeta) = & \bar{V}_{\infty} \zeta + \frac{V_{\infty} a^2}{\zeta} + \frac{V_{\infty} b^2}{(\zeta-f)} - \frac{a^2 b^2 \bar{V}_{\infty}}{f^2 \left(\zeta - \frac{a^2}{f}\right)} + \frac{a^4 b^2 V_{\infty}}{f^2 \left(f - \frac{b^2}{f}\right) \left(\zeta - \frac{a^2}{f}\right)} - \frac{b^4 a^4 \bar{V}_{\infty}}{f^2 \left(f - \frac{a^2}{f}\right) \left(f - \frac{b^2}{f}\right) \left(\zeta - \frac{a^2}{f}\right)} \\ & + \frac{a^6 b^4 V_{\infty}}{f^2 \left(f - \frac{b^2}{f}\right)^2 \left(f - \frac{a^2}{f}\right)^2 \left(f - \frac{b^2}{f}\right) \left(\zeta - \frac{a^2}{f}\right)} - \frac{a^2 b^2 \bar{V}_{\infty}}{f^2 \left(\zeta - \left(f - \frac{b^2}{f}\right)\right)} + \frac{b^4 a^2 V_{\infty}}{f^2 \left(f - \frac{a^2}{f}\right) \left(\zeta - \left(f - \frac{b^2}{f}\right)\right)} - \frac{a^4 b^4 \bar{V}_{\infty}}{f^2 \left(f - \frac{b^2}{f}\right) \left(f - \frac{a^2}{f}\right) \left(\zeta - \left(f - \frac{b^2}{f}\right)\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

where a is the radius of the circle placed on the origin and b is the radius of the second cylinder placed on a distance f from the origin. The solution for the first circle is exact, what means that the surface of the circle is perfectly matched with a streamline, while the error committed in the second cylinder with the values adopted in this paper is less than 10^{-3} .

In order to define the *circulation flow* with Γ_1 circulation around the first circle is constructed by placing a vortex in its centre. According to the previous case, the second circle is introduced in the flow using the Circle Theorem. This process is repeated, alternatively making the first and second circle streamlines, each reflection effectively entails the addition of two vortices of opposite sense at inverse points in one of the circles. So, the resultant circulation produced by adding two vortices of opposite sense becomes null. A proof of sufficiency is given in Williams [3]. In the example presented here, the Circle Theorem has been applied two times, so it has been involved five different vortices. It follows bellow the potential complex function for the circulation:

$$w_{\text{circ}}(\zeta) = -\frac{\Gamma_1}{2\pi i} \ln(\zeta) - \frac{\Gamma_1}{2\pi i} \ln(\zeta-f) + \frac{\Gamma_1}{2\pi i} \ln\left(\zeta - \left(f - \frac{b^2}{f}\right)\right) + \frac{\Gamma_1}{2\pi i} \ln\left(\zeta - \frac{a^2}{f}\right) - \frac{\Gamma_1}{2\pi i} \ln\left(\zeta - \frac{a^2}{f - \frac{b^2}{f}}\right), \quad (9)$$

The same proceed has been done for the second circle in order to provide a Γ_2 circulation around it. Obtaining this way, the potential complex function for the circulation around the second circle, $w_{\text{circ}2}(\zeta)$.

So, the total complex potential flow past both circular cylinders with circulation is calculated as a superposition of the three components below:

$$w_{\text{total}}(\zeta) = w_{\text{flow}}(\zeta) + w_{\text{circ1}}(\zeta) + w_{\text{circ2}}(\zeta). \quad (10)$$

In order to determine the amount of circulation which actually exists in this situation, an application of the following postulate known as the Kutta condition as proposed.

Kutta condition declares: "Out of the infinite number of possible inviscid potential flows past an airfoil with sharp trailing edge, the flow that physically occurs is the one in which there is no velocity discontinuity at the trailing edge." This implies that there is a smooth flow with finite velocity past the trailing edge. This unique case of circulation, as is well known, occurs when the point on the circle in the ζ -plane which corresponds to the trailing edge in the z -plane is a stagnation point, a mathematical demonstration of this can be found in Warsi [5]. Due to the symmetry of the airfoil, the points on the circles which corresponds to the trailing edge of the airfoils are in the points $(-a, 0)$ for the first circle, and $(f-b, 0)$ for the second circle. So, the circulations, Γ_1 and Γ_2 , can be determined with the following equation system.

$$\frac{dW_t(-a)}{d\zeta} = 0, \quad \frac{dW_t(f-b)}{d\zeta} = 0. \quad (11)$$

2.4 Joukowski Mapping

The Joukowski transformation is utilized to transform the two circle in the ζ -plane in an airfoil and a quasi circle in the z -plane. The equation utilized for the transformation is a particular case which can transform a circle placed on the origin into x-symmetrical and y-asymmetrical airfoil. This is:

$$z = \zeta + \epsilon + \frac{c^2}{\zeta + \epsilon}, \quad (12)$$

where c and ϵ are real parameters for the geometrical characterization of the airfoil.

While the first circle, placed on the origin, is transformed into an airfoil, the transformation of the second one can be considered as a circle. Consider g the point placed at an angle of $\pi/2$ of the quasi circle transformed, the quasi circle transformed is approximated to a circle with the following equation:

$$\text{Im}(g)e^{i\alpha} + \text{Re}(g), \quad 0 < \alpha < 2\pi, \quad (13)$$

where,

$$g = \frac{-b^2 + c^2 + 2ib(f+\epsilon) + (f+\epsilon)^2}{ib + f + \epsilon}. \quad (14)$$

In this consideration, it is been committed an error less than 10^{-4} for the taken values in this paper. The error has been calculated as the maximum difference between the radius of the quasi circle transformed and the radius of the circle presented with equation (13) above.

Then, the Joukowski transformation is applied again in order to get a set of two airfoils. Now, the modified Joukowski transformation defined below place the quasi circle on the origin in order to transform it into the desired second airfoil.

$$z_2 = z + \epsilon - s + \frac{c^2}{z + \epsilon - s} \quad (15)$$

Where s is the image of the origin of the second transformation due to the first Joukowski transformation, therefore, $s = f + \epsilon \frac{c^2}{f + \epsilon}$. Note that consequently the airfoil due to the first circle is also displaced in a distance s on the negative real axe.

3 RESULTS

Taking a complex uniform flow velocity $V_\infty = -5 + 0.5i$ m/s, placing the circle of radius $a = 1.4m$ in the origin and the other circle of radius $b = 1.43m$ in a distance $f = 6.5m$ of the origin in the positive real axis. The streamlines obtained are:

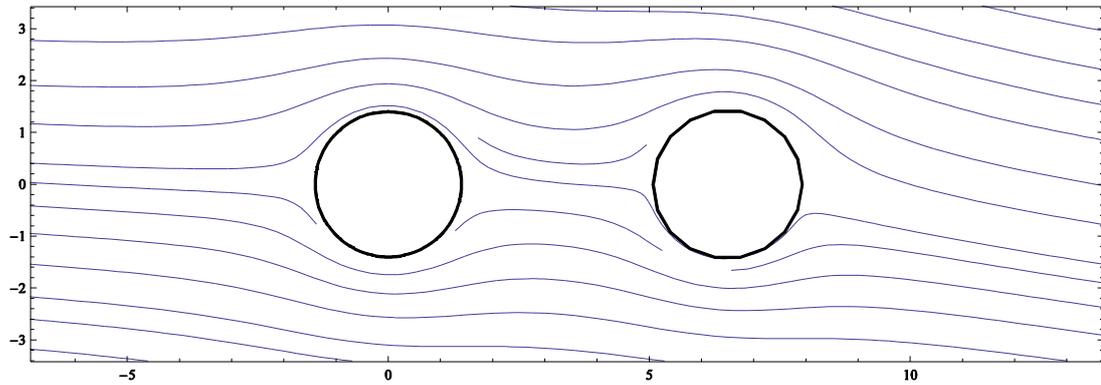


Figure 1: Streamlines for a flow past two circular cylinders with circulation at an Angle of Attack

Note that the radius b of the second circle has been taken slightly greater than the radius a in order to compensate the deformation due to the first Joukowski transformation, according to the equation (13). That is to obtain two identical airfoils in the final configuration.

Now proceeding with the double application of the transformation: the streamlines are obtained adjusting the base circle of the transformation $c = 1m$, and the horizontal displacement $\varepsilon=0.2 m$. Also, according to the Kutta Condition, the circulation around the airfoils are $\Gamma_1 = -4.897m^2/s$ and $\Gamma_2 = 12.051 m^2/s$,

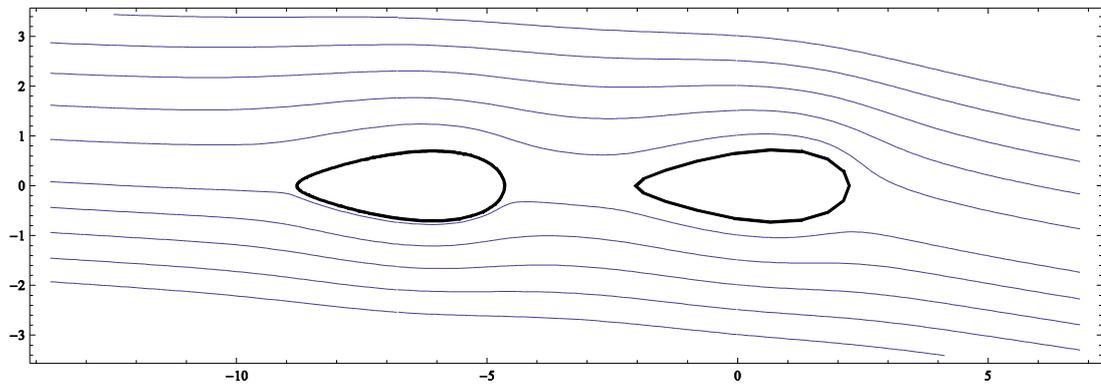


Figure 2: Streamlines for a flow past two parallel airfoils at an Angle of Attack

In order to validate the formulation, the stream function on different configurations of airfoils is calculated then the streamlines identifying the airfoils surfaces are verified. Also, the velocity field is checked over the airfoil configuration set, especially the continuity in the trailing edge. The symmetry for the case with no circulation in the airfoils and horizontally flow are also checked.

The opportunity has been taken to examine the behaviour of solutions with large and small distances between the airfoils. At large separations, one aerofoil does not influence the flow around the second aerofoil, thus the result is trivial. However it provided a useful check of the solution by comparison with the solution of the single airfoil theory and these are used as a proof of the given method. In a small separation the quasi circle is more deformed as a result of the first application of the transformation so the approximation becomes less accurate.

It follows below two graphics in order to front the influence of the circulation in the stagnations point at the trailing edge. Figure 3 shows the streamlines of the potential flow which was determined by taking the circulation as null, so the stagnation point is not localized in the trailing edge.

In the other hand, figure 4, shows the streamlines of the potential flow when the amount of circulation is calculated according to the Kutta condition. As a result of this, the stagnation point is displaced to the trailing edge.

4 CONCLUSIONS

The main achievement of the procedure presented in this paper consists in a simply formulation which results describe the potential flow past the two airfoil's contour. Due to the characteristics of the Circle Theorem, one of the airfoils will be defined by a streamline. On the other hand, the contour of the other airfoil will be a good

approach of the analytical solution. However, the numerical approximation can be made as close to the exact value, as is desired, by increasing the number of terms in the truncated part of the series.

This process allows to calculate the pressure and velocity distribution; and the streamlines arrangement. The formulation has been made such that is possible to get the solution flow with different characteristics of the flow (angle of attack, velocity modulus, pressure and density), different geometry of the airfoils and also different distance between them.

The potential flow is an approximation of a real physic flow; nevertheless it has enormous advantages in front of other viscid methods. The first main favoring circumstance to use this method resides in its simplicity. The second one, lies on the fact that the result of this method is a continue function extended in the entire z -plane, which is able to set the velocity and pressure of any point on it. Furthermore, the mathematical problem solved here is a basic one in potential theory and the solutions can be applied to many other branches of physics. This simple but powerful formulation is expected to be applied in a next work in the iced airfoil aerodynamics field.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the CNPQ for the financial support.

REFERENCES

- [1] Burnside, On a class of automorphic functions, Proc. London Math. Soc. 23, 49–88, 1982.
- [2] D.G. Crowdy, Analytical solutions for uniform potential flow past multiple Cylinders, 2006.
- [2] B.R. Williams, An Exact Test Case for the Plane Potential Flow About Two Adjacent Lifting Aerofoils, 1971
- [4] W. Müller, Systems of double sources in the planar flow. Z.A.M.M. Vol. 9, 1929.
- [5] Warsi Z., Fluid Dynamics Theoretical and Computational Approaches, 2ed, CRC Press, 1998.
- [6] L.M. Milne-Thomson, Theoretical hydrodynamics. Macmillan & Co. Ltd., 1955.
- [7] J.Mateu, C.Salinas, Generalized Formulation to Estimate a Potential Complex Function of a Flow past Multiple Cylinders, *Advanced Materials Research*, 2012
- [8] J.Mateu, C.Salinas, Investigation of the disturbances of the flow around an airfoil caused by an obstacle, *The 4th International Congress on University Industry Cooperation – UNINDU*, 2012