Campus de São Carlos

**ANÁLISE DE CIRCULAÇÃO INDUZIDA POR
MHD EM FLUIDO CONDUTOR ATRAVÉS DE
VELOCIMETRIA A LASER**

RICARDO DANHONE

Orientador: Prof. Dr. Michael George Maunsell

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**Análise de circulação induzida por MHD em fluido condutor
através de velocimetria a laser**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 16.10.03

Ass.: *Ricardo Danhone*

Ricardo Danhone

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043483

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Michael George Maunsell

São Carlos
2002

Class.	TESE-EESC ✓
Cutt.	1485
Tombo	T006/03
Sysno	1315189

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D182a Danhone, Ricardo
Análise de circulação induzida por MHD em fluido condutor através de velocimetria à laser / Ricardo Danhone. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Michael George Maunsell.

1. P.I.V. 2. Filamento de vórtice. 3. M.H.D.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RICARDO DANHONE**

Dissertação defendida e julgada em 14-11-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **MICHAEL GEORGE MAUNSELL (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **PAULO CELSO GRECO JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Tit. **HARRY EDMAR SCHULZ**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof.Dr. Michael George Maunsell a oportunidade de realizar esse trabalho, sua paciência e constante orientação em relação as dúvidas que surgiram ao longo desse, além de me colocar em contato com as pessoas que contribuíram significativamente para esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Harry Edmar Schulz, que abriu as portas de seu laboratório, sem o qual esse estudo não poderia sequer ser imaginado e também pela sua paciência e inestimável colaboração em nos mostrar como melhorar a apresentação deste trabalho.

À Dra. Selma Vargas da Silva, que sempre me auxiliou muito além do esperado e com sua costumeira paciência e dedicação.

Aos amigos Roberto Serrano e Ladislau Albert Junior pelo apoio e motivação constante.

Índice

	Lista de Figuras	4
	Lista de Símbolos	6
	RESUMO	8
	ABSTRACT.....	9
1	Introdução	10
2	Magnetohidrodinâmica	11
2.1	Descrição bibliográfica	11
2.2	Equacionamento Básico.....	13
2.2.1	Referente à eletrólise.....	13
2.2.2	As Equações.....	14
3	O vórtice em anel como entidade física, seu geração, movimento e estabilidade.	18
3.1	Introdução.....	18
3.2	Geração Experimental no Laboratório.....	18
3.3	A ocorrência na natureza	20
3.4	A ocorrência na aviação.....	22
3.5	O vórtice em anel como entidade física e seu movimento.....	23
3.6	Geração de vórtices em fluido condutor através de indução Magnetohidrodinâmica.....	25
4	Experimentação.....	29
4.1	Descrição do equipamento	29
4.2	Coleta de dados	31
4.3	Análise dos dados	32
4.4	Apresentação das figuras	35
4.5	Leituras das velocidades tangenciais à superfície	36
5	Resultados Experimentais.....	39
5.1	Apresentação dos resultados	39
5.2	Variação da pressão devido a circulação	49
5.3	Observações gerais sobre os resultados	59
6	Conclusões.....	61
	Referências Bibliográficas	63
	Bibliografia	65
	Anexo A: Manipulação de equipamentos laser	66
	Anexo B: Condutividade da água	68
	Anexo C: Pequena cronologia da história dos materiais magnéticos.....	72
	Anexo D: Glossário de termos do magnetismo.....	73

Lista de Figuras

FIGURA 1	Experiência de Didden	19
FIGURA 2	Núcleo de um vórtice em anel	20
FIGURA 3	Simulação de correntes ascendentes na formação de nuvens	21
FIGURA 4	Observação da bolha de ar quente	21
FIGURA 5	Vórtice em anel no rotor numa descida.....	22
FIGURA 6	Toróide e suas dimensões.....	23
FIGURA 7	Vórtice em anel em movimento.....	24
FIGURA 8	Célula utilizada para o experimento.....	26
FIGURA 9	Célula vista de cima.....	26
FIGURA 10	Vista lateral da célula.....	27
FIGURA 11	Concepção do conjunto das células tridimensional.....	27
FIGURA 12	Detalhe da posição da célula colocada entre solenóides	30
FIGURA 13	Visualização de ajustes do programa Visiflow	30
FIGURA 14	Imagem para PIV transformada para leitura	31
FIGURA 15	Imagem do fluido em rotação através da ação do software	31
FIGURA 16	Apresentação na tela após a análise feita pelo Visflow	33
FIGURA 17	Análise de vorticidade com escala cromática e interpolação	34
FIGURA 18	Análise de vorticidade e linhas de corrente nos elementos do fluxo	35
FIGURA 19	Fotografia esquemática das velocidades tangenciais	36
FIGURA 20	Velocidades tangenciais e o centro de intensidade de circulação	37
FIGURA 21	Análise de vorticidade, com adição dos vetores, do ensaio 1 com a foto	40
FIGURA 22	Imagens de duas seqüências do ensaio	41
FIGURA 23	Análise da vorticidade e das linhas de corrente para o ensaio 1	41
FIGURA 24	Exemplo de análise do ensaio 2, com a foto sobreposta	42
FIGURA 25	Análise da primeira e segunda seqüências no segundo ensaio	42
FIGURA 26	Análise inicial, sem a foto e interpolação do ensaio 3	43
FIGURA 27	Análise da vorticidade e das linhas de corrente, ensaio 3	43
FIGURA 28	Primeiras imagens da análise do ensaio 4	45
FIGURA 29	Segunda série de imagens antes com análise das linhas de corrente	45
FIGURA 30	Imagens numa primeira tomada	46
FIGURA 31	Exemplos de seqüências analisadas quanto a vorticidade	46
FIGURA 32	Exemplos de seqüências após o cálculo da a interpolação	47
FIGURA 33	Exemplos da evolução do movimento do fluido	47
FIGURA 34	Situação análoga ao experimento, com a célula formando um sólido.....	52
FIGURA 35	Vórtices internos na célula e no fluxo livre	51
FIGURA B1	Representação da mobilidade iônica	68
FIGURA B2	Célula unitária de platina	69
FIGURA B3	Representação da célula anular de aferição do equipamento	70
FIGURA B4	Conduvímeter Mettler Toledo MC 226	71

TABELA 1	Valores de C para águas	34
TABELA 2	Velocidades obtidas tangencialmente à superfície, Ensaios 1, 2 e 3	38
TABELA 3	Velocidades obtidas tangencialmente à superfície, os Ensaios 4, 5 e 6 ..	38
TABELA 4	Valores significativos de Γ encontrados para o Ensaio 1	41
TABELA 5	Valores significativos de Γ encontrados para o Ensaio 2	42
TABELA 6	Valores significativos de Γ encontrados para o Ensaio 3	43
TABELA 7	Valores significativos de Γ para os Ensaios de número 4, 5 e 6 com escala cromática	48
TABELA 8	Velocidades médias fornecidas pela leitura nos Ensaios 4, 5 e 6	48
TABELA A1	Possíveis efeitos da radiação laser nos olhos e na pele	66
TABELA B1	Valores de condutividade específica de algumas soluções	70
GRÁFICO 1	Valores de voltagem X vorticidade	39
GRÁFICO 2	Velocidade média encontrada para as três seqüências iniciais, para valores menores que 100 A	44
GRÁFICO 3	Valores de Γ , sentidos horário e anti-horário, 3 primeiras seqüências ...	44
GRÁFICO 4	Velocidades médias do fluido nos Ensaios 4, 5 e 6	49
GRÁFICO 5	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 1, 15"	53
GRÁFICO 6	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 1, 30"	53
GRÁFICO 7	Todos os valores de C_p para o Ensaio 1	53
GRÁFICO 8	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 2, 15"	54
GRÁFICO 9	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 2, 30"	54
GRÁFICO 10	Todos os valores de C_p para o Ensaio 2	54
GRÁFICO 11	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 3, 15"	55
GRÁFICO 12	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 3, 30"	55
GRÁFICO 13	Todos os valores de C_p para o Ensaio 3	55
GRÁFICO 14	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 4, 15"	56
GRÁFICO 15	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 4, 30"	56
GRÁFICO 16	Todos os valores de C_p para o Ensaio 4	56
GRÁFICO 17	Variação dos valores de C_p para o ensaio 5, 15"	57
GRÁFICO 18	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 5, 30"	57
GRÁFICO 19	Todos os valores de C_p para o Ensaio 5	57
GRÁFICO 20	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 6, 15"	58
GRÁFICO 21	Variação dos valores de C_p para o Ensaio 6, 30"	58
GRÁFICO 22	Todos os valores de C_p para o Ensaio 6	58
GRÁFICO 23	Os valores de variação do C_p para os seis Ensaios	59

Lista de Símbolos

ρ	densidade, Kg/m ³
Ψ	fluxo magnético
ω	velocidade angular, rad/s
ξ	vorticidade, 1/s
μ_0	permabilidade magnética no vácuo, Henry/m
θ	componente angular, coordenadas polares
ϵ_0	permissividade elétrica no vácuo, faraday/m
área	área, cm ²
B	indução magnética, Weber/m ²
C	condutividade específica, Siemens/cm
Γ	circulação, m ² / Seg
σ	condutividade, Siemens/m
D	arrasto
dL	diferencial de distância, m
E	campo elétrico, Volt/m
F	força, Newton
G	condutância, Siemens
H	intensidade do campo magnético, Ampère/m
I	corrente, Ampère
J	densidade de corrente elétrica, Ampère/m ²
k	constante
l	sustentação bidimensional, Newton
L	distância, cm
n	sentido normal à superfície
Q	carga elétrica, Coulomb
q	velocidade tangencial, m/s
r	componente radial, coordenadas polares
ri	raio interno do toróide, m

Re	número de Reynolds
R_{ext}	raio externo do toróide, m
S	superfície, m ²
t	tempo, segundo
V	velocidade, m/s
V_{∞}	velocidade do escoamento livre, m/s
V_{local}	velocidade instantânea do fluido, m/s
Volume	m ³

RESUMO

DANHONE, R. (2002) *Análise de circulação induzida por MHD em fluido condutor através de velocimetria a laser*. São Carlos, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo deste trabalho foi a análise do movimento do fluido dentro de um segmento de vórtice em anel gerado através da ação magnetohidrodinâmica e o monitoramento do seu movimento resultante, de modo a oferecer condições de visualização usando velocimetria a laser com a técnica de processamento de imagens de partículas envolvidas na circulação. O objetivo final desta linha de pesquisa é que através de análises de dados como as velocidades envolvidas na circulação obtida, possa modelar corpos em movimento em fluidos, de forma que o arrasto devido ao seu deslocamento possa ser reduzido.

O movimento circulatório a que foi submetido o fluido sem meios mecânicos, ou seja, por meio de uma força resultante da ação de campos conjugados, teve a função de criar campos de baixa pressão tendo, para isso, acelerado o fluido em um circuito fechado restrito pela atuação da força e das paredes da célula de ensaio.

O movimento do fluido, com a leitura da variação de velocidades em pontos diferentes do circuito teve o auxílio de um equipamento ótico que forneceu todas as variações, mesmo as mínimas, mostrando que tal aparato pode ser desenvolvido para a obtenção de melhores resultados.

Palavras-chave: PIV, vórtice fluidodinâmico, MHD

ABSTRACT

DANHONE, R. (2002) *Analysis of circulation induced by MHD in conducted fluid through laser velocimetry*. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The aim of this work involves the analysis of fluid flow, using sea water stimulated by localised magnetohydrodynamic induction within an experimental glass sided receptacle. The above mentioned apparatus simulated one segment of a three dimensional apparatus capable of creating a flow pattern very similar to that of a vortex ring. Particle Image Velocimetry techniques using a copper vapour laser with computerised image and data acquisition system were used to analyse the flow in the experimental segment.

The final aim of this line of research is to be able to eventually model the shape of bodies in movement within a fluid when combined with the use of a magnetohydrodynamically induced flow field in such a way as to significantly reduce fluid drag forces on the body.

Circulatory movement was induced in the fluid within the confines of the experimental tank using a locally applied Lorentz field force between electrodes to accelerate the fluid. Both the electrical and magnetic fields were controlled independently using separate external rectified a.c. circuits. The aim of the fluid movement described above was to induce low static pressure over a specific surface area.

The analysis of the fluid movement, including the measurement of velocities in different points of the circuit was attained using specialised optical equipment linked to a computerised data acquisition and analysis system. The results, which included exceptionally low velocity readings, showed that such equipment possesses the potential for developed for the attainment of better results in the future.

Key words: PIV, fluid dynamic vortex, MHD

1. Introdução:

O objetivo desse trabalho é a análise da produção de circulação dentro de um fluido viscoso, através da força induzida por um campo magnetohidrodinâmico. Além apenas da geração de vórtices, também as características geométricas gerais e específicas do movimento circulatório do fluido têm relevância nesse trabalho. A partir dessas informações iniciais, torna-se possível a modelagem das características geométricas, assim como do tempo de sua existência e outras características intrínsecas dos vórtices. O presente estudo dá continuidade a trabalhos anteriores, como MISSIATO (1998), que iniciou com a indução de um vórtice com eixo vertical no fundo da cuba e perpendicular à superfície do fluido, e de SERRANO (2000), colocando a indução de vórtices em anel, também com MHD em água marinha.

Especificamente neste trabalho, faz-se uma análise qualitativa do movimento da água, fazendo uso de equipamento óptico para coleta e subsequente processamento de dados. Os resultados fornecem a circulação à qual o fluido foi submetido através da influência de um campo eletromagnético.

O equipamento utilizado fornece a distribuição da vorticidade gerada no fluido, como também sobrepõe linhas de corrente onde esta ocorre.

A partir de estudos sobre a teoria da sustentação [realizados por vários pesquisadores, entre eles Rayleigh (1842-1919) que desenvolveu uma análise empírica de um escoamento uniforme sobre um cilindro circular, onde o paradoxo de D'Alembert (1717- 1783) poderia ser aplicado, ou seja, o arrasto de um corpo movendo-se uniformemente em um fluido invíscido é matematicamente igual a zero, ocorrendo um balanceamento de pressões ao redor do mesmo] há uma analogia entre a formação de vorticidade e a força gerada por um aerofólio [de dois teoremas de Helmholtz: 1) uma partícula que se move em um fluido possui uma ou todas das seguintes características: velocidade linear, vorticidade, e distorção; 2) um vórtex mantém constante sua força ao longo de seu comprimento (ou um vórtice forma um loop fechado, ou inicia em uma descontinuidade no fluido como um corpo sólido), HOUGHTON, A.L. *et al.*(1982)].

Prandtl foi o primeiro a desenvolver uma teoria prática sobre as propriedades aerodinâmicas do aerofólio e, com essa analogia entre o movimento circulatório e a força relacionada a este, temos um caminho para o campo de velocidades que pode causar diferenças significativas de pressão.

2 – Magnetohidrodinâmica

2.1 Descrição bibliográfica

As pesquisas nas áreas de eletricidade e magnetismo vêm se desenvolvendo há alguns séculos. Aqui é apresentado um pequeno histórico da descoberta de fenômenos relacionados com a magnetohidrodinâmica, e suas cronologias.

As causas relatadas com esse tipo de fenômeno foram observadas por vários pesquisadores que observaram e estudaram a eletricidade em si, tais como o físico inglês Michael Faraday (1791-1867) que descobriu, entre outras coisas, que os ímãs influenciavam ações mecânicas sobre materiais condutores percorridos por uma corrente. Faraday apresentou, em 1846, uma teoria eletromagnética da luz após descobrir a influência de um campo magnético sobre a luz polarizada. Seus trabalhos sobre o diamagnetismo levaram-no a estudar a ação mútua entre eletricidade e gravitação.

Em agosto de 1831, descobriu que uma corrente elétrica podia induzir uma outra corrente em um circuito diferente, elaborando uma teoria descritiva e de um modo explicativo, que foi a base para o dínamo rudimentar como também para teorias mais avançadas como a da relatividade de Albert Einstein (1879-1955) (que publicou em 1905 o artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, onde estão as bases da relatividade restrita e da simultaneidade ou seja, trata cada sistema de referência tendo seu tempo próprio).

. Uma das hipóteses relacionadas com esse fenômeno é que os mares ao se movimentarem podiam alterar o campo magnético terrestre, devido à existência de correntes elétricas marítimas desconhecidas até então; hipótese esta que ganhou força posteriormente. Faraday também estudou o fenômeno da eletrólise, medindo a eletricidade por meio da decomposição química.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico holandês, foi outro pesquisador dedicado ao fenômeno, que desenvolveu uma lei relacionada a este, que leva seu nome.

Lorentz e G. F. Fitzgerald(1851-1901), introduziram a hipótese que os corpos em movimento se contraem na direção em que este ocorre (contração lorentziana), para a qual foram desenvolvidas as transformações de Lorentz (estas incorporadas na teoria geral da relatividade).

Lorentz previu efeitos de polarização que só foram aferidos empiricamente mais tarde. Suas pesquisas tinham como característica a busca de uma teoria que propusesse a unificação dos fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos, através do meio físico do éter em repouso, onde os elétrons podiam ou não se mover. Um trabalho seu a respeito da influência do campo magnético sobre as radiações rendeu-lhe um Prêmio Nobel em 1902 e suas pesquisas também tiveram espaço na teoria espacial da relatividade, com as Transformações de Lorentz (veja nota na página anterior).

Ao final do século dezenove o interesse pelo fenômeno magnetohidrodinâmico decaiu, talvez devido às dificuldades e rudimentos dos aparatos até então utilizados.

Essa área de estudos apenas foi impulsionada novamente após a Segunda Guerra mundial. O pós-guerra foi marcado por uma corrida tecnológica, o que impulsionou de forma mais acelerada as pesquisas em todas as áreas e particularmente a nuclear com estreita relação com a magnetohidrodinâmica.

Mais recentemente SHERCLIFF (1965), que descreve o fenômeno magnetohidrodinâmico, coloca que se há um campo magnético variável e externo (um campo que pode ter várias origens tais como: movimento de ímãs permanentes ou de um eletroímã) e nele for colocado um condutor, seja esse líquido ou sólido, haverá uma corrente elétrica induzida atuando no condutor, que afetará diretamente ou o estado de movimento do elemento sólido ou a pressão do líquido. Isso ocorre devido ao produto vetorial entre os vetores densidade de campo magnético aplicado e o vetor densidade da corrente elétrica induzida que aparece no equacionamento básico. Esse resultado vetorial, que é uma força eletromagnética, recebe o nome de força de Lorentz, em homenagem a este pesquisador.

Atualmente estuda-se a utilização de princípios magnetohidrodinâmicos na dirigibilidade de veículos e projéteis supersônicos, visto que devido a suas altas velocidades, o fluido, no caso o ar, torna-se ionizado e portanto factível de se tornar condutor e, assim, através de eletroímãs, faz-se com que fenômenos relevantes de estabilidade, controle, eficiência e armazenamento de energia possam ser monitorados através das forças eletromagnéticas relacionadas com, por exemplo, a camada limite, SHERCLIFF(1965).

2.2 Equacionamento Básico

ROBERTS (1994) define MHD como o estudo do movimento de um fluido condutor na presença de um campo magnético, que ocorre através de outros dois fenômenos: o primeiro é o da eletrodinâmica, ou seja, o movimento do fluido faz com que surja uma força eletromotriz:

$$fem = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} \quad (1)$$

Onde, o campo magnético é B, e v é a velocidade do fluido. Essa força fem provoca um campo elétrico E e guia correntes de densidade J, as quais, segundo a lei de Ampère, modificam o campo magnético. O segundo fator envolvido é a força de Lorentz (vide equação 1 acima), que aparece na ação do campo e da corrente e, assim, modifica o fluxo do fluido.

Esses dois fatores: campos elétrico e magnético, atuando juntos têm uma eficiência maior do que se ambos surgissem isolados (pois deles advém a força motriz).

Esses conceitos não são aqui apresentados aqui de maneira aprofundada (suas características não são o escopo desse trabalho). A menção dos mesmos facilita a explicação do fenômeno através do qual, se obtém o movimento no fluido.

2.2.1 Referente à eletrólise

Os íons em movimentos pré existem na água marinha, que é o fluido que foi usado para que ocorresse a eletrólise. Através de dissociação eletrolítica, os íons se libertam quando uma molécula se decompõe. A partir daí, o eletrodo negativo recebe os íons positivos e o contrário acontece com o positivo, chamados cátions e ânions, respectivamente.

Na água marinha, o que determina a eletrólise é o potencial voltaico para uma dada corrente. Há diferentes voltagens que contribuem para a efetividade da célula em questão, tais como: voltagem de reversibilidade, voltagem de polarização química e perdas ôhmicas, MENG (1993). A saber, a voltagem de reversibilidade provém dos elementos envolvidos na reação química. A voltagem de polarização química vem da inibição de cargas trocadas nos eletrodos. Há ainda a de concentração de polarização

que ocasiona o que pode ser descrito como uma camada limite ao redor do eletrodo durante a reação, mas, isso não ocorre de modo significativo em processos turbulentos.

Ao utilizar-se um fluido, deve-se lembrar que a massa de substância envolvida na eletrólise é proporcional à quantidade de carga elétrica na solução que serve para a troca de íons. No experimento foi usada água marinha que apresenta muito cloreto de sódio (NaCl) e um razoável índice de condutividade, que é representado pela letra σ e cuja unidade é o Siemens/metro (S/m).

Como a eletrólise ocorre em um meio fluídico, a natureza desse influencia diretamente a troca de íons. Há ainda o processo de formação de elementos isolantes durante o processo, como substâncias naturais da reação.

A natureza do eletrodo (se o mesmo é de cobre, aço inoxidável, alumínio) interfere diretamente na visualização do experimento e fazendo com que os detritos da reação perturbem a mesma.

Citando TEMPELMEYER (1994), os comportamentos de vários materiais condutores, enquanto utilizados como eletrodos, apresentam-se semelhantes.

Um outro fator relevante é a densidade de fluxo magnético. A saber, Hans-Christian Oersted (1777-1851), um físico dinamarquês pioneiro no estudo do magnetismo, que tem no seu histórico a fundação de uma sociedade para propagação das ciências naturais e a invenção do piezômetro, para a medição de pressão, concluiu que se uma corrente elétrica, ao passar por um condutor, produz um campo magnético, então, o magnetismo também produz corrente elétrica, descrito em seu trabalho “Experimenta Circa Efficaciam Conflictus Electrici in Acum Magneticum”, no qual ele experimentou a influência da corrente numa agulha magnética. Um contemporâneo seu, Joseph Henry (1797-1878) realizou estudos semelhantes e também criou um dos primeiros motores eletro-magnéticos e estudou também a “self-induction”, auto-indução, tema esse que também foi pesquisado por Faraday.

2.2.2 As Equações

Uma descrição do campo magnético é a lei de Biot-Savart, que coloca os fluxo elétrico e magnético em função um do outro, e determina uma unidade Ampère/metro (A/m), a saber:

$$d\vec{H} = \frac{I \cdot d\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Onde, H é a intensidade do campo magnético, que pode ser fornecido pela integração dos termos:

$$\vec{H} = \oint \left(\frac{I \cdot d\vec{L} \times \vec{a}_R}{4\pi R^2} \right) \quad (3)$$

De posse da lei de Biot-Savart, chegamos a lei de Ampère, descoberta por André Marie Ampère (1775-1836) que, entre outros descobriu os princípios da telegrafia, e que é a integral de linha da intensidade de fluxo magnético é igual à corrente no condutor em questão, ou em termos matemáticos:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I \quad (4)$$

Assim, a densidade de fluxo magnético é definida por:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (5)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, ou seja, é a proporção entre a indução magnética e a intensidade do campo (B e H respectivamente), e é igual a $4\pi \times 10^{-7}$ h/m. A unidade de B é o weber/metro², ou volt-seg/ metro², ou ainda {(metro/seg) X (newton/ coulomb)} / (metro/seg)², que é igual a 1 Tesla ou 10.000 Gauss.

Há ainda as respectivas equações dos fluxos elétrico e magnético:

$$\Psi = \oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (6)$$

$$\Phi = \oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (7)$$

Na equação (6) acima, a letra Q representa a carga elétrica em uma superfície fechada, assim como as linhas de fluxo do campo magnético, que têm começo e fim.

Abaixo são apresentadas as equações de Maxwell, segundo BENITO (1979), que descrevem as fontes e o campo de vetores nos meios eletrostáticos, magnetostáticos e de indução eletromagnética e que também estão relacionadas com o a influência no movimento de cargas devido ao MHD.

Definindo assim, como campo elétrico: $\vec{E}$; como campo magnético: $\vec{H}$, como indução elétrica $\vec{D}$ e como indução magnética $\vec{B}$.

Para todo ponto, os vetores satisfazem as equações, pois as propriedades do meio são contínuas. Temos:

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (9)$$

Quando as equações não dependem do tempo, temos as formas abaixo. Para a primeira equação de Maxwell, derivada da lei de Gauss para o fluxo elétrico e, que relaciona a densidade de fluxo elétrico D com a densidade volumétrica de carga:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (10)$$

A segunda equação de Maxwell é derivada da lei de Ampère:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (11)$$

A terceira é derivada da lei de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (12)$$

E a quarta equação de Maxwell, é também derivada da lei de Gauss:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

Para finalizar a apresentação das fórmulas, a equação da força de Lorentz é mostrada a seguir, que é a força envolvida no processo de movimento do fluido deste trabalho.

Com a apresentação das equações acima, passamos para a influência de uma partícula carregada sofrendo a ação de um campo magnético, ou seja a mesma está em movimento através do campo. Essa é a prerrogativa para a equação da força de Lorentz:

$$F = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (14)$$

que determina a intensidade dessa força, sabendo-se os valores da carga elétrica q , do campo magnético B e da velocidade da partícula v .

SHERCLIFF(1965), coloca a força de Lorentz, quando atuando em sólidos, lembrando que um sólido não se deforma como o produto vetorial abaixo:

$$\vec{F} = \sigma \vec{E} \times \vec{B} \quad (15)$$

3 O vórtice em anel como entidade física, seu geração, movimento e estabilidade

3.1 Introdução

Ao ser criado, o vórtice em anel apresenta sua própria circulação, o que ocasiona uma certa estabilidade em sua existência e propagação e induz o movimento do fluido ao seu redor.

Aqui, é necessário entender o vórtice como um elemento físico, o qual faz com que o meio viscoso no qual ele se move sofra sua influência e reaja a essa. Seu formato é uma aproximação de um elemento toroidal, com propriedades que interagem com o meio durante seu movimento.

Para ser criado, o vórtice em anel precisa de uma impulsão inicial, e o vórtice se desenvolve incorporando fluido do meio, o que pode acarretar em um aumento do raio do vórtice, também surge uma esteira, resultado do deslocamento do vórtice.

3.2 Geração Experimental no Laboratório

Alguns estudos foram realizados na criação de vórtices em anel em fluidos. Na saída de tubos onde era forçado, um êmbolo empurrava o fluido para fora, e, MAGARVEY & MACLATCHY (1964) notaram através desta observação a formação da esteira devido ao deslocamento do vórtice. Não ocorre miscigenação dos fluidos do fluxo livre e do vórtice, e desse modo, ele se desloca como se fosse um corpo sólido.

Experimentos realizados por MAXWORTHY (1972), modelam a estabilidade após o surgimento do vórtice, conferindo assim, para determinados números de Reynolds, o comportamento do vórtice; a saber, a estabilidade foi encontrada para $Re < 600$. Para valores maiores do que esse, o fluxo se apresenta desorganizado e o vórtice dissolve-se, e surge outro em seu lugar.

Com isso, após ter sido estabelecido um valor para o impulso inicial do mesmo, verificou-se que, o raio aumentava na medida que o vórtice se deslocava devido à difusão viscosa, e, ao encontrar qualquer região de escoamento, esta permitia ao fluido externo adentrar-se, interagindo com ele.

Um outro experimento realizado na saída de um tubo, com um pistão forçando o fluido, realizado por DIDDEN (1979), foi modelado matematicamente por NITSCHKE *et*

al (1994). Esse experimento mostrou que, devido à camada limite no interior do tubo, a velocidade do núcleo central do fluido, excedia a velocidade do pistão que o impelia.

A figura 1 mostra a seqüência fotográfica desde antes da saída do fluido, e a formação do vórtice quando o referido fluido deixava o tubo em alta velocidade (velocidade alta essa que era responsável pela formação do vórtice, resultando em tensões que deformaram o fluido no orifício de saída).

FIGURA 1 – Experiência de Didden, realizada em 1979, na qual o fluido era impelido para fora de um tubo (NITSCHKE, 1994).

PAIREU *et al* (1997) geraram um vórtice que sofria erosão através de uma força de cisalhamento que tinha atuação lateral. Esta força era produzida através de meios mecânicos (um sopro produzido de forma controlada). Há nesse caso, uma relação entre a interferência externa e a vorticidade de modo que, se essa fosse maior que a interferência aplicada ao vórtice, esse não sofre nenhum dano. Mas, se a relação for inversa, o vórtice se desintegra deixando apenas filamentos remanescentes. um controle. A figura 2 mostra a simetria do vórtice em anel.

FIGURA 2 – Núcleo de um vórtice em anel produzido pela difração de um pulso em um tubo, no ar. Essa foto foi executada com um espelho, daí a sua simetria (Van DYKE, 1988).

3.3 A ocorrência na natureza

Na natureza acontece com frequência a formação de vórtices em anel na formação de nuvens. Há um modelo chamado em inglês ‘bubble theory’, a teoria da bolha, desenvolvido através da observação na formação de nuvens, a qual é amplamente aceita. BYERS (1973) coloca que essa modelagem foi proposta em 1953 por Scorer e Ludlam e se resume ao seguinte: uma massa de ar aquecido sobe e, ao mover-se para cima na atmosfera, espalha-se vertical e lateralmente, fazendo com que seu formato se assemelhe a um cone, movendo-se no espaço. Essa simulação pode ser feita em laboratório e é visível, macro e microscopicamente (veja figuras 3 e 4).

Há uma corrente ascendente ao centro e uma descendente nas bordas e, também a agregação de massas de ar que são trazidos para dentro do caminho onde a bolha se forma. Adicionalmente também, uma das características intrínsecas do vórtice em anel, esse modelo para formação de nuvens cumulus apresenta a manutenção da sua forma após seu início.

FIGURA 3 – Simulação de correntes ascendentes, na formação de nuvens cumulus mamatus, onde ocorre o vórtice em anel, utilizando permanganato de potássio para colorir e visualizar a formação na água (TRICKER, 1970).

FIGURA 4 – Observação da bolha de ar quente que origina o vórtice em anel na formação de nuvens. (TRICKER, 1970).

Sua concepção varia conforme o tipo de solo, pois a absorção de calor sendo dependente das propriedades da superfície e do material do qual é feita, sólido ou líquido

3.4 A ocorrência na aviação

Há algumas situações envolvendo aeronaves nas quais acontece a formação de vórtices em anel. Para citar uma delas, SEDDON (1991), na descida vertical de um helicóptero há o aparecimento de um vórtice em anel ao redor das extremidades do rotor principal (lembrando que o termo asas rotativas é utilizado na designação de helicópteros). A formação deste, influi no controle do aparelho e na sua manutenção de sustentação.

Na situação de descida, o escoamento ao redor das pás têm uma mudança significativa em relação às situações de ganho de altitude e de deslocamento.

FIGURA 5 - Vórtice em anel em um rotor de helicóptero numa descida, conhecido como “estado do vórtice em anel” (SEDDON, 1990).

Uma segunda situação semelhante ocorre quando a velocidade relativa ascendente do escoamento ao redor, anteriormente descendente, chamada V , torna-se negativa tornando-se assim descendente, sendo que a velocidade induzida, designada aqui v , é positiva, figura 5. Essa situação mantém a sustentação e estabilidade do aparelho. Porém, quando a velocidade descendente encontrar um valor de cerca de metade da velocidade induzida, ocorrerá uma interação que toma lugar entre o fluxo que segue para cima e o fluxo ao redor do disco formado pelas pás, fazendo com que apareça um vórtice em anel circundando o rotor.

Esse fenômeno é conhecido como estado do vórtice em anel. Apesar das características pouco usuais desse estado do vórtice em anel, é um estado que pode conduzir a auto-rotação.

3.5 – O vórtice em anel como entidade física e seu movimento

No caso do vórtice em anel, um corte longitudinal em relação ao seu deslocamento, pode ser considerado como dois cilindros em rotação, os quais representam de modo grosseiro o núcleo central do vórtice que gira com as características de uma sólido, onde a velocidade tangencial q de um elemento na posição (r, θ) seria definida por ωr (ambos sob o efeito Magnus) em sentidos contrários e com a formação de forças de sustentação que apontam para o sentido do deslocamento. A figura 7 elucida o comentado.

Como o vórtice em anel possui a forma próxima a de um toróide, para obtermos as equações de velocidade e energia, usamos as equações dessa figura geométrica, a saber, um toróide de raio externo b e raio interno a , figura 6.

FIGURA 6 – Toróide e suas dimensões.

Os valores do volume e da área do toróide são dados, respectivamente, a seguir:

$$Volume = \frac{1}{4} \pi^2 (a+b)(b-a)^2 \quad (16)$$

$$área = \pi^2 (b^2 - a^2) \quad (17)$$

FIGURA 7 – Vórtice em anel em movimento (SERRANO, 2000).

A Figura 7 acima ilustra um croquis bidimensional e instantâneo de um vórtice em anel em movimento, com a sustentação representada aqui pela letra L maiúscula, devido à gravura ter sido retirada de outra publicação em cada um dos segmentos decomposta vetorialmente. A sustentação é o fator que faz com que o vórtice se desloque e que seu aumento radial, mencionado acima, ocorra. A figura mostra apenas a força de sustentação sem tratar dos esforços internos do fluido que, no caso, fazem com que o vórtice se mantenha coeso ao se mover.

SAFFMAN (1995) apresenta os valores das velocidades angular e tangencial no centro do vórtice (núcleo central do toróide, à partir do centro), que são, respectivamente:

$$\vec{\Omega} = \frac{\Gamma}{\pi a^2} \quad (18)$$

$$\vec{q} = \frac{\Gamma}{2\pi a^2} \quad (19)$$

As velocidades de deslocamento do vórtice como um todo são apresentadas por MAGARVEY & MACLATCHY(1964), a velocidade de translação do vórtice é dada por:

$$\vec{U}_T = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right) \quad (20)$$

Para a equação (20): R é o raio externo do anel e a é o raio do núcleo central do anel (o centro dos vórtices nessa visão bidimensional) .

3.6 Geração de vórtices em fluido condutor através da indução magnetohidrodinâmica

Como foi mencionado acima na introdução dessa seção para ser criado, o vórtice em anel precisa de uma impulsão inicial. No caso desse trabalho essa impulsão é fornecida pela interação dos campos elétrico e magnético e do aparecimento da força de Lorentz dentro do fluido, que atua nas partículas do fluido e é logicamente mais intensa na região entre os eletrodos.

Nas Figuras 8 a 10 pode-se ver a localização dos eletrodos na parte inferior da célula, bem como com as paredes verticais formando a base e o topo de um triângulo truncado, geometria que favorece o aparecimento do movimento circulatório no fluido. Ou seja, ao iniciar o movimento sendo submetido à força eletromagnética, o fluido só pode se deslocar no sentido permitido pela geometria, originando uma circulação no local onde está confinado.

Quando ocorre a ação da carga e dos campos e o movimento mantém-se uniforme ou seja o escoamento se estabilize. O surgimento de um movimento circulatório no fluido, (desde que esse possa ser controlado e direcionado,) permitem antever ser possível controlar a criação, manutenção do movimento do fluido. Desse modo, aqui é apresentada uma descrição dos efeitos que podem servir de base para uma nova empreitada mais elaborada e direcionada especificamente às características intrínsecas de formação e monitoramento do vórtice em anel, propriamente dito e o quanto este afeta o meio em que se move.

FIGURA 8 – Vista em corte da célula utilizada para o experimento, onde pode-se notar, pelo desenho esquemático: a localização dos eletrodos, o formato afunilado na lateral e onde a circulação se manifesta durante a passagem das cargas nos campos envolvidos.

FIGURA 9 - Célula vista de cima, de onde se pode ver os eletrodos fixados na base, tendo um formato afunilado, acompanhando a cuba.

FIGURA 10 - Vista lateral da célula, vê-se a elevação interna: aplicação do princípio descrito, para a formação do vórtice.

A célula onde foram tomados os dados experimentais tinha o seu formato como parte de um segmento de um outro aparelho utilizado por Serrano o qual, é apresentado em um desenho esquemático abaixo (veja Figura 11).

FIGURA 11 – Concepção do conjunto das células tridimensional com o vórtice em movimento. (SERRANO, 2000).

Apesar de Ter uma forma circular, o elemento não tinha uma suavidade no seu contorno, mas era fracionado em pequenos compartimentos individuais que eram tratados como independentes entre si, no que se referia à distribuição de carga nos seus eletrodos.

Ao todo, essa célula completa possuía 10 segmentos, cada um separado do próximo por uma placa que funcionava como material isolador. Em cada segmento havia um par de eletrodos com polaridades intercaladas.

Esse formato foi adotado para facilitar a visualização do escoamento. A célula anular completa, como ilustrada na Figura 11, isso apresentava dificuldade para a visualização do movimento.

Tal equipamento tridimensional, tinha o intuito de criar um escoamento em forma de toróide, ou seja uma aproximação de um vórtice em anel. A figura 11 mostra onde ocorre o fenômeno em três dimensões, observando-se a cuba circular completa. O fluido é representado em seu movimento circulatório nas linhas curvas formando espirais, que indicam a circulação no movimento do fluido.

4 Experimentação

4.1 Descrição do equipamento

Para a leitura e análise dos vórtices gerados na célula foi utilizado um equipamento óptico fabricado pela empresa Oxford lasers, que opera com o foco de luminescência através de vapor de cobre, obtido pela sublimação de barras desse metal.

Esse equipamento gera uma quantidade de energia de cerca de 20 kV, gerados pela rede de linha de 360 V d.c. Além dessa alta voltagem, há também a temperatura envolvida na operação, que é cerca de 1.300°C , necessária para a descarga no tubo do laser. Outras características do laser são a potência média de radiação de 20 Watts e sua pulsação de 10 kHz. Se outras frequências forem necessárias, utiliza-se o “trigger” do aparelho que permite pulsos que variam de 10 a 60 nanosegundos.

Através da excitação de elétrons do cobre há uma mudança dos mesmos de sua camada original, e em seu retorno, esses emitem fótons que são a fonte de luz do laser.

Com o funcionamento do laser é possível a formação da folha de luz, que é o elemento que concentra a luz na região de estudo ser capturada através de uma câmera fotográfica.

Ao ser colhida, a seqüência de imagens é armazenada de forma a ser posteriormente processada através de programas específicos, que fornecem dados como, por exemplo, a velocidade dos campos envolvidos na visualização. Portanto, a folha de luz projetada pelo laser permite o registro de imagens de partículas pela câmera que faz fotos quadro a quadro e posteriormente permite identificar o movimento do fluido.

Partindo para descrição da criação dos campos elétrico e magnético: temos dois solenóides sobrepostos, em série, ambos com 50 cm de diâmetro, sendo a alimentação dos mesmos sendo feita por uma fonte, da marca Tectrol - indústria brasileira, que pode fornecer uma corrente contínua de até 100 A e uma tensão de até 40 V.

Enquanto o campo magnético permeava todo o volume em questão a ser analisado, ou seja, a célula submetida a este, uma outra fonte, um Variac com graduação até 220 Volts alimentava o campo elétrico situado entre os eletrodos da célula. Uma vista geral da disposição da célula no experimento é apresentada vista na figura 12.

A célula situa-se sobre o solenóide inferior, mantendo assim proximidade dos eletrodos da célula sobre o núcleo do campo formado neste. Com o correto posicionamento da célula, esta era completada com água marinha, que é o nosso fluido

condutor, e tinha acionadas ambas as fontes de ambos os campos e, com isso, sofria a ação da força de Lorentz, ocasionando assim, circulação no fluido.

FIGURA 12 – Detalhe da posição da célula colocada entre os dois solenóides que produzem o campo magnético. Na parte inferior da mesma são visíveis os eletrodos internos, responsáveis pelo campo elétrico.

FIGURA 13 – Visualização, no monitor, de ajustes dimensionais do programa Visiflow.

4.2 Coleta de dados

Ao ser captada pela câmera, a imagem das partículas é colocada no monitor do microcomputador e, a partir daí, esta sofrerá um processo de binarização, que pode ser visto na figura 14, e no monitor na figura 15. Assim, a leitura se fundamentará apenas nos contrastes entre 2 cores, para que seja possível a interpretação do movimento das partículas (a iluminação intensa fornecida pela folha de luz permite o registro de sua trajetória em imagens sucessivas).

FIGURA 14 – Imagem transformada em forma binarizada para facilitação da leitura do movimento.

O programa realiza a localização pontual das partículas dentro de um universo definido pelo operador. Tempo de exposição, tamanho da imagem a ser analisada pontualmente, área de cálculos em pixels são ajustadas, o que possibilita a determinação de velocidades desejadas.

FIGURA 15 – Imagem do fluido em rotação na célula através da ação do programa Visifow, visto pelo monitor do micro computador, via câmera CCD.

4.3 Análise dos dados

De posse das imagens captadas através da leitura da câmera e da pulsação do laser, o programa começa a atuar para que seja possível a análise dos dados obtidos.

As formas de análise são: correlação cruzada e auto correlação, e análise da trajetória das partículas. Aqui adotou-se a última forma.

Após os ajustes que dependem do usuário (operador), o programa Visiflow executa operações de correlação, apresentando o campo de velocidade mais provável obtido a partir das imagens coletadas.

O programa Visiflow foi criado e desenvolvido pela AEA Technology para sistemas de aferição PIV, que é a sigla da abreviação de palavras, em inglês, para “Particle Image Velocimetry”, utilizando o ambiente Microsoft Windows.

Para cada seqüência analisada foram alteradas as correntes imputadas ao conjunto de solenóides a partir de 50 Ampéres, assim como a carga nos eletrodos, que começou com 10 Volts. Desse modo, para várias cargas diferentes, os campos envolvidos foram obtidos em intervalos de um décimo de segundo.

De posse de um conjunto de vinte quadros, colocados ordenadamente pela câmera em conjunto com o programa, conforme se tomaram imagens, parte-se para a análise, determinando qual a primeira imagem de determinado arquivo. Esses arquivos são postos em configuração .piv, de modo que o programa possa lê-los e interpretá-los conforme a programação anterior.

A imagem final devidamente processada é como a que se apresenta na figura 16, ressaltando os vetores médios mais significativos o local de escoamento mais intenso.

FIGURA 16 – Exemplo de um tipo de apresentação na tela após a análise feita pelo Visflow, são visíveis os vetores de onde foram efetuados o rastreamento mais indicativos.

O modelo da câmara CCD utilizado é a Kodak Megaplug tem uma resolução de 1024 x 1024 pixels.

Se houver uma deficiência em relação à visualização da partícula em toda a trajetória, a análise de correlação através da obtenção dos centros de gravidade, ou centróides, dos grupos de partículas escolhidos devido à sua luminescência e visibilidade pode fornecer uma aproximação. A análise de determinação dos centróides segue um algoritmo Gaussiano bi-dimensional.

O programa identifica cada objeto, afere e passa para o objeto seguinte mas antes, o próprio programa apaga os dados das partículas que são duvidosos ou incoerentes, segundo o padrão adotado para verificar as trajetórias.

A condutividade do fluido veicular também foi levada em consideração, sendo que a mesma foi aferida com o auxílio de um condutivímetro. A medida em questão foi a condutividade específica, veja anexo B, que, para água do mar utilizada foi encontrado o valor de 23,4 $\mu\text{S/m}$ a 23° Celsius (a diferença entre o valor obtido na análise da condutividade e o valor estimado da mesma talvez se deva ao tempo que a água marinha ficou estocada, alterando assim suas propriedades). A leitura da condutividade foi conduzida em um dia diferente das leituras com o laser, a fim não se alterar as características da água.

A tabela abaixo exemplifica alguns valores de meios fluidos:

Tipo do fluido	C – condutividade específica
Água pura	0,055 $\mu\text{S/cm}$
Água marinha	50.000 $\mu\text{S/cm}$

TABELA 1 – Valores de C para água marinha e água pura.

Além de campos de velocidade, outra análise possível, para esse experimento, é a indicação de vorticidade no escoamento analisado. Esses resultados se apresentam como escalas cromáticas, indicando onde há aparecimento de vórtices, assim como suas intensidade e sentido (veja figura 17). Uma outra interpretação é possível, ao notar-se o aparecimento e aumento ou diminuição destes, além de se poder aplicar linhas de corrente sobre os resultados, vistas na figura 18, que podem indicar variações na continuidade do escoamento. No caso deste trabalho, pode fornecer respostas diretas dos efeitos dos campos aplicados em relação à circulação.

FIGURA 17 – Análise de vorticidade apresentada através de escala cromática, com vetores acrescentados através de interpolação.

FIGURA 18 – Análise de vorticidade do movimento, com vetores adicionados e linhas de corrente, sobrepostas aos elementos do escoamento.

Ao serem computadas as deficiências quanto à leitura da trajetória e ao acréscimo de vetores que, por isso, foram interpolados em relação aos que já existiam, os resultados são fornecidos diretamente relacionados com a escala de cores, tanto a vorticidade, como os vetores (sejam estes os adicionados por interpolação ou não).

4.4 Apresentação das gravuras

A escala cromática usada na exposição do quadro após a análise, indica quais vetores estão mais próximos da leitura real e quais foram acrescentados, via interpolação, para que fossem preenchidas lacunas que impedissem a análise do escoamento.

Apesar de ser possível selecionar vetores de modo monocromático, optou-se usar a escala de cores, que mostra quais vetores aparecem com maior, média e menor frequências, a saber: os de coloração verde são os mais facilmente localizados na trajetória, ou seja, aparecem num pico maior; já os azuis, têm um aparecimento abaixo desses primeiros e, conseqüentemente, os de cor vermelha aparecem com menos intensidade. Desse modo, analisando as seqüências de saída de dados, e observando uma maioria de vetores verdes e azuis, pode-se dizer que as análises apresentadas estão muito próximas das trajetórias reais.

4.5 Leituras das velocidades tangenciais à superfície

Para que fossem aferidos os valores das velocidades que acompanhavam uma das superfícies da célula, a mesma foi dividida em espaços de 0,5 cm do início da área onde a circulação foi registrada pelo equipamento (figura 19) dimensão essa definida pelo observador. Com essa divisão, as velocidades obtidas nestes pontos recebem os números destes. Essa distribuição foi necessária para que se obtivesse o maior número de velocidades possível e isto ocorreu na maioria das vezes.

A fim de se registrar os valores das velocidades, uma escala no tamanho da tela do computador foi usada para cada análise feita. Assim, ao encontrar-se os vetores, esses eram analisados um a um. Para tanto, usou-se um recurso do próprio programa, que fornece a velocidade e direção de cada vetor escolhido, para uma seqüência determinada.

FIGURA 19 – A fotografia acima mostra, de modo esquemático, onde foram tomadas as velocidades tangenciais à superfície interna da célula.

A escolha das velocidades tangenciais se deu conforme mostrado na figura 20. Assim as velocidades tangenciais estão na superfície afunilada da célula, onde o escoamento é ascendente, figura 20.

FIGURA 20 – As velocidades tangenciais representadas com o centro focado na região de maior intensidade de circulação (Γ).

O número de divisões obtido, para que se mantivesse uma exatidão ótica, foi de 25 valores, a figura 20 mostra um desenho esquemático dos pontos das velocidades que eram intervalos de 0,5 cm divididos em um espaço horizontal de 12,5 cm. Como foi dito antes, nem todos os pontos apresentaram velocidades, mesmo após o trabalho de interpolação efetuado pelo programa. Além disso, como se trata aqui de velocidades tangenciais, o ângulo fornecido, caso a caso, foi desprezado, pois sua variação era pequena se comparada à superfície, a qual era sua referência.

Com os valores das velocidades tangenciais e outras, como velocidade média da análise de uma seqüência, buscou-se uma relação com um coeficiente de pressão associando esses fatores. Para diferentes valores de cargas aplicadas, foi tomado o maior número de leituras legíveis pelo programa e pelo operador, visto que é necessária a visualização dos vetores para a sua análise individual. Os resultados são apresentados nas tabelas 2 e 3, na próxima página.

pto\ tempo	ensaio1-15"	ensaio1-30"	Ensaio2-15"	Ensaio2-30"	Ensaio3-15"	Ensaio3-30"
1	0,4133	0,4255	0,4221	0,4453	0,4384	0,4069
2	0,4204	0,3973	0,4212	0,4598		0,3808
3	0,8008	0,4181	0,4432	0,4975	0,4207	
4	0,3407	0,4223	0,5121	0,5051	0,4976	0,4069
5	0,3949	0,4321	0,6853	0,6639		0,5687
6		0,5498		0,6401		0,5562
7	0,4401			0,4396	0,4094	
8			0,5129			0,4443
9	0,4491	0,4499	0,4438			
10	0,4397	0,5011		0,5003		0,4122
11	0,4085			0,5010	0,4980	0,4249
12		0,3986	0,3998	0,5114	0,4536	0,4562
13			0,4067			
14		0,3992	0,4558	0,5963		0,4147
15	0,4017		0,4998			0,5644
16	0,4238	0,4551		0,4879	0,4398	
17				0,4551		0,4446
18	0,4605			0,4881		
19	0,4027		0,5119	0,4015		0,4142
20		0,4253	0,5412			0,4356
21		0,4257	0,4769			
22	0,3998	0,4198		0,4212		
23		0,3376		0,4099	0,7013	0,3296
24			0,4012			0,3328
25	0,2608	0,3199		0,3266	0,4152	

TABELA 2 – Valores das velocidades [m/s] obtidas tangencialmente à superfície, para os Ensaios 1, 2 e 3.

pto\ tempo	Ensaio4-15"	Ensaio4-30"	Ensaio5-15"	Ensaio5-30"	Ensaio6-15"	Ensaio6-30"
1	0,9779	0,6419	0,4566	0,3997	0,5080	0,4920
2	2,197	0,3736	0,4387	0,4459	0,4410	0,4219
3	0,6696	0,5948	0,4399	0,5103	0,4210	0,4301
4	0,6368	0,4397	0,5125	0,4962	0,4104	0,4559
5	0,9412		0,4212	0,5107	0,5070	0,4550
6	0,4488		0,5126	0,5218	0,4872	0,4409
7	0,5906	0,5625		0,5232	0,5443	0,5449
8		0,6048				0,4842
9	0,6146			0,6108	0,4402	0,7630
10			0,6028			
11		0,4402	0,4854	0,6204	0,6697	
12						
13	0,9413	0,5625	0,7319	0,7211	0,4988	0,5262
14			0,5329			0,4705
15			0,4418	0,5096	0,5440	
16			0,3977	0,4218		
17	0,5902	0,3225				0,4707
18	0,6146			0,5015	0,4049	0,3769
19	0,7152	0,3994				
20				0,5389	0,4039	
21		0,3694				
22						
23	0,4026	0,3630				0,3807
24			0,2994	0,3874	0,3841	0,8159
25	0,3760	0,4344		0,3097	0,3420	0,3466

TABELA 3 – Valores das velocidades [m/s] obtidas tangencialmente à superfície, para os Ensaios 4, 5 e 6.

5 Resultados Experimentais

Com os valores da circulação e da velocidade fornecidos pela visualização através do programa, foram adotados valores para a viscosidade μ e para a massa específica ρ . Para a viscosidade μ da água, através do gráfico de KARAMCHETI (1996, pag. 8) temos o valor de $11,4 \times 10^3$ P (1 Poise = $0,1 \text{ Kg/m}\cdot\text{seg}$) para $T = 15^\circ \text{ C}$ (valor este que se encaixa para a temperatura encontrada). Já para o valor da massa específica, temos ρ igual a 1.000 Kg/m^3 .

Segundo os resultados experimentais, os valores da circulação para cada tomada relacionada com as cargas aplicadas aos campos elétrico e magnético, temos uma sucessão fornecida pelo programa, mostrada no gráfico 1 abaixo, das características dessas situações, conforme o seu aparecimento.

GRÁFICO 1 - Carga aplicada no campo elétrico (Volt) X vorticidade obtida (cm^2/seg).

5.1 Apresentação dos resultados

Foram efetuados vários ensaios que serão apresentados aqui como sendo uma sequência, mas alguns foram refeitos com as mesmas condições operacionais em dias diferentes. Apesar disso, as condições atmosféricas variaram pouco. A temperatura variou de 26° a 29° C e a umidade relativa esteve sempre ao redor de 70%.

A fim de não se apresentar os mesmos dizeres de modo repetitivo, menciona-se aqui cada ensaio apresentado tem seu número e, associado a este, seus valores de cargas aplicadas. Os valores em Amperes dizem respeito à alimentação do campo magnético aplicado a ambas as bobinas. As cargas em volts dizem respeito ao campo elétrico entre os eletrodos. As análises fornecem formas das linhas de corrente, plotadas pelo

programa e a visualização em escala cromática da vorticidade, indicando a intensidade e sentido de rotação. A escala cromática para vorticidade é apresentada paralela ao esquema gráfico.

Todas as tomadas foram efetuadas a partir de seqüências com um número fixo de 30 imagens, divididas em seqüências menores de imagens. Assim, quando houve uma situação onde há uma repetição da tendência, geralmente ao fim das tomadas, essas imagens não foram acrescentadas para que a apresentação não se tornasse repetitiva, pois havia diferenças muito sutis, em alguns casos. O tempo de exposição para cada imagem é de 1 segundo sendo, trinta segundos cada seqüência completa.

Após todas as tomadas mais relevantes terem sido gravadas, selecionaram-se cerca de dez séries mais significativas e, destas, seis apresentaram melhores resultados, levando em conta variações da circulação. Em casos onde foram repetidas as cargas, foram escolhidas as imagens com os melhores indicadores de movimento e circulação que se apresentaram mais nítidos, isto é, com a escala cromática mais acentuada.

Ensaio 01: 50 A X 50 V

FIGURA 21 – Primeiro passo na análise de vorticidade, com adição dos vetores, do Ensaio 01, com a foto sobreposta.

Ensaio 01: 50 A x 50 V

FIGURA 22 – Imagens de duas seqüências, em relação a vorticidade, do Ensaio 01(a 1ª está à esquerda. Note-se o aumento da intensidade das cores à direita).

FIGURA 23 – Imagens da análise da vorticidade e das linhas de corrente para a segunda seqüência de dez imagens- Ensaio 01.

$t=10''$	$t=20''$	$t=30''$
$2,0 \times 10^0$	$0,3 \times 10^0$	$0,4 \times 10^0$
$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$0,5 \times 10^0$
$-3,0 \times 10^0$	$-8,5 \times 10^0$	$-8,9 \times 10^0$
$-7,8 \times 10^0$	$-1,0 \times 10^1$	$-1,2 \times 10^1$
$-1,6 \times 10^1$	$-1,5 \times 10^1$	$-1,6 \times 10^1$
*	$-1,7 \times 10^1$	$-1,8 \times 10^1$

TABELA 4 – Valores significativos de Γ encontrados para o Ensaio 01.

Ensaio 02: 60 A X 40 V

FIGURA 24 – Exemplo de análise do Ensaio 02, com a foto sobreposta.

FIGURA 25 – Análise da primeira e segunda seqüências de imagens (respectivamente a esquerda e a direita) quanto à vorticidade e linhas de corrente, no Ensaio 02.

$t=10^{ss}$	$t=20^{ss}$	$t=30^{ss}$
0,5 x e 000	2,0 x e 000	7,9 x e 000
1,0 x e 001	1,0 x e 000	3,0 x e 000
-2,0 x e 001	-1,7 x e 001	-1,6 x e 001
-1,8 x e 001	-1,5 x e 001	-1,5 x e 001
-1,6 x e 001	-1,0 x e 001	-1,4 x e 001
-1,0 x e 001	*	*

TABELA 5 – Valores significativos de Γ encontrados para o Ensaio 02.

A fim de se comparar resultados destas primeiras seqüências, são mostrados abaixo alguns gráficos comparativos. Nota-se que a variação é modesta até a carga de 70 V x 70 A, ou seja, até o Ensaio 03, se comparados aos resultados seqüentes, gráfico 2. O gráfico 3 mostra o valor da vorticidade em sua relação com o tempo.

GRÁFICO 2 – Variação da velocidade média encontrada para as três seqüências iniciais, para valores menores que 100 A .

GRÁFICO 3 – Variação dos valores de Γ nos sentidos horário e anti-horário para as três primeiras seqüências.

Ensaio 04: 100 A X100 V

FIGURA 28 –Exemplo das primeiras imagens da análise do Ensaio 04; primeira série de imagens com a foto tendo sua binarização invertida e alguns vetores visualizados (a esquerda) e, com sua análise de movimento, com os vetores interpolados e sem a foto.

FIGURA 29 – Segunda série de imagens antes (a esquerda) e depois da interpolação, desta vez já com análise das linhas de corrente.

Ensaio 05: 100 A X120 V

FIGURA 30 – Vistas de exemplos de imagens tomadas de seqüências numa primeira tomada- Ensaio 05.

FIGURA 31 – Vistas de exemplos de seqüências analisadas quanto a vorticidade –Ensaio 05.

Ensaio 06: 100 A X140 V

FIGURA 32 – Exemplos de seqüências de movimento visualizadas e após o cálculo da a interpolação.

FIGURA 33 – Exemplos da evolução do movimento, com visualização da vorticidade e linhas de corrente, através da interpretação do programa, no ensaio de número. 6, onde pode-se notar mudanças sutis do movimento destrógiro do fluido.

t = 10"	t = 20"	t = 30"
*	Ensaio 4	*
1,2 x e 001	2,0 x e 000	1,3 x e 000
1,0 x e 000	-0,9 x e 001	1,6 x e 000
-1,3 x e 001	-1,1 x e 001	-2,3 x e 000
-1,8 x e 000	-1,4 x e 001	-2,6 x e 000
	Ensaio 5	
-7,7 x e 001	7,9 x e 000	-3,2 x e 000
-1,4 x e 002	4,0 x e 000	-1,6 x e 000
-1,5 x e 002	-4,0 x e 000	1,6 x e 000
	-7,9 x e 000	
	Ensaio 6	
1,2 x e 000	1,6 x e 001	9,8 x e 000
1,0 x e 000	1,4 x e 001	1,0 x e 001
-0,6 x e 001	-7,9 x e 000	-9,8 x e 000
-1,2 x e 001	-1,4 x e 001	-1,0 x e 001
-2,4 x e 001	-2,8 x e 001	-1,5 x e 001
		-2,0 x e 001

TABELA 7 – Valores significativos de Γ encontrados para os Ensaios de número 04, 05 e 06, identificados pela escala cromática.

A fim de melhor visualizar o acréscimo dos valores da velocidade que ocorreu para os valores dos ensaios numerados como 4, 5 e 6, com o valor da alimentação dos solenóides em 100 A, está colocado abaixo o gráfico 4 com os valores obtidos. A partir da carga de 100 A, a velocidade salta para valores muito superiores das obtidas com cargas até 70 A, que estavam em valores até então, decimais.

Ensaios >	04	05	06
Tempo (")			
3"	67	122,0	146,9
6"	103	146	153,6
10"	112	155	160,6
13"	137	154	233,5
15"	190	155	260,9
18"	213	157	264,4
20"	217	159,4	270,6
23"	226	163	272,7
25"	230	176	299,3
30"	230	231,3	309,2

TABELA 8 – velocidades médias [mm/s] dadas pelas leituras nos Ensaios 04, 05 e 06.

GRÁFICO 4 - Velocidades médias[mm/s] do fluido para as cargas nos solenóides de 100 A, nos Ensaio 04, 05 e 06.

5.2 Variação da pressão devido à circulação

A geometria da célula experimental ilustrada na Figura 8 do Capítulo 3, faz parte de um conjunto tridimensional que, por sua vez, representa de um modo análogo uma tentativa de se criar um sistema de diminuição de arrasto de um veículo submarino, onde um vórtice em anel seria posicionado na frente de uma estrutura tridimensional, semelhante a ilustrada na Figura 4. Esta seria uma parte dianteira do veículo.

O propósito é manter o vórtice induzido no fluido no qual há a hipótese de que o referido veículo se movimentaria, criando, dessa forma, um decréscimo de pressão significativa sobre a superfície frontal, adjacente ao vórtice em anel.

Normalmente, o que ocorre em um movimento de um corpo em um fluido, na parte anterior desse corpo há valores positivos do coeficiente de pressão; valores estes que se apresentam como o efeito geral de arrasto devido à pressão na parte de impacto do fluido no corpo. Esse é o efeito normal devido ao movimento de um corpo em um fluido, onde o fluido apresenta a reação de resistência ao movimento deste, gerando o arrasto. Daí o interesse em se tentar diminuir a pressão, para que o fluido, de algum modo, se moldasse à área da superfície do corpo em movimento, mudando o ponto de estagnação.

Em se tendo a indução do vórtice em anel sobre a parte do fluido onde se inicia a reação ao movimento, implica em valores mais baixos de C_p , que são criados naturalmente, na tentativa de se diminuir o arrasto. No caso específico do vórtice, há uma situação onde existe a possibilidade de haver potência cinética e eficiência suficientes que passam a criar uma situação predominante de distribuição de C_p de valores menores.

FIGURA 34 - Situação análoga ao experimento, com a célula formando um sólido.

Considerando o sistema aqui estudado aplicado a um veículo, tem-se o comportamento da variação do C_p específico distribuído sobre a superfície da estrutura que mais interessa para a observação. Assim sendo, a expressão do C_p específico para o escoamento relacionado com o experimento é:

$$C_p = 1 - \left(\frac{V_{local}}{V_{\infty}} \right)^2 \quad (21)$$

(A equação 21 é uma aproximação de um cálculo de C_p local, para mostrar que há variação das velocidades encontradas em alguns pontos pré-estabelecidos, como já mencionado).

Considerando a analogia ilustrada anteriormente nas Figuras 35 e 36, o problema inicial é a definição de um valor hipotético da velocidade do escoamento livre relativo ao veículo, pois, nesse caso experimental não há velocidade relativa ao sistema representado que possa ser considerado estritamente análogo à V_∞ como a velocidade do escoamento livre (V_∞ seria a velocidade do veículo em relação ao escoamento livre).

Para o valor da velocidade local, esta é considerada a velocidade no ponto P, velocidade esta analisada pontualmente de modo a que se aproxime do valor da velocidade instantânea do fluido ao redor do vórtice ao longo da superfície externa na qual este ocorre.

O empuxo do campo no fluido atua apenas entre os eletrodos. Ao longo do caminho o fluido é forçado devido à limitação mecânica das paredes. Ocorre, por isso, nas paredes o aparecimento de pequenos vórtices em sentido contrário.

O aumento da quantidade de movimento devido à aceleração do fluido entre os eletrodos ocorre devido à atuação da força de Lorentz.

Se houver por parte da geometria da cuba a manutenção da forma do vórtice (que é o que foi tentado aqui), numa idealização de um vórtice intenso, numa outra escala, teremos o escoamento livre auxiliando a formação e manutenção do vórtice em anel, pois suas fronteiras se encontram durante o deslocamento do corpo. Então teríamos uma espécie de apoio à rotação na forma do efeito de interação entre o escoamento livre e a circulação do vórtice.

A figura 36 mostra um desenho esquemático da formação do vórtice na célula.

FIGURA 35 –Vórtices internos na célula (à esq.), e externos, no fluxo livre.

Um coeficiente C_p (específico para o caso de captação das velocidades tangenciais) foi idealizado para ser calculado através das respectivas velocidades obtidas mas, nesse caso, para duas seqüências de 15 segundos cada (ao invés das de 10'' tomadas para a análise anterior). Assim, para cada valor pontual localizado ao longo da célula há um valor da velocidade (das tabelas 2 e 3). Para o valor da velocidade do escoamento livre adotou-se a velocidade média do movimento circular do fluido. Os gráficos seguintes têm na abscissa as localizações pontais e nas ordenadas os valores do C_p específico para o experimento.

ENSAIO 01: 50 A x 50 V

GRÁFICO 5 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 1, 15''.

GRÁFICO 6 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 1, 30''.

GRÁFICO 7 – Todos os valores de Cp para o Ensaio 1.

ENSAIO 02 : 60 A x 40V

GRÁFICO 8 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 2, 15".

GRÁFICO 9 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 2, 30".

GRÁFICO 10 – Todos os valores de Cp para o Ensaio 2.

ENSAIO 03: 70 A x 70 A

GRÁFICO 11 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 3, 15".

GRÁFICO 12 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 3, 30".

GRÁFICO 13 – Todos os valores de Cp para o Ensaio 3.

ENSAIO 04 : 100 A x 100 V

GRÁFICO 14 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 4, 15”.

GRÁFICO 15 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 4, 30”.

GRÁFICO 16 – Todos os valores de Cp para o Ensaio 4.

Nota: No caso dos gráficos 14 e 15 do ensaio 4, as escalas das ordenadas foi adotada automaticamente pelo programa para melhor visualização, daí alguma variação entre o primeiro e o segundo gráficos.

ENSAIO 05: 100 A x 120 V

GRÁFICO 17 – Variação dos valores de Cp para o ensaio 5, 15".

GRÁFICO 18 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 5, 30".

GRÁFICO 19 - Todos os valores de Cp para o Ensaio 5.

ENSAIO 06: 100 A x 140 V

GRÁFICO 20 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 6, 15".

GRÁFICO 21 – Variação dos valores de Cp para o Ensaio 6, 30".

GRÁFICO 22 - Todos os valores de Cp para o Ensaio 6.

GRÁFICO 23 – Valores da variação máxima de Cp negativo para todos os ensaios.

O gráfico 23, mostrado acima, expõe os valores do Cp negativos em todas as seqüências dos ensaios.

Para os ensaios 2, 3 e 4, os valores de Cp se apresentaram positivos e, mesmo sendo os menores valores encontrados, não foram plotados. Para este caso têm relevância somente os valores negativos. Lembrando que a relação depende diretamente das velocidades encontradas. Portanto os valores de Cp positivos mostraram que o fluido exerce pressão positiva devido ao movimento mas apresentam a tendência a diminuir, provavelmente devido à intensidade do empuxo fornecido ao fluido.

Já para as situações onde os valores de Cp se apresentam negativos – graças às velocidades encontradas, relativamente altas – surge a situação que demonstra que é possível a diminuição de pressão ao longo da superfície que esteve em contato com a maior parte do fluido em movimento.

5.3 Observações gerais sobre os resultados

A maioria dos sistemas de visualização de escoamento constitui-se de introdução de partículas que delineiam traçados, ou na detecção de mudanças nas propriedades óticas do fluido. Nos líquidos, gotas coloridas e bolhas de gás são marcadores de traçado comuns. Uma linha de bolhas de hidrogênio, por exemplo, pode ser formada na água aplicando-se um pequeno pulso elétrico em um fio reto imerso no fluido, DOEBELIN (1990).

No caso desse experimento, estas bolhas de hidrogênio, e de outros gases, se formam devido à eletrólise presente durante todo o tempo de tomada das imagens. Além disso, as referidas bolhas foram acompanhadas de máculas provenientes dos eletrodos, o que, de certo modo, pode ter causado alguns erros na determinação da trajetória das partículas. Um fator relevante nesse caso, que foi o motivo principal da limitação do tempo para as leituras, é a prescrição de que o local que estiver sendo mensurado deve apresentar o ponto de tomada de leituras sem rasuras que possam interferir nas mesmas, isto é, deve apresentar-se e manter-se transparente para as tomadas, haja visto que o efeito de eletrólise torna a água opaca.

Outro ponto a ser relatado aqui é o efeito de descargas elétricas entre os eletrodos a partir de uma dada carga. Esse fato também pode ter alterado alguns dados de leitura das partículas, pois certamente, a visualização, nestes instantes, ficou alterada devido aos clarões e, muito provavelmente, após estes houve algum desprendimento de material por parte dos eletrodos.

Com esses exemplos citados, é natural que nem todas as leituras tivessem seus desenvolvimentos efetuados com total exatidão. Os desvios, espera-se, foram minimizados em razão da quantidade de tomadas de imagens que foram realizadas.

Sendo assim, ao apresentar-se um gráfico com algumas velocidades acima da média geral descrita pelo mesmo, deve-se levar em consideração as limitações intrínsecas ao experimento.

Há velocidades, apresentadas geralmente nos ensaios onde a carga aplicada no campo elétrico foi de maior intensidade, com valores relativos para um experimento que diferem de um fator 3 (veja Tabelas 2 e 3). Deve-se notar que, apesar de seus valores não serem referentes à distribuição de todas as partículas e respectivas velocidades, encontradas no movimento do fluido na célula, há um afinilamento característico da célula (analogia do aerofólio - onde o fluido tende a acelerar) local no qual se concentram as maiores velocidades. Isso faz com que sejam plausíveis estes valores, tendo-se em conta a escala das grandezas encontradas. Algumas velocidades encontradas foram muito superiores às médias, como, por exemplo, aquelas próximas ao centro do vórtice.

6 Conclusões

Para o término desta análise, alguns fatos podem resumir o objetivo e as soluções desse trabalho.

Houve o objetivo de se analisar o movimento da água salgada dentro do segmento experimental, assimilando a situação hipotética de um sistema, no qual seria possível uma diminuição de arrasto, através da integração do meio com o corpo que se desloca neste. As medidas de velocidade ao longo da superfície de interesse de leituras demonstraram que o aumento de potência eletromagnética aplicada resultou numa aceleração e, por consequência, diminuição do valor médio da pressão distribuído ao longo da referida superfície.

Ao longo das coletas de dados, a sua logística e a maneira como foi montada a experiência, notou-se que alguns resultados às vezes eram imperceptíveis a olho nu e noutros o equipamento obteve imagens turvas. Quando não se faziam notar de modo visual as movimentações no fluido, fazia-se o contraste com a respectiva análise da sequência de imagens, processando-as para verificação de movimento ou não através do uso do programa.

Esses fatores (os que auxiliaram o movimento e também os que o atrapalharam) foram levados em consideração e várias repetições tiveram que ser executadas, o que proporcionou uma reciclagem em todas as coletas averiguadas. Levou-se em conta, portanto, as melhores seleções de imagens, mas sempre respeitando a sequência na qual se fazia necessária a repetição para preservar ao máximo o estado dos eletrodos que se deterioravam rapidamente, pois além da carga aplicada ter sido alta, o meio era eletrolítico fazendo com que estes perdessem muito material. O material dos eletrodos não era desenvolvido para resistir à desintegração. Os únicos critérios eram que fosse um material condutor e que não tornasse o fluido opaco. O eletrodo por si só mereceria todo um trabalho de pesquisa, visto que a eficiência do processo passa diretamente pela sua estrutura e características intrínsecas. Mas isso não é parte do escopo deste trabalho.

Passadas as etapas de leituras, as sequências com melhores contrastes e visualizações foram escolhidas para serem utilizadas nos trabalhos. A variação de cargas aplicadas foi feita aleatoriamente de modo a se notar as variações de velocidade e a ocorrência de circulação na célula, indicada pela escala cromática apresentada pelos resultados da exposição das partículas ao laser. Sendo assim, as que se destacaram

serviram de base para a montagem da exposição de modo crescente em relação à carga nos eletrodos (a aplicação de campo nas bobinas que eram alimentadas pela fonte, que tinha a função de criar um campo magnético, era limitada a 100 A).

Portanto, o que definiu o valor das cargas a serem aplicadas foi a mínima variação no estado inicial de repouso do fluido. Esse estado inicial em repouso, era necessário ao se iniciar qualquer coleta de dados, isto é, os valores de carga crescentes não se sucediam.

Outro fator a ser contornado foi a reflexão da luz do laser nas superfícies polidas do vidro que, apesar de ser direcionada causava um efeito prismático e luminescência além do normal, que pode ter causado algum problema de leitura. Isto foi contornado adotando-se superfície escura que servia de encontro à trajetória da luz do laser.

Eventuais descargas elétricas decorrentes do aumento de carga no ambiente propício para a eletrólise faziam com que partes sólidas se soltassem dos eletrodos, maculando o fluido condutor e a tomada de imagens, como também o tornava reflexivo a ponto de impossibilitar qualquer leitura satisfatória.

O experimento encontrou problemas operacionais, mas seu objetivo principal, que era a modificação do estado inicial de repouso do fluido de modo a compelir o mesmo com circulação e aumento de velocidades pontuais em locais específicos, sem auxílio nem contato mecânico direto, mostrou-se praticável.

A criação de campos de baixa pressão em um fluido, contando com a atuação de forças de campo adjacentes, de modo a aumentar a velocidade e mesmo de se criar circulação em uma seção do fluido, mostrou-se promissora. Maiores estudos são necessários para corroborar as presentes conclusões.

Referências Bibliográficas:

- 1- ANDERSON Jr, J. D.(1991). *Fundamentals of aerodynamics*. EUA. 2ed. McGraw-Hill, Inc. p.129, 200-204, 255-260, 265-266, 316, 324-325, 360-361.
- 2 -BARBOSA, A. A. (1999) *Correntes de densidade em reservatórios*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 247-262.
- 3- BENITO, E. (1979). *Problemas de campos electromagnéticos*. Espanha. Editorial AC. p.7-11, 281.
- 4- BYERS, H.R. (1973). *Elements of clouds physics*. Inglaterra. 2ed. The University of Chicago Press Ltd. p.177-178.
- 5- CARPENTER, C. (1996). *Flightwise*. Inglaterra. Airline Publishing Ltd. p. 322-328.
- 6- COWAN, E.W. (1968). *Basic electromagnetism*. EUA. Academic Press, Inc. Apêndice E, p. 463-464.
- 7 -DOEBELIN, E. O. (1990) *Measurement systems: application and design*. EUA. McGrall Hill, Inc. 4 ed.. p 527 - 560.
- 8 - DURAND, W.F.(1943). *Aerodynamic theory*. EUA. California Institute of Technology, v.1, p.130-171.
- 9 - FRIEDERICH, K.O . (1966). *Special topics in fluid dynamics*. EUA. Gordon and Breach Science Publishers Inc. p. 9- 46.10.
- 10 - HAMMOND, A.L.; METZ, W.D.; MAUGH II, T.H. (1975). *O futuro energético do mundo*. Brasil. Zahar editores. p. 49-56.
- 11 – HOUGHTON, E.L.; BROCK, A.E. (1982). *Aerodynamics for engineering students*. Inglaterra. Edward Arnolds Ltd. 3.ed. p. 1-104, 220-226, 335-376.
- 12 – JOHNSON, C.C.; DURNEY, C.H. (1969). *Introduction to modern electromagnetics*. Japão. Kögakusha Co & McGraw-Hill Inc. p. 97, 126-131.
- 13 –KARAMCHETI, K. (1966). *Principles of Ideal-Fluid Aerodynamics*. EUA. John Wiley&Sons. p.1- 41.
- 14 - KUETHE, A . M .; CHOW, C. (1976). *Foundations of aerodynamics*. EUA. John Wiley&Sons. p.33-112.
- 15 – MAGARVEY, R. H.; MACCLATCHY, C. S. (1964). The formation and structure of vortex rings &The desintegration of vortex rings. *Canadian Journal of Physics.*, v. 42, p. 678-689.

- 16- MAUNSELL, M.G. (1994) Aerodinâmica I e II. *Apostilas de Cursos de Graduação*.
- 17- MAXWORTHY, T. (1972). The structure and stability of vortex rings. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 51, p. 15-32.
- 18 - MENG, J. C. S. (1993) Physics, eletrochemistry, and engineering optimization analysis for sea water mhd propulsion. *Magnitnaya Gidrodinamika*. EUA. Naval Underwater Systems Center., v.29. n. 3. p –3-33.
- 19 - MISSIATO, O. (1998) *Movimento de fluídos condutores submetidos à influência de campos eletromagnéticos externos: criação de um vórtice megnetohidrodinâmico na água do mar*. São Carlos. 121 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 20- NITSCHKE, M.; KRASNY, R.(1994) A numerical study of vortex rings formation at a edge of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 276, p. 139-161.
- 21 - OXFORD LASERS. (1997). *LS family of Cooper vapour lasers-operation manual*. Inglaterra. 3 ed.
- 22- PAIREU, O.; TABELING, P.; LEGRAS, B.(1997). A vortex subjected to a shear: na experimental study. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 351, p. 1-16.
- 23 - PLONSEY, R. , COLLIN, R.E. (1976). *Principles and applications of electromagnetic fields*. Índia. Tata McGraw-Hill, Inc. p-201-204. 486-490.
- 24 - PRANDTL,L. ;TIETJENS, O.G.(1957). *Fundamentals of hydro- and aerodynamics*. EUA. Dover Publications, Inc. p. 189- 214.
- 25 - ROBERTS, P.H. (1994). Magnetohydrodynamics. EUA. *Encyclopedia of applied physics*. EUA. VCH Publishers, Inc., v. 9. p. 111-156.
- 26 - SAFFMAN, P.G. (1995). *Vortex dynamics*. Inglaterra. Press Syndicate of the University of Cambridge. p. 103-106.
- 27 - SEDDON, J. (1991). *Basic helicopter aerodynamics*. Inglaterra. BSP Professional Books. p.11-13.
- 28 - SERRANO, R . B .(2000). *Geração de vórtices em anel em fluídos condutores por meio de indução magnetohidrodinâmica*. São Carlos. 120 p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 29 - SHERCLIFF, J. A .(1965 –1). *Magnetohydrodynamics*. Inglaterra. Warwick University. p. 162-169.
- 30 - SHERCLIFF, J. A .(1965 –2). *A textbook of magnetohydrodynamics*. London. Pergamon Press. p. 61-106.

- 31 - TEMPELMEYER, K. E. (1994). Electrical characteristics of the eletrolysis process in a MHD seawater thruster. *Magnetohydrodynamics.*, v.29, n. 3, p. 240-244.
- 32- TRICKER, R. A. R. (1970). *The science of the clouds*. Mills and Boon Ltd. Inglaterra. p. 65-66, 133.
- 33 – TSINOBER, A. (1990). MHD flow drag reduction. *Viscous drag reduction in boundary layers*. EUA. Progress in astronautics and aeronautics. AIAA, Inc. p.327-346.
- 34 - Van DYKE, M. (1988). *An album of fluid motion*. EUA. Stanford University. 4 ed. The Parabolic Press.
- 35 - VISSCHER, P.B. (1988). *Fields and electrodynamics*. EUA . John Wiley & Sons, Inc. EUA. Cap 12 p. 199-202.
- 36 - Von KARMAN, THEODORE. (1954). *Aerodynamics, selected topics in the light of their historical development*. EUA. Cornell University Press. p.31-73.
- 37 - YOUNG, A .D.(1989). *Boundary layers*. EUA. Washington, DC. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. p. 3-21.

Bibliografia:

- 1-BENTLEY, J.P. (1995) *Principles of Measurement Systems*. Inglaterra. Longman Cientific & Technical. 3 ed. 468 p.
- 2- ECO, U. (1985). *Como se faz uma tese*. Brasil. 2.ed. Editora Perspectiva S.A. 184 p.
- 3 - Enciclopédia Abril. (1972) *Dicionário Bibliográfico*. Brasil. 1.ed. Editora Abril S.A. 738 p.
- 4 – GEBERTH, G. et al. (2000). *Boundary layer control by means of electromagnetic forces*. Forschungszentrum Rossendorf. ERCOFTAC Bulletin. p. 36-40.
- 5 –LERNER, E.J. (2000). *Plasma propulsion in space*. The Industrial Physicist. EUA. American Institute of Physics. p. 16-19.
- 6- Mettler Toledo GmbH. (1997). *A guide to conductivity and dissolved oxygen*. Inglaterra. 32 p.

Anexo A: Manipulação de equipamentos laser

Utilização de fontes laser:

O emprego de equipamentos que utilizam a geração de laser é cada vez mais freqüente, pois esses estão associados a uma melhora na área ótica-digital, sejam quais forem suas finalidades: medicina, lazer, ciência, sensoramento remoto, etc..

Normalmente os equipamentos laser empregados, apesar de seus efeitos luminosos, no caso de canhões de luz, sonoros, leitores de CD, ou áudio-visuais, DVD, apresentam em geral uma baixa potência. Isso devido à um monitoramento mais fácil quanto à segurança envolvida na operação dos mesmos.

As principais fontes de preocupação em relação ao manuseio de tais equipamentos estão relacionadas com a luz emitida da fonte, propriamente dita, que pode afetar a pele por queimaduras e levá-las ao aparecimento de um processo cancerígeno. Além dessa, o olho humano pode também sofrer danos irreversíveis, também por queimaduras da retina e/ou da córnea. Neste caso, nos espectros da luz visível e do infravermelho começam a ser nocivos e ao serem aumentados os comprimentos de onda, a córnea é a principal parte do olho a ser afetada.

Em relação à pele, envelhecimento precoce, carcinomas, ressecamento e aumento na pigmentação são alguns sintomas relacionados com a exposição ao laser.

Outros fatores de risco em se utilizar equipamentos dessa natureza estão relacionados com a quantidade de energia necessária para que os mesmos funcionem.

Ainda os sistemas periféricos aos equipamentos podem apresentar riscos como vazamentos dos sistemas de refrigeração, que envolvem produtos tóxicos, ou que podem ocasionar explosões. A tabela abaixo enumera alguns efeitos da radiação laser:

<i>Comprimento de onda</i>	<i>Danos ao olho</i>	<i>Danos à pele</i>
1,4 a 3 μm	Catarata	*
200 a 315 μm	Efeito de clarão	Eritema, carcinoma
315 a 400 μm	Absorção pelo cristalino	Eritema, carcinoma
200 a 400 nm	*	Aumento da pigmentação
400 a 500 nm	Catarata	*
310 a 700 nm	*	Fotossensibilidade
700 a 1000 nm	*	queimadura

TABELA A1 – Possíveis efeitos da radiação laser nos olhos e na pele.

Classificação das fontes laser:

Classe 1: não oferece nenhum risco de utilização, em condições normais de uso;

Classe 2a: lasers de pouca potência e se visualizados em um tempo inferior a 1000 segundos não oferecem riscos;

Classe 2b: lasers de baixa potência que podem afetar a visão se observados durante períodos de tempo muito longos;

Classe 3a: não oferecem riscos se observados por um período curto;

Classe 3b: ocasionam lesões se observados diretamente;

Classe 4: causam danos por observação direta e reflexão.

Lasers do tipo 2 e 3 apresentam fontes de luz que não são pontuais, divergindo em várias direções.

Anexo B: Condutividade da água

A medida de condutividade da água utilizada para o experimento foi realizada através de um Condutivímetro modelo MC 226 produzido pela Mettler Toledo GmbH, com número de série 106839M.

A condutividade é uma unidade que fornece a concentração iônica de soluções. Esse processo é utilizado tanto para a aferição de controle de qualidade de processos de salinização, como também monitorar dejetos industriais, para citar apenas duas aplicações.

A teoria da medida de condutividade de uma solução começa com a própria definição da eletricidade, que é um fluxo de elétrons, ou partículas carregadas, íons. Sendo assim, a condutividade é a habilidade da solução de transmitir a corrente através desta. A quantidade de fluxo de corrente é proporcional ao número de íons presentes na solução e é também, indiretamente, a leitura da concentração da solução.

FIGURA B 1– Representação da mobilidade iônica

Todas as substâncias apresentam condutividade de certo modo. No caso de uma solução, o nível de força iônica pode variar da baixa condutividade da água pura até a alta condutividade que ocorre em amostras químicas concentradas.

A história das primeiras experiências realizadas no intuito de se obter valores da condutividade nos relata que placas de idênticas dimensões foram colocadas a uma distância proporcional as suas alturas e larguras, formando um cubo, ou seja, placas com 1 centímetro quadrado (1 cm de altura e 1 cm de largura) dispostas à distância de 1 cm uma da outra. Esse método, contudo não mostrou resultados precisos.

FIGURA B 2 – Célula unitária de platina, nas primeiras tentativas para se medir a condutividade de soluções.

Houve a constatação que a geometria da forma de célula cúbica afetava valores de condutividade. Entrou em uso, então, o conceito de condutividade específica: C , cuja unidade é o Siemens/cm (S/cm), que compensa a geometria da célula.

Uma outra variável empregada é a indutância denominada G e com unidade de medida Siemens (S).

Portanto, se a célula está em uma solução de condutância G , sua condutividade é:

$$C = G \cdot \frac{L}{A} \quad (1)$$

Onde os índices L e A são os valores da distância entre os eletrodos em centímetros (cm) e a área da placa entre os eletrodos em centímetros quadrados (cm²).

Ao se variar as dimensões deste formato celular, as razões entre L e A também variam.

Na célula tradicional, 1 centímetro quadrado de platina, distante um centímetro de um outro, apresenta um valor de constante da célula (L/A) de 1,0, que faz com que os valores da condutividade específica (C) e da condutância (G) sejam os mesmos, numericamente.

Esse foi o passo inicial para o desenvolvimento de sensores que quantificam a condutividade.

A partir desse dimensionamento inicial, foi desenvolvido um sistema portátil, com uma sonda cilíndrica. Essa sonda apresenta quatro anéis de platina, ligados dois a dois, a saber, os externos e os internos e, a partir de uma voltagem aplicada aos externos que, induz à atuação de uma corrente, cuja magnitude está diretamente relacionada com

o número de íons presentes na solução. Desse modo, a condutividade pode ser avaliada pelos sensores mais distantes, ou os externos, presentes no sensor; haja visto que todas as dimensões envolvidas são conhecidas.

Célula de condutividade anular

FIGURA B 3 – Representação da célula de formato anular de aferição, do equipamento

A tabela apresentada abaixo fornece alguns valores de condutividade obtidos de diversas soluções a uma temperatura de 25° Celsius.

Amostra	Condutividade C ($\mu\text{S} / \text{cm}$)
Água pura	0,055
Água destilada	0,5
Água fervida	1,0
Água de fonte natural	1,0
Água de torneira	50,0
0,01 M KCl padrão	1413
Água do mar	50.000
10% Na OH	355.000
31% HNO ₃	865.000

TABELA B 1– Valores de condutividade específica de algumas soluções

FIGURA B 4– Condutivímetro Mettler Toledo MC 226. O braço é a parte que abriga a sonda com os eletrodos de platina que aciona o funcionamento ao ser imerso na solução.

Um importante detalhe que deve ser colocado aqui é que a condutividade de uma solução aumenta conforme a temperatura da mesma aumenta, devido à excitação molecular que é maior nessa condição.

A análise da solução tem como objetivo reforçar a necessidade de utilização de um fluido condutor, com um nível de condutividade razoável na execução desse experimento, o que está diretamente relacionado com o seu desempenho, haja visto que a atuação dos campos acontecem em meio a este.

Anexo C: Pequena cronologia da história dos materiais magnéticos

- Séculos antes da Era Cristã, os gregos já conheciam um mineral chamado 'lodestone', óxido de ferro, da região de Magnesia, que originaria o nome de materiais magnéticos.
- Por volta de 2700 A .C. aparecem registros do uso de bússolas rústicas feitas de Lodestone, pelos chineses. Essas bússolas eram utilizadas em orientações terrestres e marítimas.
- No período de 1000-1200 D.C, bússolas para navegação foram largamente utilizadas.
- Em 1600, William Gilbert, considerado o pai do magnetismo, publica os primeiros conhecimentos sistematizados da área, afirmando que a Terra é um grande ímã.
- No ano de 1820 Oersted descobre a relação entre eletricidade e magnetismo; Ampère determinou que duas bobinas carregando corrente elétrica agem como ímãs; Arago descobre que o ferro pode ser magnetizado e Faraday afirma que eletricidade pode ser gerada variando o fluxo magnético dentro de uma bobina.
- Em 1920 há o desenvolvimento de ímãs de maior capacidade magnética , como o Alnico.
- Em 1950 há significativos desenvolvimentos de ímãs cerâmicos orientados e surgem as Ferrites.
- Em 1970, conseguiram-se aumentos de forças magnéticas, a partir de ligas de Samário / Cobalto (Terras Raras), porém, ainda com custos muito altos.
- Em 1980 surgiram da família das Terras Raras, os ímãs de Neodímio / Ferro / Boro, com capacidades magnéticas ainda maiores e com menor custo, porém muito sensíveis a altas temperaturas.
- Verifica-se que há contínuo avanço na área dos materiais magnéticos, que, com certeza, terá repercussões na magnetohidrodinâmica.

Anexo D : Glossário de termos do magnetismo

- Ferromagnético: material que exibe fenômeno de histerese onde a permeabilidade magnética depende da força de magnetização.
- Curva de Histerese: representação gráfica da relação entre força magnética e a magnetização induzida resultante de um material ferromagnético.
- Fluxo magnético: manifestação física de um material quando submetido a influências da magnetização.
- Indução magnética(B): número de linhas magnéticas por unidade de área na direção do fluxo.
- Força coercitiva(H): campo desmagnetizante necessário para reduzir a indução magnética a zero.
- Desmagnetização: a completa ou parcial redução da indução representada no segundo quadrante da curva de Histerese.
- Produto de energia(Bhm_{ax}): ponto da curva de desmagnetização no qual o produto da indução magnética pelo campo desmagnetizante atingem o máximo valor.
- Anisotrópico: quando um ímã possui orientação preferencial de maneira que as características magnéticas são melhores nesta direção.
- Isotrópico: material que não possui orientação preferencial apresentando características magnéticas similares em qualquer direção ou eixo.
- Gap: porção do circuito magnético que não contém material ferromagnético.
- Permeabilidade: habilidade da indução magnética de atravessar um material.
- Remanência(B): indução magnética remanescente em um circuito magnético após a remoção do campo magnético externo aplicado.
- Saturação: um material magnético está saturado quando um aumento de força de magnetização aplicada não resulta no aumento da indução magnética.
- Força trativa: é a força exercida por um ímã em um objeto ferromagnético.