

Aplicação da Técnica de Velocimetria por Acompanhamento de Partículas em um Modelo Físico de Distribuidor de Lingotamento Contínuo de Aço

Ismael Lis Alves Daoud

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 220 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
daoud@ct.ufrgs.br

Magda Beatriz Galant François

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 220 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
francois@ct.ufrgs.br

Antônio Cezar Faria Vilela

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 222 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
vilela@ufrgs.br

Flávio Tadeu van der Laan

Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Escola de Engenharia/ UFRGS – 90046-900 - Porto Alegre/RS
ftvdl@ufrgs.br

Resumo. Os fenômenos metalúrgicos em um distribuidor de lingotamento contínuo estão diretamente ligados a condições do escoamento do aço líquido. Medições de velocidades na planta inviabilizam-se completamente devido aos riscos e custos envolvidos. Por essas razões, estuda-se o comportamento do escoamento em um modelo físico similar ao equipamento industrial, em escala plena e condição isotérmica. Através da aplicação de uma técnica de medição em escoamentos, ou seja, a técnica **Particle Tracking Velocimetry (PTV)**, obtêm-se os campos de velocidade em diversos planos. Para tanto, processa-se as imagens em um programa computacional com desenvolvimento acadêmico. Pela comparação dos resultados, alcança-se a otimização em termos de qualidade de aço com uso de um par de barreiras e tubo longo.

Palavras chave: Distribuidor de lingotamento contínuo de aço, Visualização em escoamentos, PTV, Processamento de imagens.

1. Introdução e objetivos

A solução de muitos problemas em Engenharia está diretamente relacionada ao conhecimento das velocidades em fluidos. Para sua obtenção, as técnicas existentes hoje partiram de situações experimentais de meados do século XVIII. Desde então, as medições de uma outra grandeza física são associadas para se obter a velocidade localmente. Modernamente, algumas técnicas convertem efeitos de natureza mecânica em um sinal elétrico, que pode ser posteriormente tratado para a obtenção da velocidade no ponto de medição. Com tal instrumentação, a determinação de campos de velocidade torna-se uma atividade laboriosa. Primeiramente, para sua determinação, necessita-se de diversos pontos no interior do escoamento, e quaisquer perturbações devem ser minimizadas. Muitas vezes alguns sensores são frágeis e propagam erros devido às suas presenças no escoamento. Constantemente necessitam de calibração e podem apresentar um comportamento não-linear.

O indicativo dos primeiros passos em direção a modernas técnicas de medição de forma não-intrusiva foi dado em 1904, através de Ludwig Prandtl, que observava o comportamento do escoamento em um perfil aerodinâmico em um canal de água. Nos anos 70, fenômenos relacionados à velocidade, como turbulência, eram medidos pontualmente através de laser Doppler. Nas últimas décadas, as técnicas de visualização e medição de escoamentos tiveram um grande crescimento, principalmente após a introdução de câmeras digitais, baseadas na tecnologia **Charge Couple Device (CCD)**, associadas com o desenvolvimento constante de placas de aquisição e computadores de alta performance.

Mediante a utilização de processamento computacional de imagens digitais, as técnicas PTV e **Particle Image Velocimetry (PIV)** destacam-se das demais metodologias de medição de velocidade por visualizar fenômenos até então não caracterizados, além de converter complicados arranjos óticos em algoritmos matemáticos relativamente simples, com alta taxa de aquisição e simultaneidade de medição não-intrusiva de amplos campos de velocidade no interior de modelos físicos. Possuem resposta rápida e direta com pouca dependência de calibração e com incertezas de medição muito baixas. A principal desvantagem é a necessidade de operar com fluidos transparentes.

Dentre as aplicações possíveis da técnica PTV, está o levantamento dos campos de velocidade no interior de modelos físicos, como num distribuidor empregado no lingotamento contínuo de aço. Como este modelo possui grandes dimensões, o mapeamento da velocidade com sistemas convencionais ou através da velocimetria por laser Doppler

(LDV), de forma pontual, consumiria muito tempo resultando em um processo de medição inviável economicamente e com baixa confiabilidade devido às condições do ensaio se alterarem a todo instante.

O presente trabalho objetiva caracterizar o escoamento em um modelo físico isotérmico, em escala plena, de distribuidor de lingotamento contínuo de aço. Essa caracterização é feita com a finalidade de propor alterações de forma que se obtenha um escoamento mais homogêneo, em termos de velocidade, e ascendente, em termos de orientação, para permitir uma melhor qualidade no produto final. Os resultados são alcançados por meio da velocimetria por processamento de imagens de partículas iluminadas a laser, ou seja, aplicação da técnica PTV bidimensional em diferentes planos. Para tanto, uma fonte de laser com um conjunto de lentes, uma câmera com tecnologia CCD, um completo sistema de aquisição, processamento e análise das imagens fazem-se necessários. Não é parte do escopo deste trabalho o desenvolvimento de um sistema de medição, entretanto, utiliza-se uma metodologia previamente estudada por Gutkoski (2001) para obter e analisar os campos de velocidade.

2. Estado da Arte

2.1. Exemplos de aplicação em modelos físicos de distribuidores de lingotamento contínuo de aço

Silva (1997) avaliou as linhas de correntes presentes no interior de um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço, em escala plena (1:1), utilizando a técnica de visualização mediante uso de traçadores iluminados com uma fonte de laser contínuo, registrando os eventos com uma câmera fotográfica. Com consideráveis dimensões, o modelo em análise, foi dividido em diversos planos previamente especificados. Com a montagem das análises obteve-se uma idéia inicial sobre o comportamento global do fluido no interior do dispositivo. Os módulos das velocidades por plano não foram apresentados e nem citado uma metodologia para seu cálculo.

O método de velocimetria por acompanhamento de partículas ou PTV, com uso de câmeras digitais tipo CCD, foi aplicado em um único plano no interior de um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço (escala 1:1), por Gutkoski et al. (1997) e Ferreira et al. (1997). Os autores apenas introduziram a possibilidade de utilizar a técnica, e não realizaram um mapeamento mais abrangente do comportamento do escoamento.

Odenthal, Pfeifer e Klaas (2000) utilizaram dispositivos CCD para realizar o registro dos campos de velocidade bidimensionais em um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço (escala 1:4), além de uma fonte laser pulsado. Com este arranjo, utilizaram o método de velocimetria de alta densidade de imagens de partículas com correlação cruzada, para realizar os cálculos. Esta técnica é comumente conhecida como **Digital Particle Image Velocimetry** (DPIV). Realizaram estudos em vários planos laterais e frontais dispostos ao longo do modelo físico. Encontraram dificuldades para determinação de campos de velocidade junto às paredes e a base do modelo. A explicação pode ser devido aos reflexos oriundos do plano de laser e uma reduzida presença de partículas nestes locais. Em linhas gerais, as investigações realizadas no modelo asseguraram excelente concordância com resultados da simulação em volumes finitos apresentada, como por exemplo, a detecção de zonas com recirculação.

Odenthal et al. (2001) avaliaram as modificações no escoamento, impostas por diversas configurações (barreiras e inibidores de turbulência), em um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço (escala 1:1,7). Além do DPIV bidimensional, utilizaram a técnica LDV tridimensionalmente para encontrar pontualmente valores de intensidade de turbulência. A partir do mapeamento ponto a ponto, um processo extremamente longo, os autores validaram os resultados experimentais em uma simulação em volumes finitos. Descreveram com sucesso as principais ocorrências no distribuidor. Dentre as quais, um substancial aumento da homogeneidade no escoamento devido a uma maior zona de mistura na região de entrada. As linhas de corrente ascendentes asseguraram uma maior limpeza do aço (flotação das inclusões de origem não metálicas).

Além do estudo de modificadores de escoamento em vários planos de medição, Aguilar-Corona et al. (2002) estabeleceram de forma comparativa os efeitos causados pela região de entrada. Para isso, utilizaram um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço (escala 1:3). As análises foram realizadas mediante uso da técnica PIV, com 2 dispositivos CCD, com auxílio das curvas DTR (Distribuição dos Tempos de Residência). Alcançaram bons resultados, mediante o uso de uma barreira direcional, onde grandes regiões até então estagnadas (mortas) presentes no interior do distribuidor, foram eliminadas completamente.

Cada distribuidor apresenta de forma particular, zonas com distintas velocidades no seu interior. Atacar uma determinada região, objetivando um incremento na qualidade produto, depende basicamente da geometria do distribuidor e dos modificadores utilizados, além das condições de escoamento envolvidas.

Vargas-Zamora et al. (2003) realizaram um estudo entre modelos de distribuidores de lingotamento contínuo de aço (escala 1:2,5) em condições isotérmicas e não-isotérmicas. Para tanto utilizaram a técnica PIV para obter os campos de velocidade e validaram através de simulações em volumes finitos. Alcançaram uma razoável variação em relação aos valores esperados, acredita-se que é devido às hipóteses de transferência de calor nas paredes, base e superfície do modelo.

A principal dificuldade de um modelo não-isotérmico é garantir que as diferenças de temperatura encontradas no modelo representem com boa similaridade os efeitos térmicos ocorridos no aço líquido no interior do equipamento industrial. A vantagem neste tipo de modelagem está em uma maior fidelidade dos eventos para uma possível

transposição. Na prática a montagem experimental é muito complicada, devido uma série de equipamentos e cuidados despendidos, além de um custo elevado para todo o aparato.

Apesar da extrema importância de uma validação numérica, onde novos estudos podem ser realizados de maneira eficiente e com viabilidade econômica, esta não será objeto do presente trabalho. Tampouco a realização de testes em condições não isotérmicas.

Apenas de forma ilustrativa, Gutkoski (2001) apresentou os resultados de um minuto de filmagem na região de entrada em modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço (escala 1:1) com modificadores de escoamento instalados (uma barreira e um inibidor de turbulência). Os cálculos para obtenção dos campos de velocidade foram realizados no FLOWVIEWER, através do método de velocimetria por acompanhamento de partículas. Não foram discutidas com profundidade as diferenças encontradas nas duas situações.

2. 2. Técnicas de velocimetria por processamento de imagens

Os meios de operação de velocimetria por imagens de partículas iluminadas são diferenciados pela concentração do traçador presente no escoamento e no número dos mesmos na área de interrogação. A nomenclatura é muito variada, geralmente significa algum aspecto importante que o autor gostaria de destacar. Toda a base teórica e as formulações empregadas para os cálculos de cada metodologia, podem ser encontradas com maior profundidade em Adrian (1991) e Westerweel (1993), onde adotam a seguinte classificação: a velocimetria por **speckles** de laser, velocimetria de alta densidade de imagens de partículas, velocimetria por acompanhamento de partículas.

2.3. O programa FLOWVIEWER

Desenvolvido de forma acadêmica por Gutkoski (2001), os algoritmos de cálculo do programa FLOWVIEWER estão baseados na metodologia de velocimetria por acompanhamento de partículas, em baixas velocidades (menores que 0,5 m/s).

Utilizando uma câmera filmadora, tipo CCD, imagens coloridas de um plano de interesse no escoamento são registradas. Posteriormente, este vídeo é convertido em quadros seqüenciais ordenados (formato BMP, ou seja, bitmap), onde o número dos mesmos depende do tempo e da taxa de aquisição (quadros por segundo), especificados na gravação do evento. Se esta for colorida, o programa converte para uma imagem monocromática, em escala de cinza. Isto se alcança através da ponderação de pesos entre as cores vermelha, verde e azul (código RGB) presentes em imagens a cores. Uma imagem digital é representada por uma matriz de pontos, os quais são localizados pelos índices de linhas e colunas, e seus valores estão em uma escala de cinza (0 para o preto e 255 para o branco). Tais elementos de imagem são conhecidos como **pixels**.

A partir de um histograma de uma imagem, ou seja, distribuição dos valores de níveis cinza, é possível estabelecer um limiar (**threshold**), que classificará o que é claro (branco) e o que é escuro (preto), através de um valor de corte. Aplicado o limiar, é obtida uma imagem chamada binária. No programa, esta ferramenta ajuda o operador na separação das partículas, por exemplo, em relação ao fundo ou restante da imagem. Além do limiar, o FLOWVIEWER possui a opção para remover manualmente pontos de brilho intenso, como em regiões com reflexos ou que não sejam as partículas no escoamento, a fim de não participarem do cálculo das velocidades.

Em um primeiro momento determina-se a velocidade instantânea de uma partícula entre duas imagens seqüenciais com um intervalo de tempo Δt , tomando como base a posição de seus centros na imagem. A constante de tempo depende da taxa de aquisição da câmera tipo CCD (geralmente 30q/s). De acordo com Gutkoski (2001), o centro da partícula é encontrado a partir da média de seus **pixels** com maior intensidade (branco). A imagem é composta somente por dois níveis, preto (fundo) e branco (partículas), pois já passou pela etapa do limiar. Alguns critérios são utilizados para gerar um vetor de velocidade instantânea associado a uma partícula. Em uma área de busca de 10 **pixels** na imagem subsequente, somente a mesma partícula, da imagem anterior, pode ser encontrada. Caso não a encontre ou outra estiver na mesma área em ambas as imagens, não é criado o vetor.

Em um segundo momento, a região em estudo sofre uma discretização regular através da geração de uma malha, com várias sub-regiões. Através do agrupamento de cada vetor de velocidade instantânea, que se encontram dentro de uma área comum, obtém-se o vetor de velocidade média no centro destas sub-regiões de interesse na malha. Além da apresentação de velocidades médias, o programa ainda realiza cálculos de parâmetros de turbulência associados.

3. Apresentação do problema

Deseja-se estudar o comportamento do escoamento no interior de um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço. Esse modelo é similar a equipamentos usados no setor siderúrgico. A partir do conhecimento da magnitude e trajetória dos campos de velocidade é possível propor alterações que visem um produto final com melhor qualidade.

O distribuidor é basicamente um dos três reatores metalúrgicos envolvidos durante a etapa de lingotamento contínuo, sendo os outros dois restantes, a panela e os moldes. A Fig. 3.1 mostra que o distribuidor é um vaso intermediário entre a panela e o molde, com funções de reservatório durante a operação de troca de panela, distribuição

de aço líquido para os veios (saídas para o molde), além de principalmente garantir a homogeneidade térmica e química do metal em seu interior.

Muitas reações importantes ocorrem na etapa em que o aço líquido está presente no distribuidor, influenciando tanto o processo como a qualidade do produto final. Elementos não-metálicos podem ser encontrados no interior do banho metálico, as chamadas inclusões. Tais elementos são oriundos de reações de refino secundário na panela, reoxidação do aço líquido exposto a atmosfera durante as etapas do processo, ou ainda devido à erosão dos materiais refratários. Como ferramenta, no sentido de evitar que as inclusões não-metálicas dirijam-se aos veios, o distribuidor deve assegurar a remoção destes elementos, através do coalescimento e da flotação para a camada de escória.

A configuração do escoamento do aço líquido no interior do distribuidor é de extrema importância para um bom desempenho durante esta etapa do processo produtivo. Sua otimização é fundamental quando se deseja a estabilização do processo e o aumento do grau de limpeza do aço, uma vez que muitos fenômenos metalúrgicos estão diretamente relacionados e são regidos pelas características do escoamento.

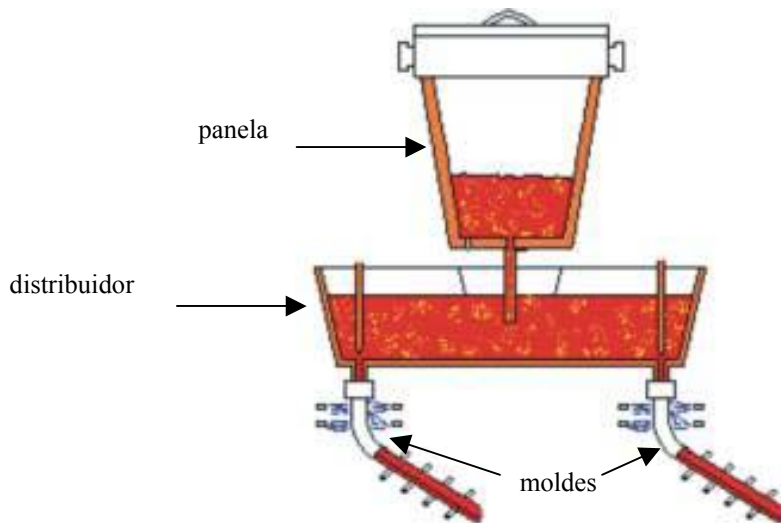


Figura 3.1. Processo de lingotamento contínuo de aço.

Qualquer tipo de estudo sobre o escoamento do aço líquido inviabiliza-se em uma planta industrial. Os fatores mais relevantes são os custos envolvidos durante os testes no local e o grau de periculosidade, devido a elevadas temperaturas do processo. Uma valiosa opção para análise dos fenômenos metalúrgicos é o modelamento físico, pois permite a visualização e mensuração de aspectos específicos do escoamento de maneira conveniente e com custo relativamente baixo.

Vantagens como economia de energia gasta no processo e aumento de produtividade, justificam os investimentos para o desenvolvimento tecnológico do lingotamento contínuo, sempre na direção de aprimorar o aço como produto final, elevando-se a qualidade, ou seja, com baixo índice de inclusões.

3.2. Metodologia experimental

3.2.1. Modelo Físico

A obtenção dos campos de velocidade através da técnica PTV, realiza-se em um modelo físico isotérmico de distribuidor de lingotamento contínuo, em escala plena, construído no Laboratório de Siderurgia (Lasid) do Centro de Tecnologia da UFRGS.

Tal modelo foi projetado de maneira que os critérios de similaridade geométrica, cinemática e dinâmica (números de Reynolds e Froude) entre o distribuidor industrial e o distribuidor de testes, sejam satisfeitos e que as informações importantes possam ser transportadas para planta. O escoamento é regido pelas equações de Navier-Stokes e de conservação de massa e energia. Toda base teórica pode ser encontrada em Szekely (1979).

Uma das razões para escolha da escala do modelo é possibilidade de adaptação e estudo de diferentes modificadores de escoamento. O modelo físico projetado em acrílico é mostrado, em uma vista de topo, na Fig. 3.2.

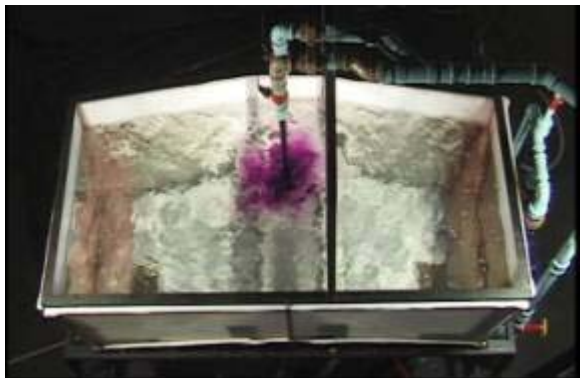


Figura 3.2. Fotografia do modelo físico.

Nota-se que o modelo, Fig. 3.2, utiliza água como fluido de trabalho. Conforme Heaslip; McLean e Sommerville (1983), a água a temperatura ambiente é um adequado fluido para modelar o aço líquido, pois as viscosidades cinemáticas são próximas.

O modelo físico estudado pode trabalhar de diferentes maneiras, através de ajustes no sistema hidráulico, como esquematicamente é apresentado na Fig. 3.3.

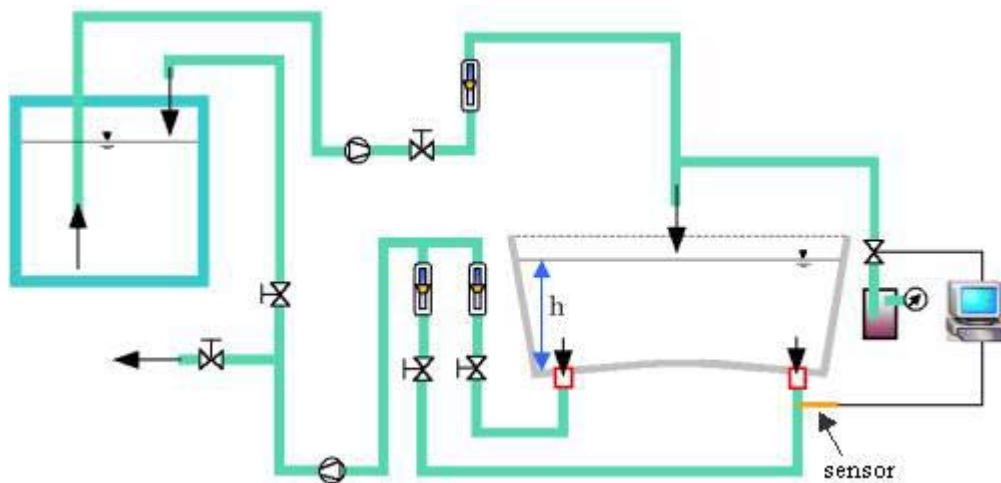


Figura 3.3. Desenho esquemático do sistema hidráulico do modelo físico.

A partir da observação da Fig. 3.3, nota-se que modelo físico pode ser operado continuamente pela regulação das vazões volumétricas da válvula de entrada (que representa a saída da panela, ou jato de entrada no distribuidor) e das duas válvulas de saída (que representam os veios, por onde se realiza o lingotamento). O nível de trabalho, ou altura de fluido, é representado pela dimensão h , mantendo-se constante durante a realização dos ensaios. Para experimentos com corante ou para levantamento de curvas DTR, o sistema possui uma válvula tipo solenóide que é controlada eletronicamente e sensor de condutividade em um dos veios.

O sistema experimental deve representar as condições operacionais do escoamento no distribuidor industrial, durante os ensaios da técnica PTV. Tal transposição pode ser feita sem maiores dificuldades, uma vez o modelo foi projetado em escala plena. A Tab. 3.1 apresenta os parâmetros mais significativos dos equipamentos de forma comparativa linha-a-linha.

Tabela 3.1. Condições operacionais típicas de um distribuidor industrial e do modelo físico.

Distribuidor Industrial		Modelo Físico	
Velocidade de entrada	4,8m/min	Vazão vol. de entrada	4,14m ³ /h
Velocidade de lingotamento (por veio)	2,4m/min	Vazão vol. de saída (por válvula)	2,07m ³ /h
Regime do escoamento	Permanente	Regime do escoamento	Permanente
Massa de aço líquido	3,5t	Volume de trabalho (fluido)	500L
Nível de trabalho (h)	0,42m	Nível de trabalho (h)	0,42m

Observa-se que enquanto no sistema industrial as medições de entrada e saídas são em termos de velocidade, no laboratório são obtidas na forma de vazão volumétrica. Isto se deve apenas aos equipamentos que realizam as medições, uma vez que os valores são os mesmos. As unidades apresentadas para o distribuidor industrial são correntes no meio siderúrgico.

Além do próprio modelo físico, testa-se uma configuração com modificadores de escoamento com a finalidade de realizar, comparativamente, uma avaliação do comportamento no interior do distribuidor, conforme a Fig. 3.4.

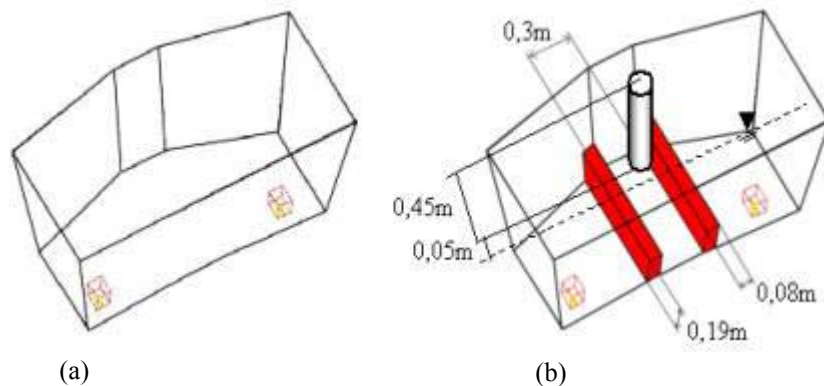


Figura 3.4. Configurações testadas no modelo físico: (a) sem modificadores de escoamento; (b) com modificadores de escoamento.

A Fig. 3.4 (b) apresenta um tubo longo acoplado ao jato de entrada e está 0,05m acima do nível de trabalho. Observa-se também um par de barreiras fixadas na base do modelo. Maiores informações sobre a implementação dos modificadores de escoamento são obtidas na análise dos resultados (seção 4).

3.2.2. Descrição da técnica empregada

Com as condições operacionais estabelecidas para os ensaios, os equipamentos são montados em uma disposição previamente estabelecida, a fim de se obter os melhores resultados. Esta montagem depende diretamente das características físicas que se deseja estudar. A Fig. 3.5 apresenta de modo simplificado a configuração geral dos ensaios.

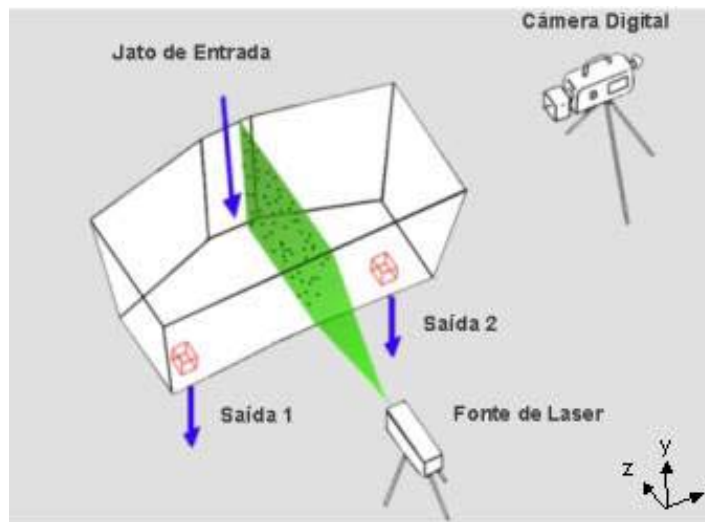


Figura 3.5. Configuração geral dos ensaios no modelo físico.

A Fig. 3.5 permite visualizar que a partir de um feixe de luz coerente (laser contínuo) é criado um plano onde partículas traçadoras são iluminadas. A gravação das imagens, para posterior tratamento, é feita através de uma câmera de vídeo digital (CCD) posicionada ortogonalmente ao plano. A distância da câmera ao modelo físico é de 1,5m.

Para se obter um ótimo plano durante os ensaios, necessita-se que o local não seja iluminado por outro tipo de luz. A fonte que está disponível no Lasid é de íons de argônio, da marca COHERENT, modelo INOVA 70, com potência nominal de 5W. A mobilidade em ajustar os planos, é devido a uma fibra ótica acoplada a fonte de laser. Uma lente

cilíndrica posicionada a 0,58m do modelo físico é fixada à fibra ótica, criando um plano com abertura de 40° em uma região de interesse do escoamento. A espessura do plano (4mm) é dada pelo uso de uma lente esférica.

Além do preenchimento do requisito quanto à luz, outra condição necessária, segundo Westerweel (1993), é que as partículas disseminadas homogêneas sejam suficientes, e elas não devem perturbar o escoamento para uma obtenção completa dos campos de velocidades. Como a velocidade medida efetivamente é de um grupo de partículas iluminadas, estas devem acompanhar o movimento do fluido. Para tanto, é fundamental que a massa específica do elemento traçador seja próxima a da água.

Para as aplicações deste trabalho, o copolímero de estireno-butadieno (S6H) é adequado conforme Silva (1997), pois atende as características necessárias. A massa específica é 1,04 g/cm³ e insolúvel em água. As partículas devem ser peneiradas atingindo diâmetros relativamente pequenos, da ordem de 100 µm, e não podem coalescer. O S6H é hidrofóbico, mas este inconveniente é facilmente contornado com um banho prévio de álcool nas partículas antes de jogá-las ao escoamento. Além disso, devem ser adicionadas ao fluido, de forma que sua distribuição ocorra uniformemente por todo o volume do escoamento.

Após a obtenção do plano de laser no escoamento, com as partículas iluminadas, a próxima etapa é a captura sequencial das imagens para serem salvas digitalmente. Estão envolvidos nesta etapa a câmera de vídeo do tipo CCD (para aquisição de imagens) e um computador com uma placa digitalizadora de imagens (para processamento). A câmera de vídeo é da marca SONY, modelo DCR-VX1000, cuja taxa de aquisição escolhida é de 30 quadros por segundo. A gravação é feita em fita magnética tipo **Digital Video (DV)** com resolução de 180000 pontos na reprodução. A duração do tempo de filmagem para gravação, por plano, foi estabelecida em um minuto.

Para passagem do vídeo ao computador, necessita-se de uma placa digitalizadora. A disponível no Lasid é uma da marca MIRÓ, modelo MIRÓplus cuja resolução máxima é de 640x480 **pixels**, com taxa de aquisição de imagens igual a da câmera.

Com o vídeo digitalizado, a próxima etapa é a conversão do vídeo em quadros sequenciais (arquivos BMP). Através do uso do programa computacional ADOBE PREMMIRE, versão 4.2, uma filmagem de um minuto a 30 quadros por segundo, pode-se obter 1800 quadros por plano filmado. Além da conversão, este programa oferece recursos para tratamento das imagens, como ajustar a intensidade do brilho das partículas, útil para etapas subsequentes. Com os arquivos BMP sequenciados, estes sofrerão todo processamento computacional no FLOWVIEWER, programa desenvolvido por Gutkoski, (2001), para obtenção dos respectivos campos de velocidade média do escoamento, um para cada ensaio (plano) realizado. Para tanto, se necessita de um computador com razoável capacidade de processamento e com grande espaço de disco rígido disponível para armazenamento dos arquivos. O computador utilizado é um Pentium III de 1,1GHz e disco rígido de 60Gb.

Outras considerações relevantes são quanto às posições dos planos de laser e as quantidades necessárias para obter a configuração completa do escoamento. Estes são dependentes da geometria, simetria e dimensões do modelo físico. Como o distribuidor apresenta um plano de simetria, apenas estudam-se os campos de velocidade em uma das metades. Idealizou-se para tal situação três planos para uma vista lateral (PL) e três planos para uma frontal (PF), como mostra a Fig. 3.6.

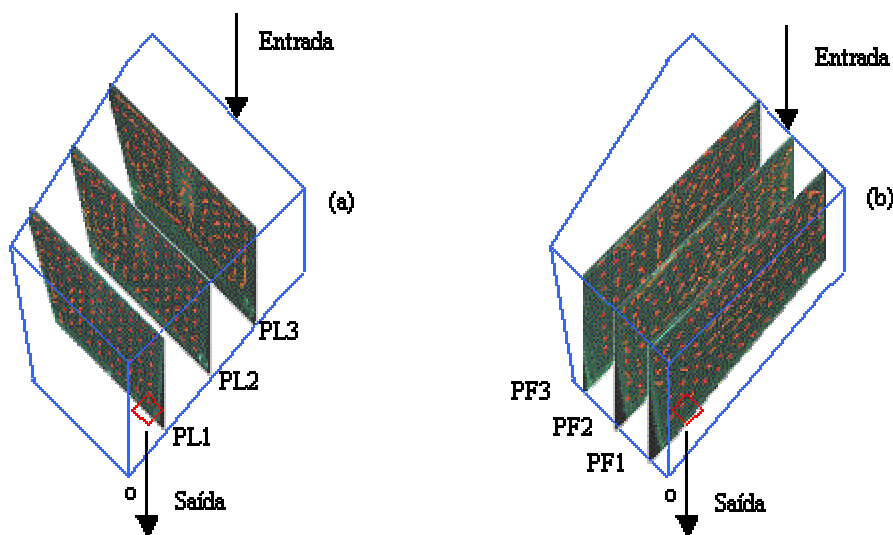


Figura 3.6. Disposição dos planos em uma das metades do modelo físico: (a) laterais, (b) frontais.

Na Fig. 3.6 para cada vista um dos planos passa sobre uma das saídas (PL1 e PF1). Na Fig. 3.6 (a) a câmera de vídeo está disposta na lateral de meio modelo e o feixe de laser na frente e a situação inversa ocorre na Fig. 3.6 (b).

Os planos foram ordenados de forma crescente, conforme a proximidade com o vértice 'o' de meio modelo, Fig. 3.6. A distância relacionada entre o vértice 'o' e cada plano, seja lateral ou frontal está apresentado na Tab. 3.2.

Tabela 3.2. Distâncias dos planos em relação ao vértice ‘o’ (em metros)

Planos	Laterais (PL)	Frontais (PF)
1	0,22	0,24
2	0,37	0,40
3	0,52	0,58

3.2.3. Estudo de incertezas de medição

Sabe-se que qualquer sistema de medição deve proceder a uma análise de incertezas para qualificar os resultados obtidos. De forma particular, em um sistema PTV ou PIV, quantificar e garantir níveis de incerteza não é uma tarefa fácil. A grande dificuldade está na separação das variáveis envolvidas na medição. Mas um processo de avaliação do sistema completo para quantificar a incerteza dos resultados finais, semelhante ao realizado por Gomes; Thompson e Azevedo, (2000), demanda tempo. Como um maior aprofundamento não é parte do escopo deste trabalho, apenas uma breve introdução dos principais fatores que interferem na medição é apresentada.

Para um sistema de velocimetria por processamento de imagens de partículas o comportamento do traçador deve representar com fidelidade o movimento do fluido em investigação no escoamento. O movimento de uma partícula é governado pelo arraste de Stokes, que ocasiona um desvio da sua velocidade em relação ao do fluido. Para evitar erro durante a medição, a máxima variação que pode ser encontrada é de 1%, segundo Westerweel (1993).

Outras fontes de erros são decorrentes da etapa de captura. As causas podem estar em defeitos nas lentes da câmera, ruído de imagem, dimensão dos pixels como partículas. Quando uma imagem tem qualidade insatisfatória, são gerados erros de interpretação na análise, prejudicando o cálculo velocimétrico. Conforme van der Laan (2001), também podem ocorrer distorções por efeitos de refração ou reflexos da luz incidente na superfície do modelo, que são geralmente evidenciados nas margens da imagem. Para minimizar o efeito da refração, deve-se ter um ângulo nulo entre a lente da câmera e o plano iluminado. Almeida (1997) descreve que o valor máximo admitido é 8,1°.

Quanto ao cálculo computacional, Gutkoski (2001) mensurou a incerteza durante a etapa de validação computacional do programa FLOWVIEWER, cujo valor máximo alcançado foi de 17%. A razão para tal resultado está na metodologia empregada que possibilita a propagação de erros.

Para o presente trabalho, apenas deseja-se obter a magnitude dos campos de velocidade e as trajetórias, não se exige grande exatidão para os resultados obtidos. Acredita-se que a incerteza total associada aos resultados alcance no máximo 20%. Assim, julgam-se adequados para avaliar o comportamento do escoamento no interior do distribuidor, o sistema disponível e o programa FLOWVIEWER.

4. Resultados e discussões

As análises dos campos de velocidade obtidos são apresentadas comparativamente, ou seja, plano a plano de cada situação testada objetivando a qualidade do produto final. Ressalta-se que primeiramente foi caracterizada a configuração sem modificadores de escoamento e somente a partir destes resultados, projetou-se uma nova configuração com um par de barreiras e um tubo longo, como forma de otimização do distribuidor. As adaptações foram resultantes dos campos de velocidades iniciais que apresentaram condições desfavoráveis à qualidade do produto final, por esta razão idealizaram-se tais modificadores. Esta é uma primeira tentativa, análises quanto à forma e espaçamento dos modificadores, alterações dos parâmetros operacionais serão estudadas futuramente.

4.1. Planos laterais

Para o plano lateral que passa sobre o veio (PL1) foram obtidos os campos de velocidade para as configurações testadas, conforme a Fig. 4.1.

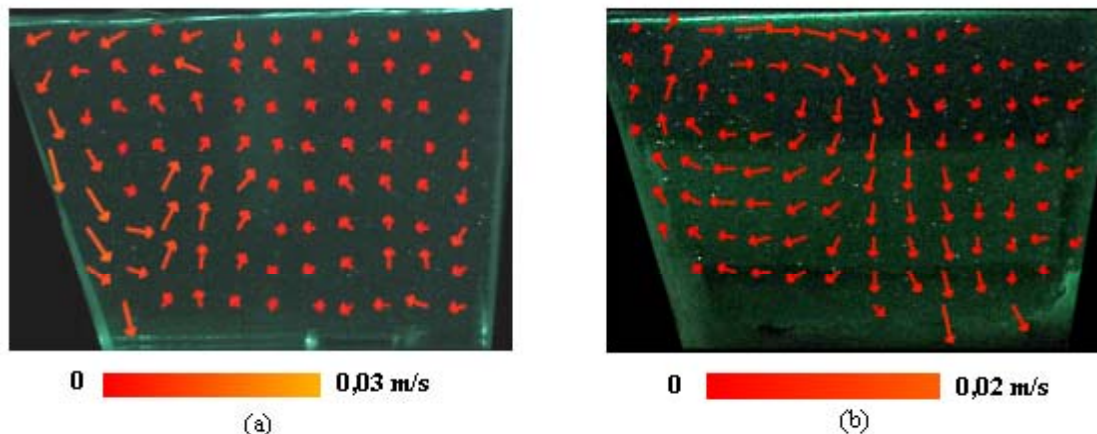


Figura 4.1. Campos de velocidade para PL1: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

Evidencia-se na Fig. 4.1 que as velocidades no interior do distribuidor são muito inferiores a 0,5 m/s, segundo Gutkoski (2001) essa é a velocidade limite para utilização do FLOWVIEWER. O jato de entrada está na região central superior e a saída à direita na parte inferior. Na Fig. 4.1 (a), no lado esquerdo, é formada uma grande recirculação em sentido anti-horário, onde na sua periferia estão as maiores velocidades e no centro surge um volume de estagnação. No lado direito as velocidades estão muito próximas de zero. Observa-se que na Fig. 4.2 (b) uma grande recirculação com velocidades mais baixas e uniformes, em sentido horário. Quer dizer um maior tempo de permanência no distribuidor, conseqüentemente uma condição mais favorável para o coalescimento e flotação das inclusões. Ainda é possível notar que as velocidades estão direcionadas para base na região central do distribuidor.

A Fig. 4.2 mostra os campos de velocidade para as configurações testadas no plano PL2.

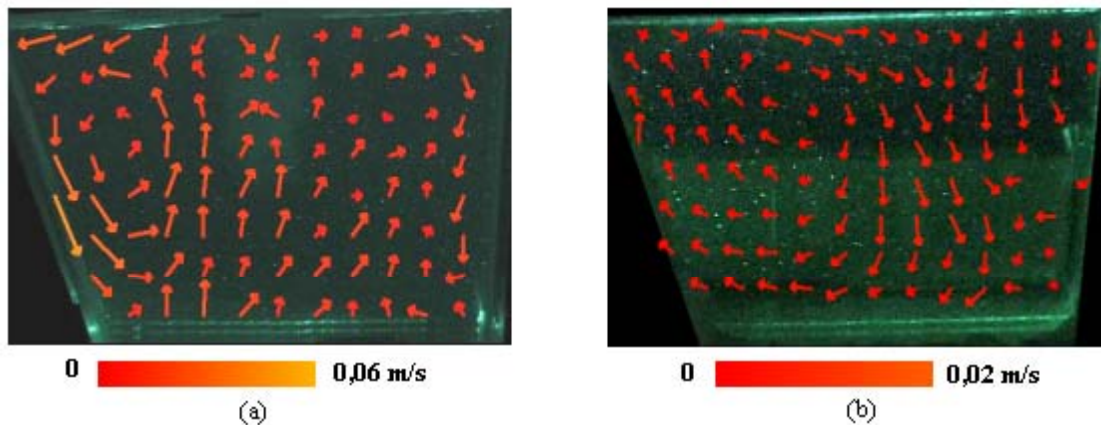


Figura 4.2. Campos de velocidade para PL2: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

Pode-se observar que o comportamento da Fig. 4.2 é muito semelhante ao da Fig. 4.1. A maior diferença está na zona de recirculação da Fig. 4.2 (a) em relação a Fig. 4.1 (a), que apresenta módulos dos vetores velocidade ligeiramente maiores. O último plano lateral é o PL3, o mais próximo do jato de entrada. Os campos de velocidade para as configurações testadas são apresentados na Fig. 4.3.

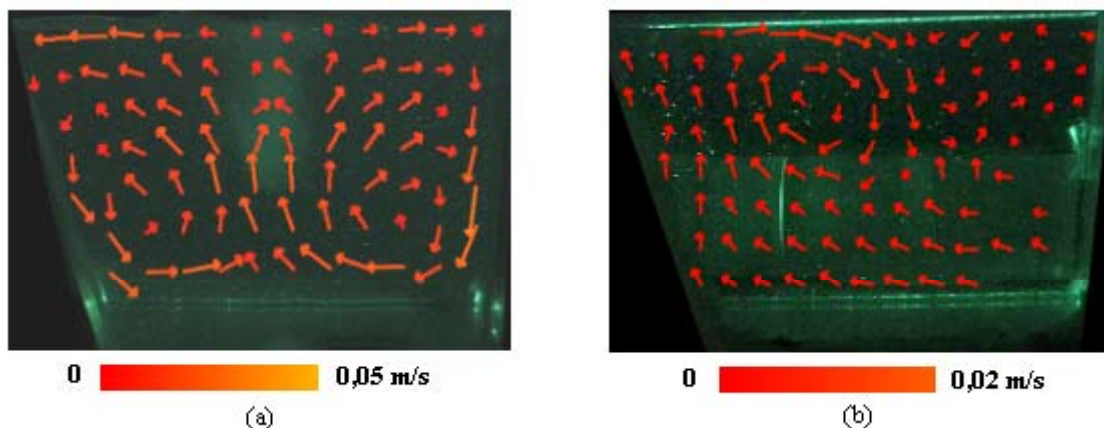


Figura 4.3. Campos de velocidade para PL3: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

Nota-se que a Fig. 4.3 (a) apresenta velocidades mais uniformes em relação às Fig. 4.2 (a) e Fig. 4.1 (a), além da formação de duas grandes zonas de recirculação. Isso se deve pela proximidade da região do jato de entrada. A Fig. 4.3 (b) mostra novamente uma recirculação. A diferença básica está no aparecimento de linhas de correntes mais uniformes na base do modelo.

4.2. Planos Frontais

Os planos frontais (PF) são apresentados como no item 4.1. O primeiro plano (PF1) está sobre um dos veios, e os campos de velocidade para as configurações testadas estão na Fig. 4.4.

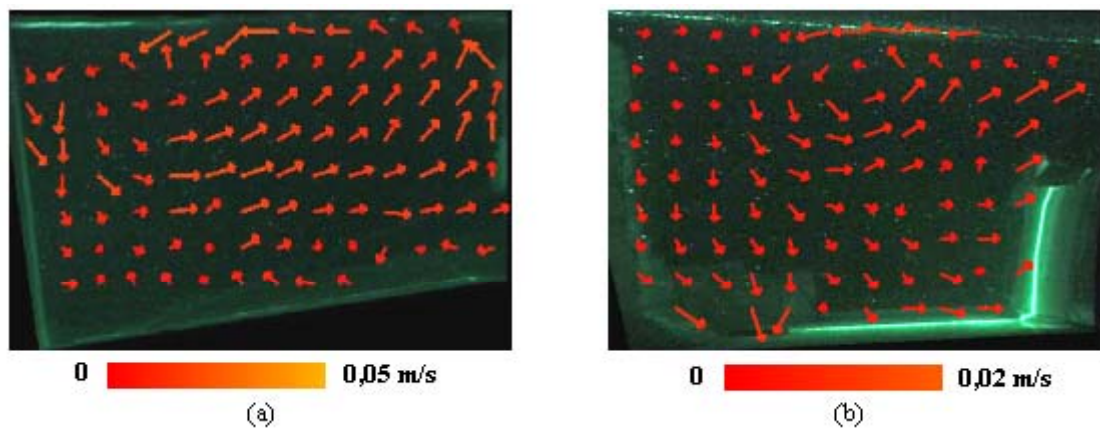


Figura 4.4. Campos de velocidade para PF1: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

Na Fig. 4.4, o jato de entrada está à direita e saída à esquerda na região inferior. Pode visualizar-se na Fig. 4.4 (a) uma zona de grande recirculação por quase todo o plano. As menores velocidades estão próximas a base do modelo. Parte do escoamento é direcionado para a superfície. O mesmo ocorre para a Fig. 4.4 (b).

Evidencia-se na Fig. 4.5, um aumento dos módulos das velocidades em relação à Fig. 4.4. Isto é devido à proximidade do plano PF2 com o jato de entrada. Na Fig. 4.5 (a) existe uma zona de recirculação e parte do escoamento ascende-se para o centro. O comportamento da Fig. 4.5 (b) é diferenciado tanto da Fig. 4.5 (a) quanto da Fig. 4.4 (b). Além da influência do jato no PF2, as barreiras promovem o direcionamento do fluido que entra no distribuidor para a superfície. Caracteriza-se uma maior limpidez, pois as inclusões podem ser absorvidas pela camada de escória.

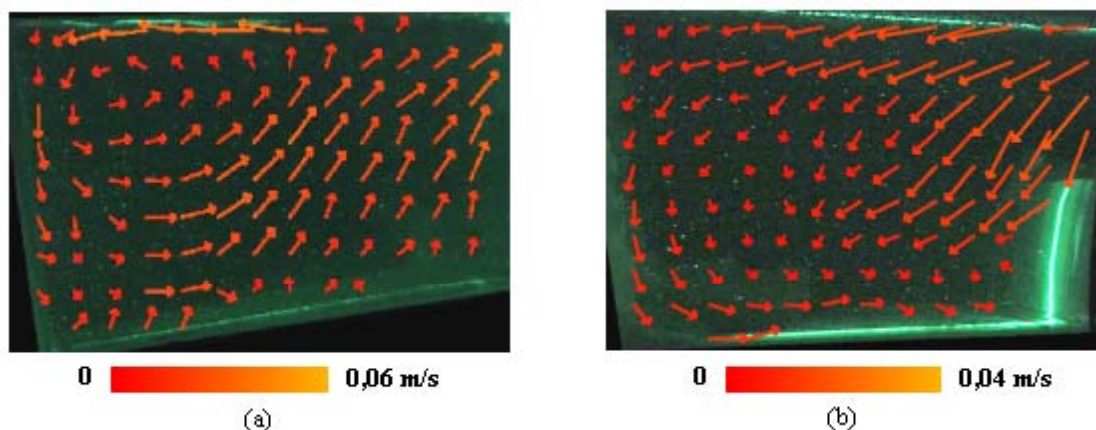


Figura 4.5. Campos de velocidade para PF2: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

A Fig. 4.6 apresenta os campos de velocidade para ambas configurações para o último plano frontal (PF3).

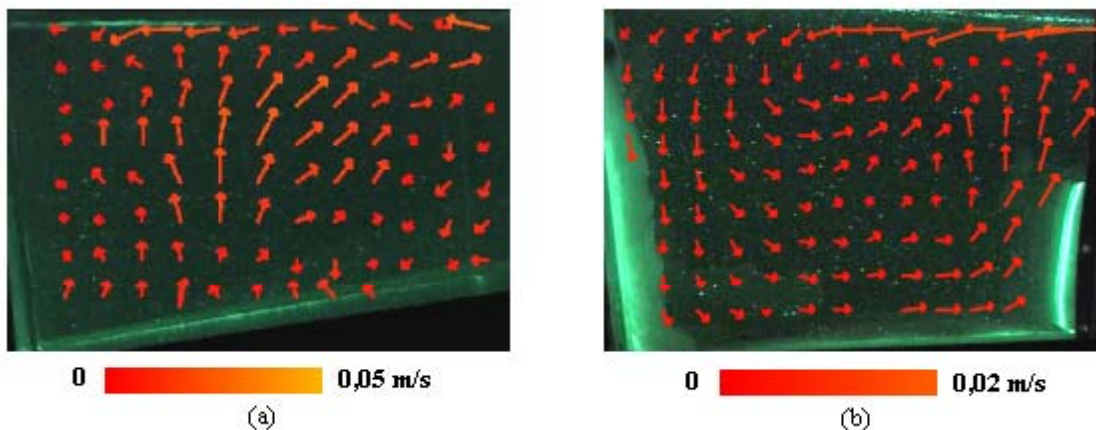


Figura 4.6. Campos de velocidade para PF3: (a) sem modificadores de escoamento, (b) com modificadores de escoamento.

Pela observação da Fig. 4.6 parte do escoamento é direcionada para o centro do distribuidor, em ambas as configurações. Na Fig. 4.6 (b) as velocidades são menores e existe uma grande zona de recirculação uniforme.

De um modo geral, a configuração com o par de barreiras e tubo longo, aparentemente, alcançou melhores resultados em termos de qualidade de aço. Para a confirmação dos resultados experimentais, deve-se realizar um acompanhamento na planta e quantificar a redução de defeitos.

5. Conclusões

O sistema PTV bidimensional mostrou ser uma valiosa ferramenta para quantificar e apresentar as características do escoamento no interior do modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo em escala plena e condição isotérmica. Uma vez que medições de escoamento na planta são inviabilizadas pelos custos e riscos envolvidos no processo.

Foram obtidos campos de velocidade com razoável coerência para 3 planos frontais e 3 planos laterais em duas configurações testadas. Resumidamente, o comportamento geral da configuração com as barreiras e tubo longo favoreceu um escoamento ascendente e apresentou velocidades mais baixas e uniformes em relação à configuração sem modificadores. Uma possível consequência para o uso destas peças está na redução do número de inclusões não-metálicas presentes no aço líquido. Para tanto, um acompanhamento na planta faz-se necessário para validar os resultados, mas ficará para uma próxima etapa. Situação idêntica ocorre para continuidade no desenvolvimento de novas configurações que objetivam um incremento da qualidade do produto final.

Além do requisito quanto ao escoamento, a importância do uso do tubo longo na planta torna-se ponto chave. Principalmente pela sua função em proteger o metal líquido de uma exposição com a atmosfera, ou seja, evitando a reoxidação do produto. Este componente também garante uma maior proteção aos operadores do lingotamento contínuo.

Futuros testes com diferentes barreiras, espaçamentos, configurações operacionais deverão ser estudados.

6. Referências

- Adrian, R. J., 1991, "Particle Image Velocimetry", TSI, Bruxelas, Bélgica, 42 p.
- Aguilar-Corona, A., Morales, R. D., Díaz-Cruz, M., Palafox-Ramos, J. and Rodríguez-Hernández, H., 2002, "Modelling the effects of off-centered ladle streams on fluid flow of liquid steel in a slab tundish", *Steel Research* 73, n.10, pp.438-444.
- Almeida, J. A., 1997, "Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas", Tese de Doutorado em Engenharia, PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- Ferreira, V. C. S., Gutkoski, L. L. e van der Laan, F. T., 1997, "Medição de campos de velocidade em escoamentos com o emprego da técnica de processamento de imagens", XIV COBEM, Bauru, SP.
- Gomes, B. A. A., Thompson, R. L. and Azevedo, L. F. A., 2000, "Solid body rotation flow for particle image velocimetry calibration", XVIII ENCIT, Porto Alegre.
- Gutkoski, L. L., Wollmann, A. M., Silva, L. G. e., François, M. B. G., Vilela, A. C. F. e Ferreira, V. C. S., 1997, "Processamento de imagens de partículas como método para determinação de linha de fluxo de distribuidores de lingotamento contínuo", II Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo.
- Gutkoski, L. L., 2001, "Ferramenta Computacional para a Medição de Campos de Velocidade Utilizando Processamento Digital de Imagens", 2001, Dissertação de Mestrado em Engenharia, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Heaslip, L. J., McLean, A. and Sommerville, I. D., 1983, "Continuous Casting – Chemical and Physical Interactions During Transfer Operations", *The Iron and Steel Society of AIME*, Vol. 1, Michigan, EUA.
- Odenthal, H. -J., Pfeifer, H. and Klaas, M., 2000, "Physical and mathematical modelling of tundish flows using digital particle image Velocimetry and CFD-methods", *Steel Research* 71, No. 6+7, pp. 210-219.
- Odenthal, H. -J., Bölling, R., Pfeifer, H., Holzhauser, J. -F and Wahlers, F. -J, 2001, "Mechanism of fluid flow in a continuous casting tundish with different turbo-stoppers", *Steel Research* 72, No. 11+12, pp. 466-476.
- Silva, L. G e., 1997, "Modelamento físico no distribuidor de lingotamento contínuo", Dissertação de Mestrado em Engenharia, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre.
- Szekely, J., 1979, "Fluid Flow Phenomena in Metals Processing", Academic Press, Nova Iorque, EUA.
- Van der Laan, F. T., 2001, "Medição de Campos de Velocidade em Fluidos com Técnicas "Intraframe" de Processamento Digital em Imagens (PIV)", Tese de Doutorado em Engenharia, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre.
- Vargas-Zamora, A., Morales, R. D., Díaz-Cruz M., Palafox-Ramos, J. and Demedices, L. G., 2003, "Heat and mass transfer of convective-stratified flow in a trough type tundish" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 46, pp. 3029-3039.
- Westerweel, J., 1993, "Digital Particle Image Velocimetry – Theory and Application", PhD Thesis, Delft University Press, Delft, Holanda.

PTV Technique Applied a Tundish Physical Model

Ismael Lis Alves Daoud

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 220 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
daoud@ct.ufrgs.br

Magda Beatriz Galant François

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 220 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
francois@ct.ufrgs.br

Antônio Cezar Faria Vilela

Laboratório de Siderurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia/ UFRGS - Sala 222 – 91501-970 - Porto Alegre/RS
vilela@ufrgs.br

Flávio Tadeu van der Laan

Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Escola de Engenharia/ UFRGS – 90046-900 - Porto Alegre/RS
ftvdl@ufrgs.br

***Abstract.** The metallurgic phenomena in a tundish are directly related on the liquid steel flowing. Velocities measurements in the plant are completely impracticable due to the risks and involved costs. For these reasons, the flow behavior, in a similar physical model, of the industrial equipment is studied, in full scale and isothermal condition. Through the application on the flow measurement technique using the Particle Tracking Velocimetry (PTV), are obtained the velocity fields in several plans, so images are processed in computational program with academic development. Comparing the results, quality steel optimization is able with dams and shroud.*

Keywords: Tundish, Flow visualization, PTV, Image processing.