

## INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM DIFUSORES RADIAIS

**Luis E. M. Souto**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, CEP 88.040-900  
[souto@nrva.ufsc.br](mailto:souto@nrva.ufsc.br)

**César J. Deschamps**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, CEP 88.040-900  
[deschamps@nrva.ufsc.br](mailto:deschamps@nrva.ufsc.br)

**Resumo.** O trabalho considera uma investigação experimental do escoamento turbulento em difusores radiais. Este tipo de escoamento é importante em uma série de aplicações tecnológicas e tem despertado também o interesse de pesquisadores devido a suas peculiaridades fenomenológicas. Soluções analíticas se restringem a condições idealizadas do escoamento e por esta razão a modelação numérica tem sido uma das formas mais difundidas para a análise do problema. Trabalhos com enfoque experimental são em número reduzido e na quase sua totalidade fornecem somente dados de força (ou distribuição de pressão) atuando sobre o disco frontal. Neste trabalho investiga-se o comportamento do escoamento turbulento em um difusor radial com disco concêntricos e paralelos, considerando os regimes estacionário e transiente. A condição de transiente é representada pela pulsação na vazão do escoamento, imposta pelo acionamento de uma válvula proporcional, mas com o afastamento entre os discos mantido fixo. As distribuições de pressão medidas sobre o disco frontal nessas duas condições de escoamento indicam que, para as condições de transientes analisadas, não há um efeito significativo da pulsação sobre o escoamento. No entanto, os dados sugerem que efeitos mais pronunciados podem acontecer em situações de afastamentos mais elevados entre os discos ou para relações menores entre os diâmetros do disco frontal e do orifício de passagem do escoamento. Dados experimentais de velocidade média e tensões normais turbulentas na saída do difusor são fornecidos para o escoamento estacionário. Verificou-se uma condição de assimetria para o perfil de velocidade provocada pela região de recirculação dentro do difusor. Além disto, embora tenham sido registrados níveis elevados de turbulência em todas as condições de escoamento, observou-se em alguns casos a presença de um processo de laminarização no difusor.

**Palavras chave:** difusores radiais, turbulência, válvulas de compressores

### 1. Introdução

A Fig. (1) apresenta a geometria de um difusor radial com os parâmetros que afetam o escoamento. O fluido entra axialmente através de um orifício de passagem de diâmetro  $d$  e, após ser defletido pelo disco frontal de diâmetro  $D$ , escoar radialmente entre as superfícies dos dois discos. Uma série de trabalhos em difusores radiais considerou o regime de escoamento laminar (Jackson e Symmons, 1965; Hayashi et al., 1975; Wark e Foss, 1984; Ferreira et al., 1989; Possamai et al., 2001). A ênfase desses trabalhos foi determinar a distribuição de pressão entre os discos. No caso de soluções analíticas, as simplificações introduzidas nas equações impediram uma representação precisa do escoamento para números de Reynolds elevados. Para o escoamento turbulento, alguns trabalhos consideraram o escoamento puramente radial, desprezando os efeitos de entrada (Ervin et al., 1989; Tabatabai e Pollard, 1987), ou com alimentação axial através de soluções numéricas do escoamento (Deschamps et al., 1996; Salinas-Casanova et al., 2000).

O difusor radial é uma geometria de escoamento importante para o entendimento de várias aplicações tecnológicas, tais como válvulas de compressores alternativos (Ferreira e Driessen, 1986), mancais aeroestáticos (Hamrock, 1994) e válvulas de componentes hidráulicos e pneumáticos (Hayashi et al., 1975). Além disto, o escoamento é um fenômeno de interesse científico devido à sua complexidade. Por exemplo, o gradiente de pressão na direção radial ao longo do difusor pode ser positivo (no caso de pequenos afastamentos) ou negativo, dependendo da posição radial entre os discos. Um gradiente de pressão positivo, devido a uma diminuição da velocidade com o aumento do raio, pode ocasionar a separação do escoamento. Jackson e Symmons (1965) argumentaram que tais gradientes podem também causar instabilidades no escoamento, tornando-o assimétrico. Um outro aspecto interessante é que um escoamento inicialmente turbulento no orifício de passagem pode sofrer um processo de laminarização ao longo do difusor, devido à diminuição dos níveis de velocidade com o aumento da posição radial. Finalmente, a força resultante entre os discos pode ser tanto positiva (repulsão) como negativa (atração) e é uma função dos vários parâmetros do escoamento.

De acordo com Raal (1978), a separação do escoamento laminar na entrada do difusor, causada pela sua mudança brusca de direção ao deixar o orifício de passagem, ocorre sempre que  $Re > 480$  ( $s/d$ ), onde  $Re (= \rho U d / \mu)$  é o número de Reynolds baseado na velocidade e no diâmetro relativos ao orifício de passagem.

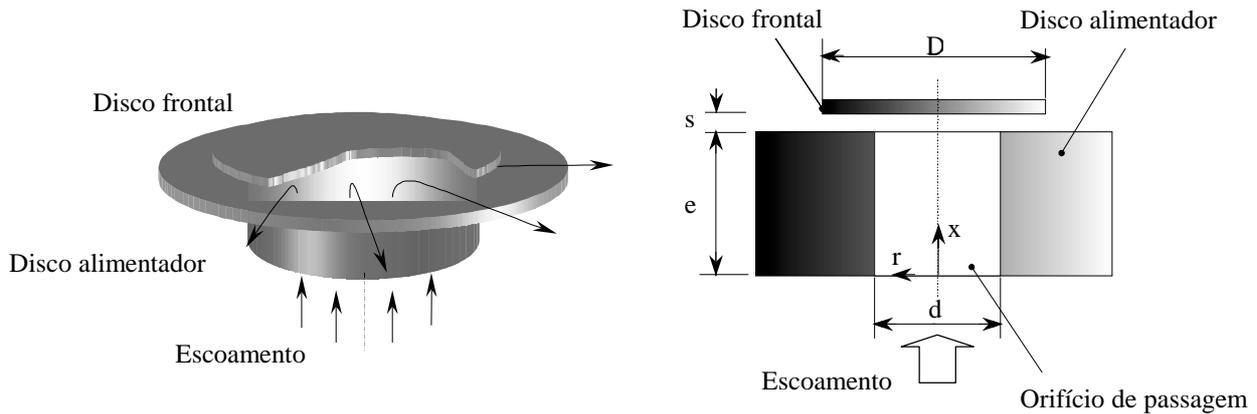


Figura 1. Geometria do difusor radial

O fato de que a posição radial de reatamento da região de separação aumenta com o aumento do número Reynolds é evidenciada por uma série de observações analíticas e experimentais (Moller, 1963; Hayashi et. al, 1975; Raal, 1978). Para valores suficientemente elevados de  $Re$  e  $D/d$ , o ponto de reatamento tende a um valor fixo (Moller, 1963). Com relação a este aspecto, três categorias de escoamento podem ser identificadas: i)  $D/d \rightarrow 1$  ou  $s/d \rightarrow \infty$  para a qual não há reatamento do escoamento; ii)  $s/d \rightarrow 0$  ou  $D/d \rightarrow \infty$  para a qual o reatamento sempre ocorre e iii) valores intermediários de  $s/d$  e  $D/d$ , para a qual o número de Reynolds tem um papel importante da configuração do escoamento.

Moller (1963) foi o primeiro pesquisador a realizar extensivas medições de perfis de velocidade média para o caso de escoamento turbulento, utilizando tubos de Pitot, e sugeriu um processo de laminarização ao longo do difusor devido ao aumento de espessura da subcamada limite viscosa. Kreith (1966) sugeriu uma equação para a previsão da laminarização em difusores radiais, através da qual pode-se determinar a posição radial  $r_c$  para esta transição inversa:

$$r_c / d = 0,135 (Re \ s/d)^{1/2} \tag{1}$$

Experimentos de Bakke & Kreith (1969) mostraram que a laminarização não chega efetivamente a acontecer em sua totalidade, indicando que de fato a produção da energia cinética turbulenta na direção radial ( $-\overline{v^2}dV/dr$ ) aumenta. No entanto, ponderaram que não se pode atribuir a este termo a manutenção do regime turbulento, uma vez que em muitos casos o mesmo é pequeno quando comparado ao mecanismo de dissipação.

Higgins (1975) mediu a variação da intensidade da turbulência em difusores radiais e sugeriu que o início do seu decaimento acontece para a posição radial dimensional:

$$r_c / d = 0,344 s/d (Re)^{1/2} \tag{2}$$

Observa-se pelo exame das Eqs. (1) e (2) que a estimativa de Higgins (1975) indica valores menores para a posição radial  $r_c$  onde o processo de laminarização inicia.

Tabatabai e Pollard (1987) investigaram experimentalmente o escoamento turbulento em um difusor radial com discos paralelos e uma relação de diâmetros  $D/d = 10$ , com o objetivo de analisar o mecanismo do decaimento da turbulência. Observaram que para números de Reynolds elevados o comportamento do escoamento é semelhante ao do escoamento turbulento plenamente desenvolvido em canais e que para Reynolds baixos ( $Re < 30.000$ ) a turbulência decai ao longo do difusor, tornando o perfil de velocidade semelhante ao do escoamento laminar. Os autores chegaram a conclusão de que o decaimento da turbulência é lento devido ao mecanismo de geração da turbulência se manter mesmo para números de Reynolds reduzidos. Verificaram também as estruturas turbulentas de grandes escalas persistem no escoamento mesmo sob um processo de laminarização.

Ervin et al. (1989) investigaram experimentalmente o escoamento turbulento incompressível entre dois discos paralelos utilizando anemometria de fio quente. Os autores realizaram medições para as componentes axial e radial da velocidade instantânea do escoamento e a partir destes obtiveram perfis de velocidade média e intensidade da turbulência. Com a observação do perfil de velocidade média experimental, concluíram que a hipótese de perfil universal de velocidade não é adequado para a região de entrada do escoamento no difusor, sendo porém satisfatória em regiões mais afastadas ao longo do difusor.

Deschamps et al. (1996) investigou numérica e experimentalmente o escoamento turbulento incompressível em difusores radiais. A boa concordância observada entre os resultados experimentais e numéricos demonstrou que o modelo de turbulência RNG k- $\epsilon$  (Orzag et al., 1986) é capaz de prever detalhes do escoamento não capturados por outros modelos k- $\epsilon$  tais como o proposto por Launder e Sharma (1974).

Salinas-Casanova (2001) analisou numericamente o escoamento turbulento incompressível pulsante em difusores radiais, impondo uma variação senoidal para o número de Reynolds, e a partir de resultados de distribuição de pressão sobre o disco frontal verificou que o escoamento não é afetado pela pulsação do escoamento.

Piechna e Meier (1986) apresentaram uma solução numérica do escoamento laminar incompressível pelo método de elementos finitos. Além da situação de regime permanente, o escoamento também foi resolvido para o caso de regime transiente, sendo imposto um movimento periódico para o disco frontal. Observaram que a região de separação na entrada do difusor, sofre alterações provocadas pela oscilação da parede do disco frontal. Ishizawa et al. (1987) investigaram analítica e experimentalmente o escoamento laminar incompressível transiente em um difusor radial com discos paralelos, impondo um movimento oscilatório para o disco frontal. As equações do movimento foram resolvidas por um método de expansão em série e os resultados teóricos mostraram boa concordância com os dados experimentais.

Da revisão bibliográfica verifica-se que vários aspectos do escoamento em difusores radiais foram investigados. No entanto, no caso do escoamento turbulento há ainda um número reduzido de dados experimentais que possam ser utilizados para a compreensão do escoamento e para a validação de modelos computacionais. Além disto, um aspecto de interesse tecnológico que acontece em válvulas diz respeito ao comportamento transiente do escoamento. Os trabalhos que abordam este assunto o fazem de forma teórica na quase sua totalidade, havendo assim uma carência de dados experimentais para a validação dos resultados.

O objetivo do presente trabalho é investigar experimentalmente o comportamento do escoamento turbulento em um difusor radial com discos concêntricos e paralelos, como ilustrado na Fig. (1), para as condições de escoamento estacionário e transiente. Dados para a distribuição de pressão sobre o disco frontal são apresentados para estas duas condições de escoamento, em diferentes situações de afastamento  $s/d$ , relações de diâmetros  $D/d$  e vazão (representada pelo número de Reynolds,  $Re = \rho U d / \mu$ ). Além disto, para a condição de escoamento estacionário são realizadas medições de perfis de velocidade média e de tensões normais turbulentas na seção transversal da saída do difusor. Os resultados desta investigação servirão também como complementos importantes aos trabalhos de Salinas-Casanova et al. (1999) e Salinas-Casanova (2001).

## 2. Bancada Experimental

A bancada esquematizada na Fig (2) é formada por reservatórios de ar comprimido e elementos para o controle da pressão, vazão e impurezas do ar sendo fornecido à seção de teste. A vazão é medida por uma placa de orifício localizada entre dois tubos de alumínio de diâmetro interno de 34,9 mm e comprimentos de 2000 mm. As tubulações têm comprimentos maior que cinquenta vezes o diâmetro interno antes e depois da placa de orifício para garantir a condição de escoamento plenamente desenvolvido no medidor de vazão e na seção de testes. A placa de orifício foi construída de acordo com a norma BS1042 (British Standard Institution, 1989). O controle da vazão, incluindo o estabelecimento da condição de escoamento pulsante, é realizado através da atuação remota de uma válvula proporcional de vazão da marca FESTO, modelo MPYE-5-1/8-LF-B.

A seção de teste é montada em uma das extremidades da canalização e é composta pelo difusor radial e um sistema de posicionamento para o disco frontal, conforme mostrado na Fig. (3). O diâmetro do orifício de passagem, indicado na Fig. (1), é igual ao diâmetro interno do tubo de alumínio, eliminando assim qualquer tipo de contração ou expansão abrupta que possa vir a perturbar o escoamento. O diâmetro do disco com o orifício de passagem é igual a 104,7 mm. O disco frontal foi fabricado em aço inoxidável com excelente acabamento superficial. Para maior abrangência da análise, dois diâmetros  $D$  foram testados para o disco frontal (57,9 e 104,7 mm), fornecendo relações de diâmetros  $D/d$  iguais a 1,66 e 3, respectivamente.

Conforme ilustrado na Fig. (3), uma haste deslizante possuindo uma tomada de pressão de diâmetro de 0,7 mm no seu centro é montada sobre o disco frontal a fim de medir a distribuição de pressão originada pelo escoamento. O sinal de pressão é levado para uma das extremidades da haste através de um canal interno de 2 mm de diâmetro e lá conectado a um transdutor indutivo de pressão. Na outra extremidade da haste é fixado um transdutor indutivo de deslocamento para a leitura da posição instantânea da tomada de pressão.

Um aspecto fundamental no experimento é a determinação do afastamento entre os discos de forma precisa. Isto é realizado com um conjunto de mesas de deslocamento linear e angular, ilustradas na Fig. (3), que permitem, além do ajuste do afastamento, um bom controle do paralelismo e da concentricidade entre os discos.

Na realização do experimento necessita-se medir temperatura, pressão, deslocamento e velocidade. As temperaturas ambiente e do escoamento na tubulação são praticamente as mesmas. Assim, a temperatura ambiente foi utilizada para o cálculo dos diversos parâmetros do escoamento e o seu valor fornecido por um semicondutor de fabricação da National Instruments, modelo LM-35CZ.

A pressão atmosférica é obtida de um barômetro de mercúrio com faixa de operação de 630 a 810 mm Hg e menor divisão de escala de 0,1 mm Hg. Os valores de pressão referente à placa de orifício e ao disco frontal foram obtidos com transdutores indutivos da HBM, modelo PD1, calibrados com um manômetro de coluna de água em "U". A posição da tomada de pressão sobre a haste deslizante é medida com um transdutor indutivo de deslocamento da marca HBM, modelo W100K, com faixa de operação de 250 mm. Todos os sinais de transdutores indutivos de pressão e de deslocamento foram tratados por amplificadores da marca HBM, modelo AE501.

A medição dos perfis de velocidade na saída do difusor são realizadas com um sistema de anemometria de fio quente StreamLine da Dantec. O sistema é composto por um módulo de aquisição e um calibrador para sondas com precisão de  $\pm 1\%$ . A sonda utilizada para a medição da velocidade foi do tipo unidimensional, modelo Dantec 55P11. Uma sonda de temperatura da Dantec, modelo 55A76, foi posicionada na saída do difusor para registrar variações de temperatura durante o experimento. O posicionamento adequado da sonda na seção de saída do difusor é alcançado com

um sistema de posicionamento composto de duas mesas de deslocamento micrométrico, permitindo a movimentação da sonda em duas direções ortogonais.

Três placas de conversão A/D da National Instruments foram utilizadas: i) AT-MIO-16F-5 para o sistema de anemometria de fio quente; ii) LAB-PC+ dedicada exclusivamente ao controle da válvula proporcional; iii) AT-MIO-16L-9 para a aquisição dos sinais de pressão, deslocamento e temperatura.

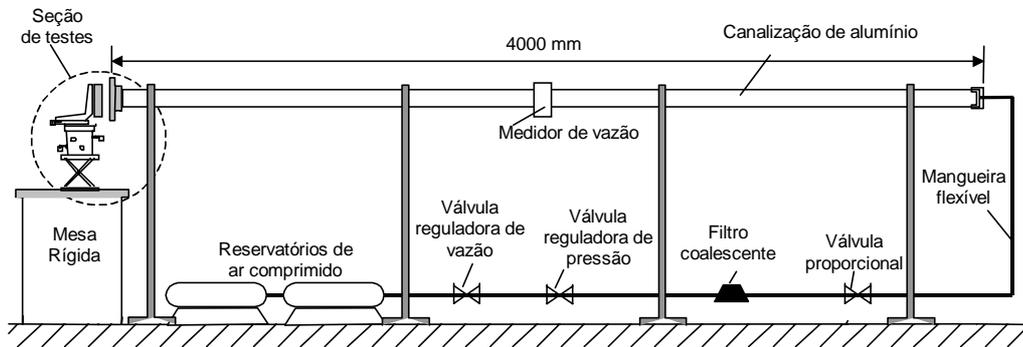


Figura 2. Bancada experimental

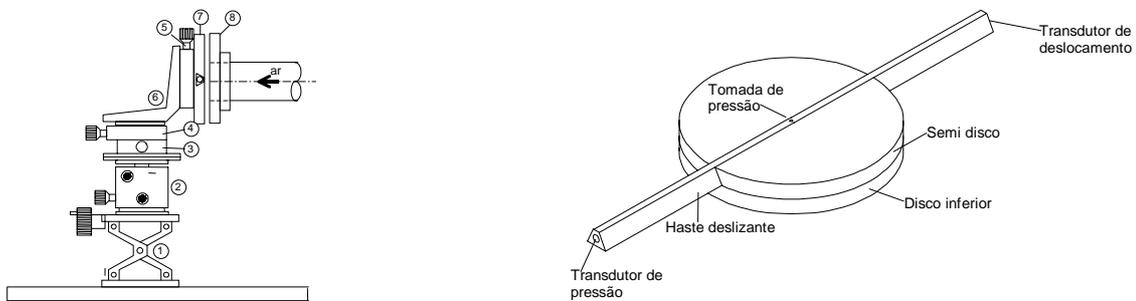


Figura 3. Sistemas para o posicionamento do disco frontal e para a medição de sua distribuição de pressão.

### 3. Procedimento experimental e redução dos dados

Para a aquisição e processamento dos sinais de velocidade do sistema de anemometria de fio quente foi utilizado o programa StreamWare da Dantec (1996). Todas as outras medições do experimento (tal como vazão, distribuição de pressão, etc) foram obtidas e processadas através de um programa especialmente desenvolvido com base na plataforma LabView da National Instruments (2000).

Antes de iniciar o experimento é necessário que se verifiquem todas as conexões e mangueiras da tubulação e dos transdutores de pressão, a fim de garantir que não haja vazamento de ar e assim leituras errôneas dos dados. É preciso também assegurar que as superfícies dos discos estejam devidamente livres de resíduos, uma vez que o afastamento máximo entre os discos corresponde a aproximadamente 3 mm.

O ajuste no posicionamento do disco frontal é realizado com o auxílio de uma esfera de rolamento com diâmetro de  $5,0029 \pm 0,0008$  mm, colada à extremidade de uma linha fina e introduzida entre os discos. O posicionamento é ajustado através de mesas de deslocamento até que a esfera sofra uma pequena interferência ao ser deslizada entre os discos, fornecendo assim um afastamento conhecido. Partindo desta posição pode-se então ajustar o afastamento desejado entre os discos. O programa de monitoramento e aquisição de dados é executado fazendo-se inicialmente um rápido teste para verificação do paralelismo entre os discos, possível de ser observado pela simetria da distribuição de pressão sobre o disco frontal. Caso os discos não estejam paralelos, as etapas anteriores são repetidas até que se alcance o paralelismo. Estima-se uma incerteza de 0,01 mm para o afastamento entre os discos, representando uma incerteza menor do que 0,5 % para o valor da pressão.

O experimento é iniciado com a leitura da pressão ambiente e então as válvulas reguladoras de vazão e pressão são abertas e o programa de monitoramento acionado. Através deste programa é possível visualizar todas as variáveis em tempo real e controlar a abertura e o fechamento da válvula proporcional.

No caso de medições da distribuição de pressão sobre o disco frontal, a primeira medição é realizada para a condição de escoamento estacionário. Para isto, determina-se uma abertura da válvula proporcional correspondente a um valor de vazão desejado, expresso através do número de Reynolds. Com a vazão mantida constante, a haste deslizante do disco frontal é deslocada de uma extremidade à outra do disco e o programa de aquisição registra de forma simultânea os valores da posição e da pressão. A taxa de aquisição para os experimentos de distribuição de

pressão para regime estacionário é de duzentos e cinquenta leituras por segundo para cada grandeza de interesse. A coleta é feita durante trinta segundos e nesse tempo com o movimento da haste mede-se a distribuição de pressão ao longo da superfície do disco frontal.

Para o escoamento pulsante é necessário promover uma variação na vazão do escoamento ao longo do tempo. Isto é alcançado pelo acionamento da válvula proporcional segundo uma variação senoidal de tensão. A Fig. (4) mostra a condição de pulsação obtida para o escoamento pelos acionamentos de abertura e de fechamento da válvula, segundo uma frequência de 1 Hz e uma amplitude de 50% em torno do valor médio de vazão ao longo dos ciclos ( $Re \cong 12\ 000$ ).

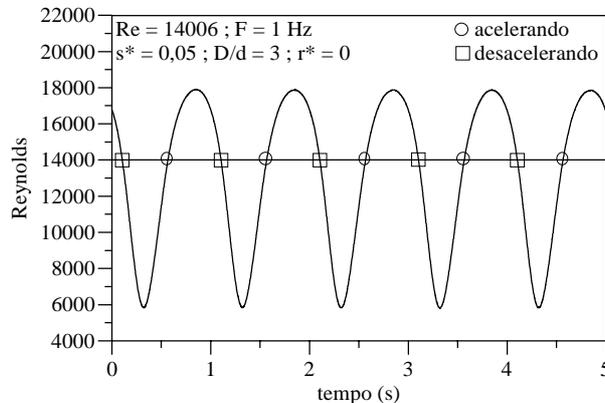


Figura 4. Variação da vazão imposta através da válvula proporcional.

Em tais condições de escoamento transiente, a haste com a tomada de pressão é posicionada em posições fixas sobre o disco frontal e para cada uma delas é realizada a aquisição dos dados do escoamento (pressão e vazão) ao longo do tempo. A taxa de coleta foi de mil amostras por ciclo para cada quantidade medida. Para cada posição sobre o disco frontal os dados são monitorados durante dez ciclos de tempo e os cinco últimos são então gravados. Este procedimento de registrar somente os últimos cinco ciclos garante que os dados correspondam a uma condição de escoamento periódico plenamente estabelecido. As medições são repetidas para outras posições da tomada de pressão sobre o disco frontal até existirem pontos suficientes para a caracterização da distribuição de pressão sobre o disco frontal.

Um cuidado tomado para escoamento pulsante decorre da distância existente entre os transdutores de pressão da placa de orifício e o transdutor de pressão do disco frontal. Esta distância é de aproximadamente 3,5 metros e gera uma defasagem entre as leituras de vazão e de pressão no disco frontal. Por esta razão, as medidas no disco frontal foram ajustadas para compensar esta defasagem.

Após os testes para a distribuição de pressão sobre o disco frontal, são realizados levantamentos dos perfis de velocidade média e de tensões normais turbulentas para a condição de escoamento estacionário em uma seção transversal localizada a 1 mm da saída do difusor. A posição de referência necessária para estas medições é determinada visualmente, posicionando a sonda o mais próximo possível da borda do disco frontal. Após esta etapa então, a sonda é deslocada para a seção de interesse e o sistema de aquisição do anemômetro é acionado. Medições de velocidade são obtidas a uma taxa de 20 kHz ao longo de dois segundos para cada uma das posições ao longo da seção.

## 4. Resultados

Neste seção são apresentados os principais resultados obtidos na investigação do escoamento turbulento em difusores radiais. Dados para a distribuição de pressão sobre o disco frontal são fornecidos para duas relações de diâmetros  $D/d$  ( $= 1,66$  e  $3$ ), para as condições de escoamento estacionário e escoamento pulsante. Além disto, para o escoamento estacionário, perfis de velocidade média e de tensão normal de Reynolds são fornecidos na seção de saída do difusor radial para  $D/d = 3$  e afastamentos adimensionais  $s^*$  ( $= s/d$ ) iguais a  $0,05$ ;  $0,07$  e  $0,1$ . Esses perfis são também comparados com soluções numéricas do escoamento a fim de avaliar o desempenho do modelo de turbulência proposto por Salinas-Casanova et al. (2000).

### 4.1. Distribuição de pressão sobre o disco frontal

As Figs. (5) e (6) apresentam resultados da distribuição de pressão manométrica adimensional  $p^*$  [ $= p/(\rho U_{in}^2/2)$ ] em posições radiais  $r^*$  ( $= r/d$ ) sobre o disco frontal para relações de diâmetro  $D/d = 1,66$  e  $3$ , respectivamente, e duas situações de afastamento entre os discos:  $s^* = 0,07$  e  $0,1$ . Em todos os casos o número de Reynolds foi de aproximadamente  $14\ 000$ . A incerteza associada às medições de pressão sobre o disco frontal é de aproximadamente 2%.

Como verificado em outros trabalhos para escoamentos laminar (Ferreira et al., 1989) e turbulento (Deschamps et al., 1996), a distribuição de pressão exibe um patamar na região central ( $r^* < 0,5$ ). Uma outra característica conhecida do escoamento é a queda brusca da pressão em  $r^* \approx 0,5$ , devido à mudança de direção do escoamento. Para posições radiais  $r^* > 0,5$  a pressão permanece negativa, tendendo à condição de pressão atmosférica. No entanto, para a

combinação de maior afastamento ( $s^* = 0,1$ ) e menor relação de diâmetro ( $D/d = 1,66$ ) o comprimento do difusor não é suficiente para que a pressão alcance o valor da pressão atmosférica.

Nas Figs. (5) e (6) estão também indicados os valores de pressão sobre o disco para uma condição de pulsação do escoamento, referente a uma frequência de 1 Hz e amplitude de 50% em torno do valor médio da vazão ao longo dos ciclos. Pode-se observar das figuras que para esta condição de transiente não há efeito significativo da pulsação sobre a distribuição de pressão, independente se o escoamento está acelerando ou desacelerando. Apesar deste fato, fica visível também que à medida que o afastamento  $s^*$  aumenta e a relação de diâmetros  $D/d$  diminui as variações nos valores de  $p^*$  sob condições de aceleração e desaceleração ficam mais evidentes. A razão disto se deve provavelmente à diminuição dos efeitos viscosos sobre o escoamento decorrente das alterações em  $s^*$  e  $D/d$ .

Em função dos resultados apresentados, conclui-se que embora o padrão do escoamento não tenha sofrido alterações importantes devido aos efeitos de inércia, deve-se considerar condições de transientes mais rápidas (ou combinações de maiores  $s^*$  e menores  $D/d$ ) em trabalhos futuros. A região de recirculação na entrada do difusor é determinante no padrão do escoamento e a sua capacidade em responder em fase com variações mais rápidas do escoamento deve ser investigada. Condições de pulsação mais severas não puderam ser tratadas neste trabalho em função da limitação do medidor tipo placa de orifício.

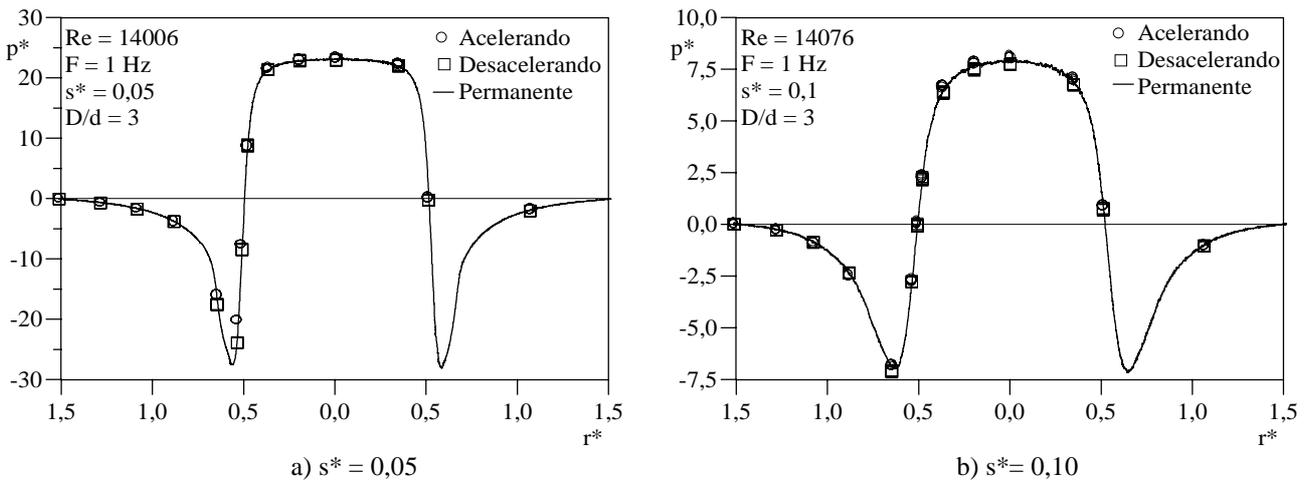


Figura 5. Distribuição de pressão sobre o disco frontal para escoamentos estacionário e pulsante:  $D/d = 3$ .

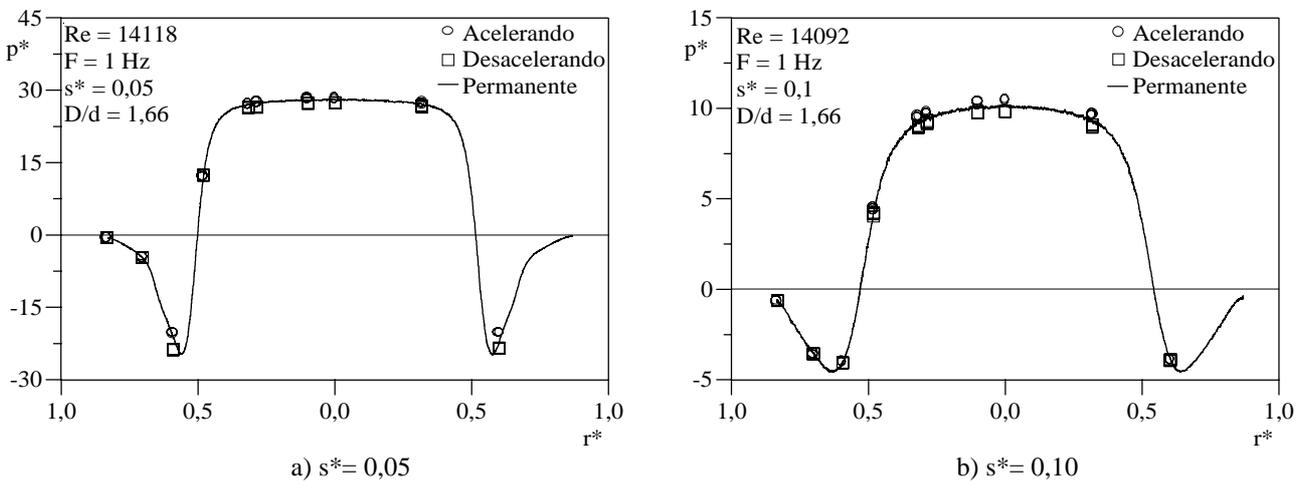


Figura 6. Distribuição de pressão sobre o disco frontal para escoamentos estacionário e pulsante:  $D/d = 1,66$ .

#### 4.2. Perfis para velocidade média e tensão de Reynolds

Nas Figs. (7) a (9), resultados experimentais de perfis de velocidade média e de tensão normal turbulenta na saída do difusor são apresentados para a relação de diâmetro  $D/d = 3$  e  $Re = 15.000$ , em três situações de afastamento ( $s^* = 0,05$ ;  $0,07$  e  $0,1$ ). Tanto a velocidade média como a tensão normal são escritas na forma adimensional com base na velocidade  $U$  no orifício de passagem. Cada perfil representa a média de sete resultados obtidos em experimentos independentes e a incerteza associada é de 3 %.

Para fins ilustrativos, são também apresentados nas figuras o perfil de velocidade teórico para escoamento laminar e o perfil para escoamento turbulento obtido numericamente. O resultado numérico foi obtido com o modelo computacional desenvolvido por Salinas-Casanova et al. (1999), baseado na metodologia dos volumes finitos e com o

emprego do modelo RNG k- $\epsilon$  (Orzag et al., 1993). Os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os dados experimentais, embora para a situação de menor afastamento ( $s^* = 0,5$ ) o nível da tensão normal turbulenta seja um pouco superestimado.

A assimetria do perfil de velocidade verificada para os afastamentos  $s^* = 0,07$  e  $0,1$  é uma consequência da separação do escoamento na entrada do difusor ( $r^* = 0,5$ ), originada por sua mudança brusca de direção. Dependendo do escoamento, a região de recirculação pode se estender até próximo da saída do difusor. Assim, o fato da assimetria ser mais evidente para o maior afastamento se deve à maior região de recirculação originada pela separação. Este aspecto pode ser observado na Fig. (10), onde resultados numéricos de linhas de corrente para  $s^* = 0,05$  e  $0,1$  demonstram os tamanhos distintos das regiões de recirculação no difusor. Deve ser também mencionado que um efeito similar poderia ser alcançado mantendo-se fixo o afastamento e aumentando o número de Reynolds.

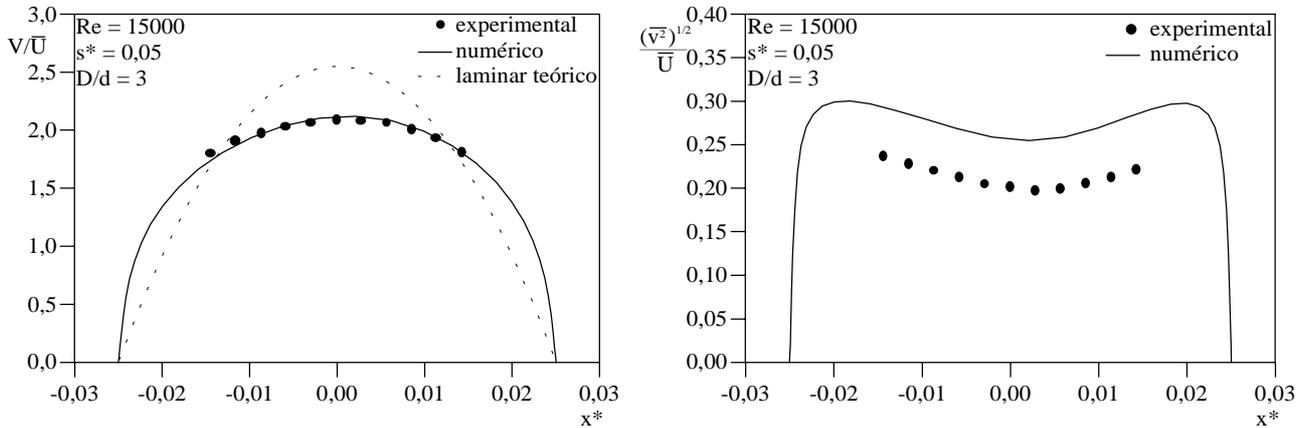


Figura 7. Perfis de velocidade média e de tensão normal turbulenta na saída do difusor:  $D/d = 3$ ;  $s^* = 0,05$ ;  $Re = 15000$ .

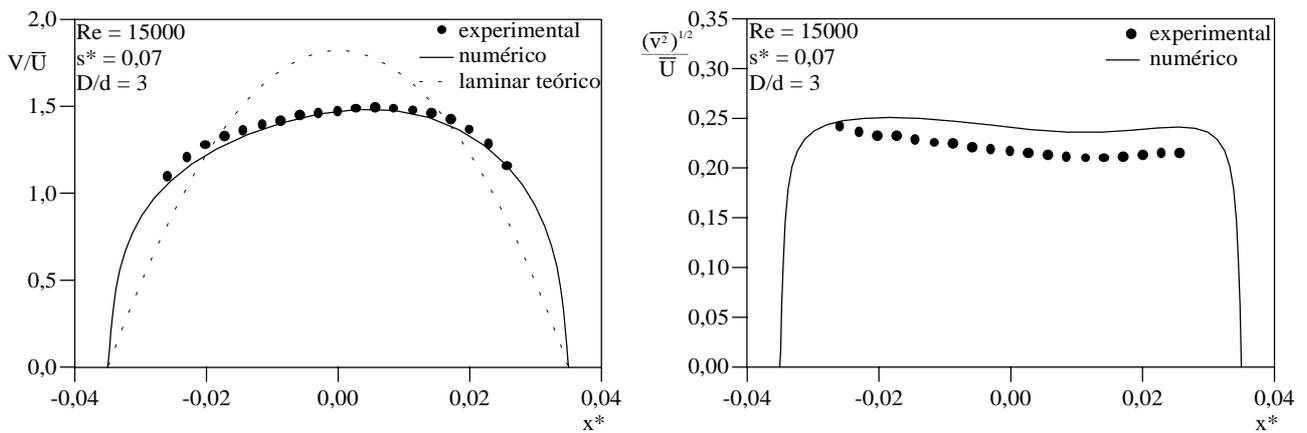


Figura 8. Perfis de velocidade média e de tensão normal turbulenta na saída do difusor:  $D/d = 3$ ;  $s^* = 0,07$ ;  $Re = 15000$ .

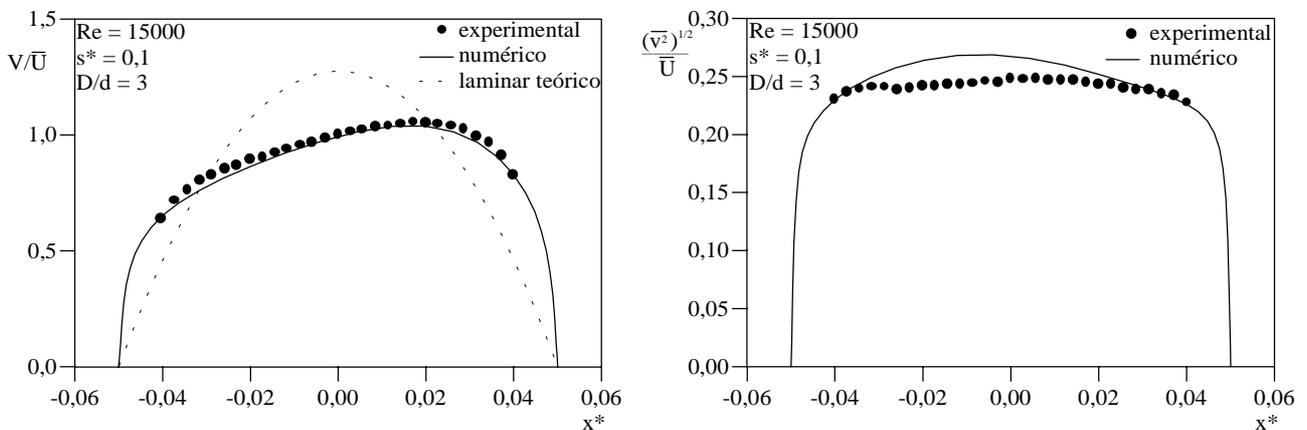


Figura 9. Perfis de velocidade média e de tensão normal turbulenta na saída do difusor:  $D/d = 3$ ;  $s^* = 0,1$ ;  $Re = 15000$ .

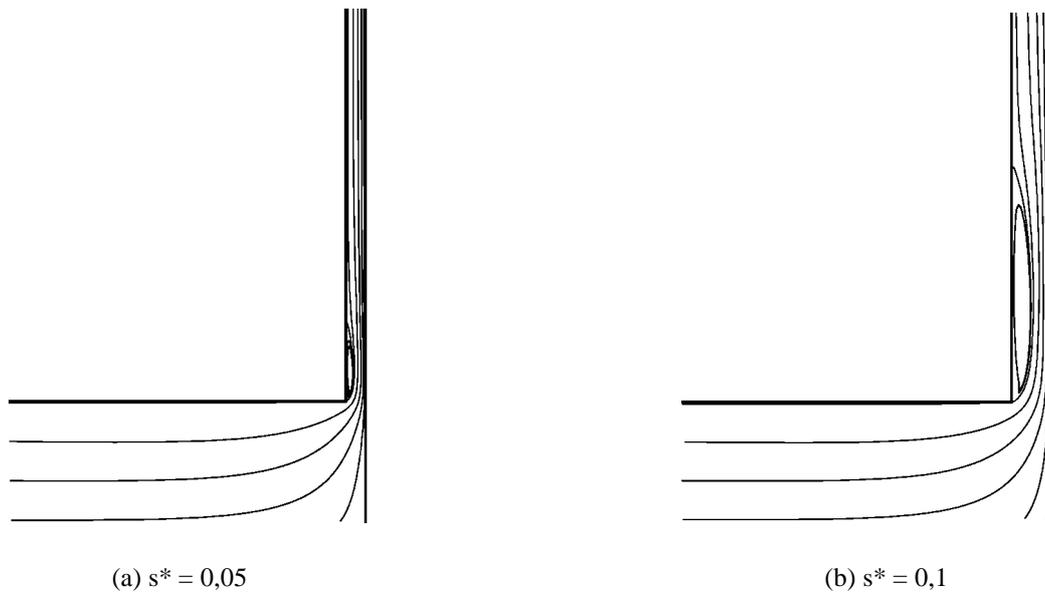


Figura 10. Linhas de corrente do escoamento e separação do escoamento no difusor;  $D/d = 3$ ;  $Re = 15000$ .

Uma evidência do processo de laminarização referenciado por Kreith (1966) pode ser observado na Fig. (11), onde perfis de velocidade e de tensão normal são apresentados para a condição de afastamento  $s^* = 0,07$  e  $Re = 5000$ . Nota-se que o perfil de velocidade média se aproxima do resultado analítico para escoamento laminar, uma característica também detectada no trabalho de Tabatabai e Pollard (1987) e Ervin et al. (1989) para combinações de vazões baixas e posições radiais suficientemente elevadas. O nível elevado da tensão normal turbulenta entre as paredes do difusor pode ser atribuído às estruturas de grande escala que persistem ao longo do difusor. Por outro lado, deve ser notado também que o ponto de máxima intensidade é deslocado para uma região mais afastada das paredes, uma evidência do aumento da camada dominada por efeitos viscosos.

Comparado com as estimativas de Kreith (1966) e Higgins (1975) para o início do processo de laminarização, o presente resultado concorda melhor com a última. De fato, a Eq. (2) indica que para as condições  $Re = 5000$  e  $s^* = 0,07$  a laminarização deveria acontecer em  $r^*$  ( $r/d$ ) igual a 1,7 enquanto que a Fig. (11) sugere este processo já na posição radial  $r^* = 1,47$ . Por outro lado, a previsão de Kreith (1966) aponta para  $r^* = 2,5$ .

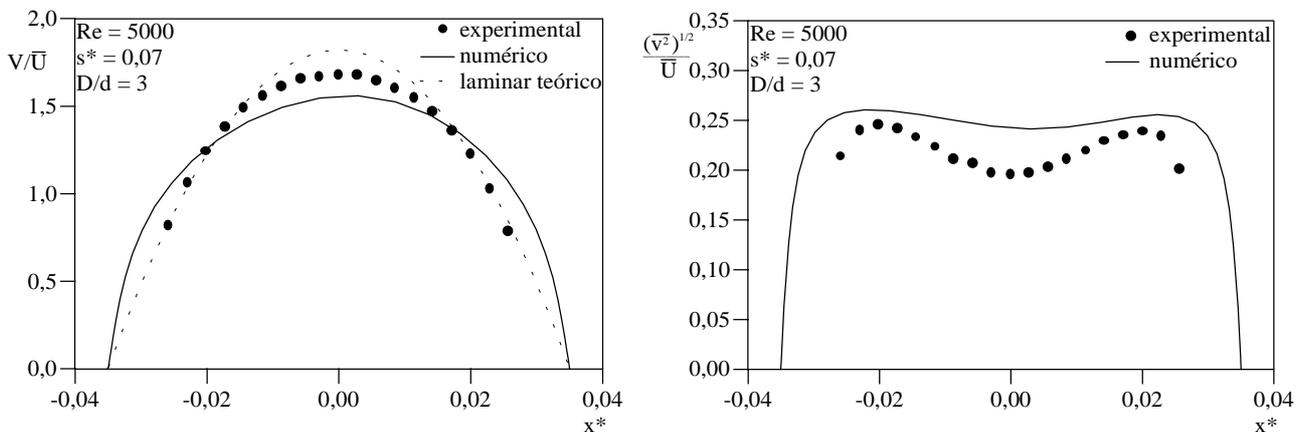


Figura 11. Perfis de velocidade média e de tensão normal turbulenta na seção de saída do difusor ( $r^* = 1,5$ );  $s/d = 0,07$  e  $Re = 5000$ .

### 5. Conclusões

O presente trabalho apresentou os resultados de uma investigação experimental do escoamento turbulento em difusores radiais. Uma bancada foi desenvolvida para a medição da distribuição de pressão sobre o disco frontal para escoamentos estacionário e pulsante. A condição de escoamento pulsante foi alcançada variando-se a vazão, com o auxílio de uma válvula proporcional, mas mantendo-se fixo o afastamento entre os discos. Comparações entre os resultados dos dois regimes de escoamento indicam que, para as condições analisadas, há um efeito muito pequeno da pulsação sobre a distribuição de pressão no disco frontal. Observou-se no entanto que este efeito aumenta com o aumento do afastamento entre os discos e a diminuição da relação de diâmetros  $D/d$ . Medições dos perfis de velocidade

média e de tensões normais turbulentas na saída do difusor foram realizadas para o escoamento estacionário. Dessas medições foi observado que o modelo de turbulência RNG k- $\epsilon$  (Orzag et al., 1993) é capaz de prever os perfis de velocidade do escoamento na saída do difusor, mesmo na presença de grandes regiões de recirculação que tornam o perfil de velocidade assimétrico. Os níveis de tensão normal turbulenta são também previstos em boa concordância com os dados experimentais. Para as situações de baixos números de Reynolds verificou-se que os efeitos viscosos passam a dominar o escoamento na saída do difusor. Isto fica demonstrado pela semelhança entre o perfil de velocidade medido e o perfil analítico de velocidade para escoamento laminar. Outro aspecto que reforça este fenômeno de laminarização é o deslocamento da região de máxima intensidade das tensões normais turbulentas para um ponto mais afastado da parede do difusor, o qual se constitui em evidência do aumento da espessura da camada dominada por efeitos viscosos junto à parede.

## 6. Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio da Empresa Brasileira de Compressores S.A. (EMBRACO) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do processo 46.8719/00-8. Os autores agradecem também a colaboração de Alberto R. Gomes e Rodrigo Kremer no levantamento dos dados experimentais.

## 7. Referências

- Bakke, E. e Kreith, F., 1969, "Inverse Transition in Radial Diffusers", ASME-AIChE Heat Transfer Conference, Minneapolis, USA, Paper 69-HT-33.
- British Standard Institution, 1989, "Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits", BS 1042., Section 1.2.
- Dantec Dynamics A/S, 1996, "StreamLine – Installation & User's Guide", Publication n° 9040U1724.
- Deschamps, C.J., Prata, A.T., Ferreira, R.T.S., 1996, "Turbulent Flow Through Reed Type Valves of Reciprocating Compressors", ASME, Int. Mech. Eng. Congress and Exhibition, Atlanta.
- Ervin, J.S., Suryanarayana, N.V., Chai Ng, H., 1989, "Radial Turbulent Flow of a Fluid Between Two Coaxial Disks", Journal of Fluids Engineering, vol. 111, pp. 378-383.
- Ferreira, R.T.S., Driessen, J.L., 1986, "Analysis of the Influence of Valve Geometric Parameters on the Effective Flow and Force Areas", 9th Purdue Int. Compressors Technology Conference, West Lafayette, USA, pp. 632-646.
- Ferreira, R.T.S., Prata, A.T., Deschamps, C.J., 1989, "Pressure Distribution Along Valve Reeds of Hermetic Compressors", Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 201-207.
- Hamrock, B.J., 1994, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", McGraw-Hill.
- Hayashi, S., Matsui, T., Ito, T., 1975, "Study of Flow and Thrust in Nozzle-Flapper Valves", ASME, Journal of Fluids Engineering, vol. 97, pp. 39-50.
- Higgins, G.B., 1975, "Some Aspects of Radial Flow Between Parallel Disks", M.Sc. Thesis, University of Witwatersrand, South Africa.
- Ishisawa, S., Watanabe, T., Takahashi, K., 1987, "Unsteady Viscous Flow Between Parallel Disks With a Time-Varying Gap Width and a Central Fluid Source", Journal of Fluids Engineering, vol. 109, pp. 394-402.
- Jackson, J.D., Symmons, G.R., 1965, "An Investigation of Laminar Radial Flow Between Two Parallel Discs", Appl. Sci. Res., Section A, vol. 15, pp. 59-75.
- Kreith, F., 1966, "Reverse Transition in Radial Source Flow Between Two Parallel Planes", Phys. Fluids, v. 8, n. 6, p. 1189-1190.
- Launder, B.E. e Sharma, B.I., 1974, "Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Lett. Heat Mass Transfer, Vol. 1, p. 131.
- National Instruments Inc., 2000, "LabView – User Manual", Part Number 320999C-01.
- Moller, P. S., 1963, "Radial Flow Without Swirl Between Parallel Discs", The Aeronautical Quarterly, pp. 163-186.
- Orzag, S.A., Yakhot, V., Flannery, W., Boysan, F., Choudhury, D., Marusewski, J., Patel, B., 1993, "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations", Near-wall Turbulent Flows. Elsevier Science Publisher.
- Piechna, J.R.; Meier, G.E.A., 1986, "Numerical Investigation of Steady and Unsteady Flow in Valve Gap", International Compressor Engineering at Purdue, West Lafayette, Indiana, USA.
- Possamai, F.C., Ferreira, R.T.S., Prata, A.T., 2001, "Pressure Distribution in Laminar Radial Flow through Inclined Disks", Int. J. Heat and Fluid Flow, v. 22, n. 4, pp. 440-449.
- Raal, J.D., 1978, "Radial Source Flow Between Parallel Disks", J. Fluid Mech., vol. 85, part 3, pp. 401-416.
- Salinas-Casanova, D.A., Deschamps, C.J., Prata, A.T.; Matos, F.F.S., 2000, "A Comparative Analysis of Turbulence Models Applied to Complex Flow", Proceedings of the 9th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Porto Alegre, RS.
- Salinas-Casanova, D.A., 2001, "Análise Numérica do Escoamento Turbulento em Válvulas Automáticas de Compressores", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Tabatabai, M., Pollard, A., 1987, "Turbulence in Radial Flow Between Parallel Disks at Medium and Low Reynolds Numbers", J. Fluid Mech., vol. 185, pp. 483-502.
- Wark, C.E.; Foss, J.F., 1984, "Forces Caused by the Radial Out-Flow Between Parallel Disks", Journal of Fluids Engineering, vol. 106, pp. 292-297.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TURBULENT FLOW THROUGH RADIAL DIFFUSER

### Luis E. M. Souto

Federal University of Santa Catarina  
Department of Mechanical Engineering  
88.040-900, Florianópolis, SC, Brazil  
[souto@nrva.ufsc.br](mailto:souto@nrva.ufsc.br)

### Cesar J. Deschamps

Federal University of Santa Catarina  
Department of Mechanical Engineering  
88.040-900, Florianópolis, SC, Brazil  
[deschamps@nrva.ufsc.br](mailto:deschamps@nrva.ufsc.br)

**Abstract.** *The work considers an experimental investigation of the turbulent flow through radial diffusers. The understanding of this class of flow is important in a number of technological applications and has attracted the interest of several researchers. Analytical solutions are restricted to idealized conditions and, therefore, numerical modeling is the most adopted technique to investigate the phenomenon. Experimental investigations are less common and usually offer only data for the resulting force (or the respective pressure distribution) on the front disk. The present work investigates the turbulent flow in radial diffuser for both stationary and transient conditions. The transient corresponds to a pulsating flow condition established through a proportional control valve, but keeping the gap between the disks fixed. Pressure distribution on the frontal disk is examined to detect any eventual effect that this pulsating flow condition might have on the flow. Results for these two flow conditions show a very small change on the pressure distribution caused by the pulsation. However, the data suggest that such effect may become significant as the gap between the disks is increased or the diameter ratio between the front disk and the feeding orifice is decreased. Experimental data for mean velocity and turbulent normal stress are obtained for the exit cross section of the diffuser and indicate a laminarization process along the diffuser walls.*

**Keywords.** *radial diffuser, turbulent flow, automatic valves, compressor valves*