

ESTUDO NUMÉRICO DE ESCOAMENTOS EM TUBOS CIRCULARES COM INSERÇÃO DE UMA FITA HELICOIDAL

Pedro Paulo Silva de Almeida, almeidappsa@gmail.com¹

José Leandro Cardoso Rivera Vila, jl.vila@hotmail.com¹

Tiago de Melo, tiago.melo@udf.edu.br¹

¹Centro Universitario do Distrito Federal – UDF, SEP/SUL EQ704 / 904 Conj.A – Brasília / DF - CEP 70390-045

Resumo: O escoamento turbulento em tubos circulares com inserção de dispositivos geradores de vórtices, tem sido amplamente estudado ao longo dos anos, devido a sua capacidade de reproduzir os fenômenos no escoamento presentes em projetos complexos de engenharia, tais como os vórtices helicoidais presentes no duto de sucção de turbinas hidráulicas. O objetivo desta pesquisa é investigar a formação e o desenvolvimento de vórtices em um tubo circular com a inserção de uma fita com geometria helicoidal. Para isso foram realizados estudos numéricos e experimentais, onde o procedimento numérico foi realizado utilizando software Ansys CFX 18.1, aplicando o modelo de turbulência $K-\omega$ SST, desenvolvido para simulações de escoamentos com gradiente adverso de pressão e descolamento da camada limite; os fatores geométricos da fita foram variados, de modo a investigar os mecanismos de formação do vórtice helicoidal, partindo do princípio de vortex breakdown. A investigação experimental dos vórtices foi conduzida com a injeção de ar comprimido, com fitas helicoidais fabricadas por impressão 3D, com os mesmos parâmetros da simulação numérica. Os vórtices helicoidais são estáveis, possuindo um movimento de rotação em relação ao centro do tubo com comprimento de onda constante, na extensão da seção de teste de visualização, diferente dos escoamentos turbulentos em tubos circulares sem a inserção do dispositivo helicoidal em que a zona de baixa pressão é localizada no centro do escoamento, no escoamento estudado a região de baixa pressão esta contida no núcleo dos vórtices helicoidais.

Palavras-chave: Fita Helicoidal, Vórtices helicoidais, Vortex Breakdown.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento turbulento em canais circulares com inserção de dispositivos geradores de rotação tem sido amplamente estudado ao longo dos anos, visto que a grande parte das aplicações práticas, nas mais diversas áreas da engenharia tem que lidar com escoamentos turbulentos (Chen et al. 2015; Junior, 2015 e Liu e Bai, 2015). Segundo Silveira (2002), os escoamentos turbulentos são altamente rotacionais.

O número rotacional (swirl number) é um parâmetro adimensional calculado para quantificar a intensidade de giro do escoamento, definido pela razão entre momento angular e o momento linear do escoamento, Foroutan e Yavuzkurt (2014). Os escoamentos rotacionais são os principais vetores de atuação em inúmeras aplicações na indústria, em turbinas hidráulicas para a geração de energia elétrica e na otimização de sistemas de combustão e trocadores de calor, por exemplo, o que os torna um importante objeto de estudo na engenharia, Silva (2013).

Dependendo das condições de operação, instabilidades hidrodinâmicas podem ocorrer em sistemas que possuem o escoamento rotativo como fluido de trabalho, tais como os vórtices helicoidais formados à saída de uma turbina hidroelétrica (Ribeiro, 2007 e Susan-Resiga et al. 2006). Segundo Angulo (2016) esse fenômeno ocorre à jusante do rotor da turbina e estende-se ao longo do tubo de sucção, possuindo movimento de rotação em torno de seu eixo de centro. O vórtice helicoidal excita o tubo de sucção em baixa frequência, Almeida (1999), e promove flutuações de pressão, Tian et al. (2006), provocando falhas estruturais e mecânicas nos componentes da hidroelétrica.

Coelho e Junior (2006) no estudo numérico da influência da rotação do escoamento (swirl) em difusores, verificaram que em baixa intensidade de giro o escoamento tem a tendência de se descolar da parede do difusor, por outro lado, com alta intensidade de giro um ponto de estagnação no centro do escoamento é criado e é seguido de uma zona de recirculação que age como bloqueio, que é chamado de vortex breakdown, Foroutan e Yavuzkurt (2014).

Silva (2013) realizou um estudo do escoamento altamente rotacional do sistema gerador de fluxo de um combustor *Lean Premixed Prevaporized*. Este escoamento é obtido por meio de um gerador de vórtices denominado, *swirler*, uma expansão abrupta da base do escoamento rotativo à entrada do combustor e a amplificação das instabilidades hidrodinâmicas provocada pela força centrífuga dá origem a um vórtice colapsado, cuja linha de centro apresenta uma zona de recirculação, Jochmann (2006). Esse vórtice possui uma geometria helicoidal e estrutura global estável, Cala et al. (2006).

Cazan e Aidun (2009) desenvolveram um estudo experimental de um escoamento rotacional induzido por uma fita torcida de 180° em um tubo circular. Na investigação do escoamento utilizando um aparato experimental e a técnica de *velocimetria Laser Doppler*, verificaram o desenvolvimento de um escoamento secundário composto por dois vórtices helicoidais, que possuem um movimento de rotação em torno do eixo central do tubo no mesmo sentido do escoamento principal.

O *vortex breakdown* é definido pelos clássicos (Althaus et al. 1995 e Sarpkaya. 1971), como uma mudança abrupta no núcleo do escoamento rotacional, e sua ocorrência advém de número de *swirl* elevado ou gradiente adverso de pressão, Cazan (2010). O vórtice helicoidal de dupla hélice foi observado pela primeira vez em procedimentos experimentais por Sarpkaya (1971), após apresentar inúmeras visualizações de *vortex breakdown* com injeção de tinta na água. Contudo, após quase cinquenta anos de investigação os pesquisadores e cientistas não obtiveram um consenso do processo de formação do *vortex breakdown*, Snyder e Spall. (2000).

A importância e complexidade de escoamentos rotacionais vêm sendo alvo de diversas pesquisas, uma revisão completa sobre a complexidade de estudo de escoamentos rotacionais e *vortex breakdown* pode ser encontrada em Lucca-Negro e O'doherty (2001). Contudo, todos os autores concordam que a presença de vórtices helicoidais em *vortex breakdown* é proveniente da amplificação das instabilidades hidrodinâmicas pelas forças centrífugas no escoamento rotacional (Sarpkaya, 1971; Escudier, 1988 e Leibovich, 1978).

A presente pesquisa visa o estudo de escoamentos em tubos circulares com inserção de uma fita torcida, assim como os vórtices helicoidais envolvidos. Primeiramente é realizado um estudo experimental, para tal, foi confeccionada uma seção de teste que permite o acesso óptico do escoamento, com o intuito de visualizar a formação do vórtice helicoidal conforme realizado por Cazan (2010). Posteriormente, é realizada a simulação numérica do escoamento e se analisa o número de *swirl* e o gradiente adverso de pressão, por estes serem os parâmetros relevantes para o mecanismo de formação do vórtice helicoidal, partindo do princípio do *vortex breakdown*.

A técnica empregada para modelar a turbulência será RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), uma vez que essa metodologia tem demonstrado excelentes resultados na investigação de escoamentos turbulentos, Coelho (2006). O modelo de turbulência selecionado foi o $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), desenvolvido por Menter et al. (1994), para simulações de escoamentos com gradiente adverso de pressão e descolamento da camada limite.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A configuração experimental é projetada para permitir a investigação do mecanismo de formação e desenvolvimento do vórtice helicoidal no escoamento à jusante da fita torcida em um tubo circular. A seção de teste é constituída por uma fita helicoidal, um tubo de visualização e um sistema de injeção de partículas de ar, ver Fig. 1.

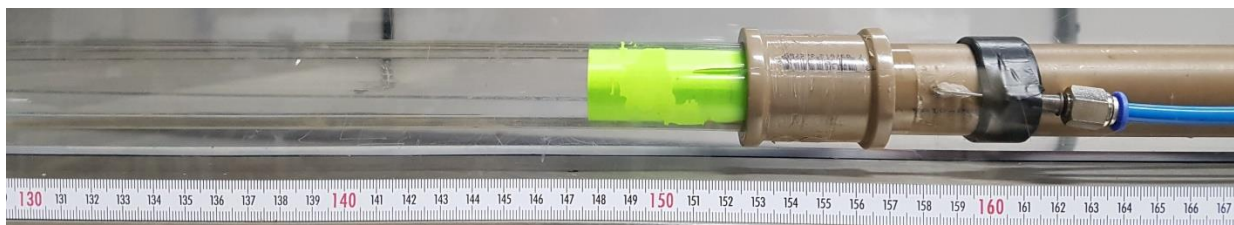


Figura 1. Seção de teste de visualização.

As fitas torcidas utilizadas no experimento tem comprimento (H) de 52.00 mm, com ângulos de entrada de 160° e 180° e relação de torção (γ) 2,00. As fitas torcidas foram fabricadas por impressão 3D com material PLA.

O tubo de visualização conforme apresentado na Fig. 1, é confeccionado a partir de um tubo de acrílico de 26 mm de diâmetro interno (D_i), o que permite o acesso óptico do escoamento à jusante da fita torcida. A seção de visualização possui um comprimento (Z) de $10D_i$, pois neste comprimento o vórtice helicoidal se mantém constante, Cazan (2010). A fita e o tubo formam um único componente, de modo que o diâmetro externo da fita é igual o diâmetro interno do tubo.

A visualização do escoamento secundário é conduzida com a injeção de ar comprimido no escoamento principal. O sistema de injeção de ar comprimido é composto por duas agulhas de 0.70 mm de diâmetro e 30.00 mm de extensão, acopladas por uma mangueira de 6 mm de diâmetro a um regulador de pressão, que possibilita regular e mensurar a pressão do ar.

A seção de teste de visualização, apresentada na Fig. 1, é acoplada a uma bancada hidráulica. O equipamento é formado por duas bombas centrífugas de 0.70 kw com vazão máxima de $5.40 \text{ m}^3/\text{h}$, um rotâmetro que possui um faixa de medição de 0.40 a $4.00 \text{ m}^3/\text{h}$, e um registro globo para regulagem do fluxo. O procedimento experimental foi desenvolvido para fitas helicoidais com relação de torção (γ) 2.00 e ângulo de entrada de 160° e 180° ; experimentando vazão de 2.00 e $4.00 \text{ m}^3/\text{h}$, os Números de Reynolds correspondentes são 2.72×10^4 , 4.08×10^4 e 5.45×10^4 respectivamente. Na injeção de ar comprimido no escoamento, para visualização dos vórtices helicoidais, a pressão utilizada não pôde ser mensurada devido à baixa resolução do monômetro, 0.25 bar, instalado no regulador. O fluido de

trabalho utilizado é água à temperatura ambiente, 25 ° C, sendo as condições de escoamento isotérmico, incompressível, regime permanente e viscosidade cinemática (ν) $1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3. EQUAÇÕES GOVERNANTES E MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

As equações médias de Reynolds, também denominadas RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), constituem a base matemática para dinâmica dos fluidos computacionais e, portanto, fazem parte da maioria dos programas computacionais para resolução de problemas de escoamentos turbulentos, Moller e Silvestrini (2004).

Do ponto de vista matemático, as equações governantes de um escoamento turbulento, para o caso de fluidos incompressíveis de massa específica constante, são as equações de continuidade e de conservação do movimento, que são apresentadas na forma média na Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho (\bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_k} \rho (\bar{u}_j \bar{u}_k) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \rho \left(\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \right) \right) \quad (2)$$

Onde u_i representa as componentes de velocidade, ρ é a massa específica, p é a pressão, τ_{ij} é o tensor de tensões viscosas e ν_t é a viscosidade turbulenta, que será modelada aplicando o modelo de turbulência $k - \omega$ SST.

Esse modelo de turbulência foi desenvolvido por Menter et al. (1994), para simulações de escoamentos aerodinâmicos com gradiente adverso de pressão e descolamento da camada limite, utilizando as melhores vantagens dos modelos $k - \epsilon$ e $k - \omega$. O modelo $k - \omega$ SST combina a formulação robusta e precisa do modelo $k - \omega$ para solução da camada limite fluido dinâmica, com as vantagens do modelo $k - \epsilon$, ao resolver escoamentos livres, para o qual o modelo $k - \epsilon$ é escrito em termos de ω , Rezende (2009). Para que o método desse modelo funcione, o modelo $k - \epsilon$ é multiplicado por uma função de mistura e adicionado ao modelo $k - \omega$ também multiplicado por uma função de mistura Coelho (2006). As equações de transporte da energia cinética turbulenta k e da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta ω são determinadas na Eq. (3) e Eq.(5), respectivamente.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho k \omega, \quad (3)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica, μ_t é a viscosidade dinâmica turbulenta, k é a energia cinética turbulenta e P_k é a produção da energia cinética turbulenta definida pela Eq. (4). As outras variáveis são constantes oriundas dos modelos $k - \epsilon$ e $k - \omega$ com alguns ajustes e são determinadas como: $\beta^*=0.09$, $\alpha_1=5/9$, $\beta_1=3/40$, $\sigma_{k1}=0.85$, $\sigma_{\omega1}=0.5$, $\alpha_2=0.44$, $\beta_2=0.0828$, $\sigma_{k2}=1$ e $\sigma_{\omega2}=0.856$, Menter et al. (2003).

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow P_k = \min \left(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega \right) \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \sigma_{\omega} \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

Onde S é o modulo do tensor taxa de deformação e F_1 é a função de mistura definida pela Eq. (6).

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (6)$$

Onde y é a distância da superfície de não deslizamento, ν é a viscosidade cinemática e $CD_{k\omega}$ é definido pela Eq. (7). A função de combinação F_1 , Eq. (6), adota valor de 1 em regiões próximas à parede (utiliza o modelo $k - \omega$), e o valor 0, quando se analisa regiões afastadas da parede (nesse caso, faz uso do modelo $k - \epsilon$), Angulo (2016).

$$CD_{\kappa\omega} = \max\left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad (7)$$

A definição da viscosidade turbulenta ν_t , Eq. (8), apresenta um tratamento melhor para o transporte das tensões de Reynolds em camada limite sujeita ao gradiente adverso de pressão.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (8)$$

Onde F_2 é função de combinação para a viscosidade turbulenta, definida pela Eq. (9).

$$F_2 = \tanh\left\{\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)^2\right]\right\} \quad (9)$$

O número rotacional, *swirl*, é um valor adimensional que expressa a relação do momento axial com o momento tangencial do escoamento ao redor do seu eixo axial de deslocamento. Definido pela Eq. (10).

$$S = \frac{\int_0^R u w r^2 \cdot dr}{R \int_0^R u^2 r \cdot dr} \quad (10)$$

Onde w é a velocidade tangencial, u é a velocidade média axial, r é o raio no ponto em que a velocidade tangencial é calculada e R é o raio do tubo.

4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O domínio computacional é compreendido pelo tubo circular equipado com a fita helicoidal, Figura 2, e por um prolongamento da parte final. O prolongamento da seção de teste é realizado para que os resultados numéricos não fiquem susceptíveis às condições de contorno, dos Santos et al. (2007).



Figura 3. Domínio computacional das seções de teste.

A estratégia da dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), para solução de problemas de mecânica dos fluidos, é substituir o domínio contínuo do problema por um domínio discreto usando uma malha, Fox et al. (2012). A malha é gerada a partir das superfícies que compreendem o volume de controle, os pontos que constituem a malha são os responsáveis pela armazenagem de todas as propriedades dos fluidos e as soluções das variáveis. O número de elementos do domínio discreto para cada uma das seções de teste investigadas é apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Elementos de malha das seções de teste.

Seção de teste	Fita helicoidal $y = 2.00$	Fita helicoidal $y = 4.00$
Número de Elementos	1712011	1702838
Número de Nós	489568	481164
Tipo de malha	Tetraedro	Tetraedro

Para definir o tamanho do elemento mais próximo da parede são considerados os valores de y^+ , recomendados para o modelo $k-\omega$ SST. O primeiro elemento de malha deve ter um tamanho de forma que seja compreendido na região da camada limite. Para o presente trabalho foi realizado um refinamento da malha nas regiões próximas da parede do tubo,

de modo que o tamanho máximo permitido para os elementos próximo a parede sejam de 0.01 mm. Para a realização desse refinamento, utiliza-se do recurso de inflação que consiste em posicionar camadas de elementos prismáticos, na região próxima a parede do tubo, Fig. 4.

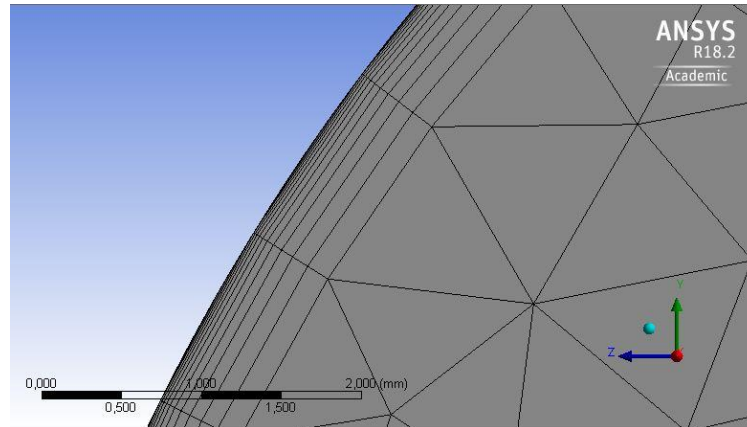


Figura 4. Configuração da malha próxima à parede do tubo.

Para realização da simulação numérica foi utilizado o software ANSYS-CFX 18.1, que resolve as equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) em combinação com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST para fechar o sistema de equações.

Na superfície de entrada a condição de contorno estabelecida é a velocidade axial média (u), Eq. 11, com um nível de intensidade de turbulência de 5%. A condição de contorno na superfície de saída foi imposta através da pressão, onde se fixa a pressão relativa como sendo nula, assim, a pressão de saída do tubo será a pressão atmosférica, Coelho e Junior (2006). Na parede, aplica-se a condição de não deslizamento. Os resultados numéricos são validados através da comparação com os resultados experimentais.

$$u = \frac{Re \nu}{D_i} \quad (11)$$

Onde Re é o número de Reynolds e D_i é o diâmetro interno do tubo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As visualizações foram conduzidas em escoamentos turbulentos induzidos por inserção de uma fita helicoidal com relação de torção (y) 2.00, calculado conforme definido pela Eq. (12). Variando a vazão de 2.00, 3.00 e 4.00 m³/h, com os números de Reynolds correspondentes 2.72×10^4 , 4.08×10^4 e 5.45×10^4 , respectivamente. Com a injeção de ar no escoamento foi possível perceber o surgimento dos vórtices helicoidais no escoamento a jusante do dispositivo. A investigação permitiu verificar que os vórtices helicoidais possuem um movimento de rotação em torno do centro do tubo com passo constante na extensão da seção de teste, $10D_i$.

$$y = \frac{H}{D_i} \quad (12)$$

As Figuras (4-6) apresentam os resultados experimentais obtidos com a injeção de ar no escoamento para a fita helicoidal com $y = 2$ para os diferentes números de Reynolds. Foi verificado na visualização na seção de teste que o passo dos vórtices helicoidais independe do número de Reynolds (no intervalo estudado). As bolhas de ar injetadas no escoamento seguem trajetórias helicoidais estáveis que não se alteram ao longo da seção de teste de visualização.

O escoamento rotacional induzido pelo dispositivo de forma helicoidal é um escoamento rotacional do tipo curvo, de acordo com Chen et al. (2015), estes escoamentos tendem a ser escoamentos de rotação contínua.



Figura 4. Visualização dos vórtices helicoidais induzido pela fita torcida $y = 2$ com $Re = 2.72 \times 10^4$.



Figura 5. Visualização dos vórtices helicoidais induzido pela fita torcida $y = 2$ com $Re = 4.08 \times 10^4$.



Figura 6. Visualização dos vórtices helicoidais induzido pela fita torcida $y = 2$ com $Re = 5.45 \times 10^4$.

As visualizações conduzidas com fita torcida $y = 2$, com ângulo de entrada de 160° variando o número de Reynolds apresenta a formação de apenas um vórtice helicoidal, esse fenômeno ocorre devido à angulação de entrada da fita torcida que proporciona o desenvolvimento de um vórtice mais forte que suprime o segundo, Figs. (7-9). Esta estrutura apresenta características semelhantes aos vórtices verificados por (Goyal et al. 2017 e Goyal e Gandhi, 2018) à jusante do rotor de turbinas hidráulicas, forma helicoidal e baixa pressão no núcleo.

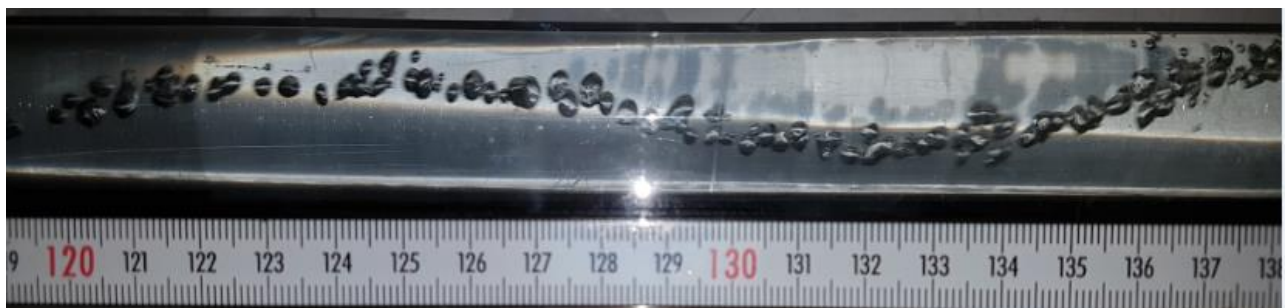


Figura 7. Vórtice helicoidal induzido pela fita torcida $y = 2$ e ângulo de entrada 160° com $Re = 2.72 \times 10^4$.

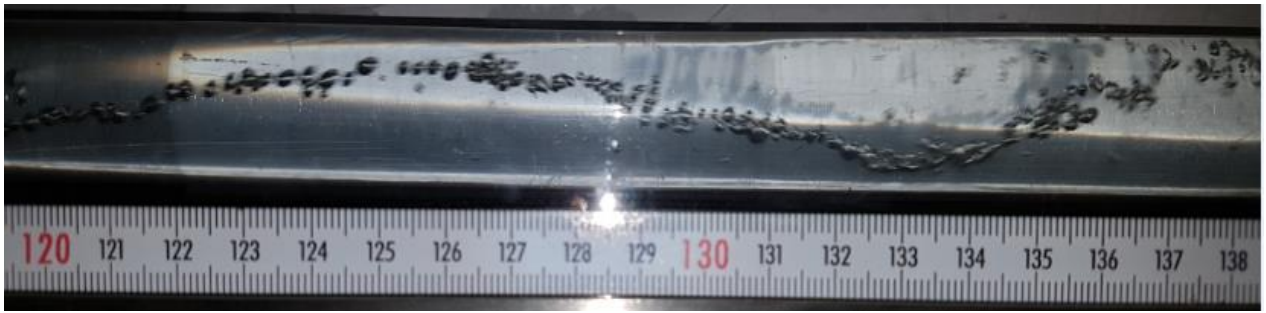


Figura 8. Vórtice helicoidal induzido pela fita torcida $y = 2$ e ângulo de entrada 160° com $Re = 4.08 \times 10^4$.

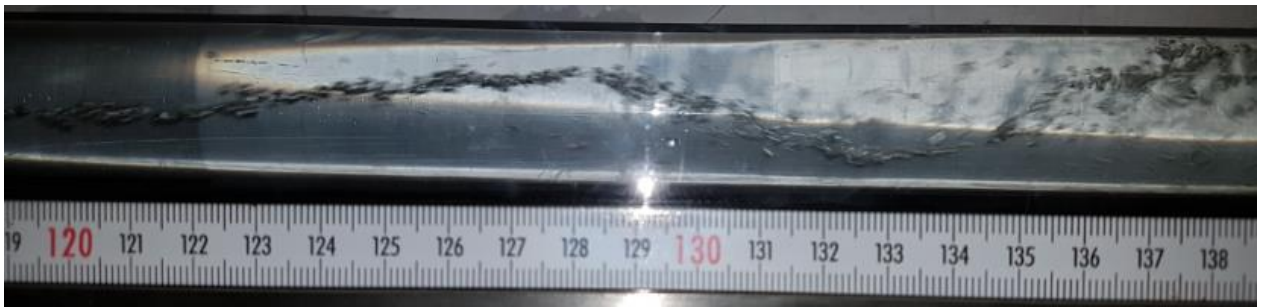


Figura 8. Vórtice helicoidal induzido pela fita torcida $y = 2$ e ângulo de entrada 160° com $Re = 5.45 \times 10^4$.

A estabilidade dos vórtices helicoidais ao longo da seção de teste, assim como apresentado nas visualizações experimentais, sugere que os gradientes de pressão transversais sucessivos são similares, apresentando um movimento angular um em relação ao outro, conforme apresentado na Fig. 12. De acordo com os resultados obtidos para as fitas torcidas com relação de torção $y = 2$ e $y = 4$, por meio da simulação numérica é possível verificar que o comprimento do passo do vórtice helicoidal está diretamente relacionado à proporção de torção das fitas, ver Figs. 10 e 11.

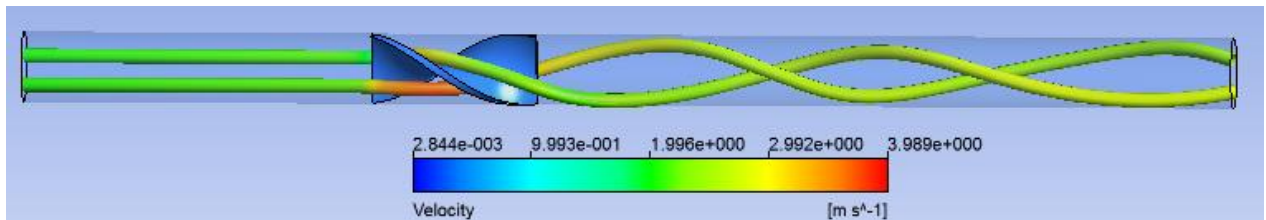


Figura 10. Vórtice helicoidal induzido pela fita torcida $y = 2$ com $u = 2.09$ m/s.

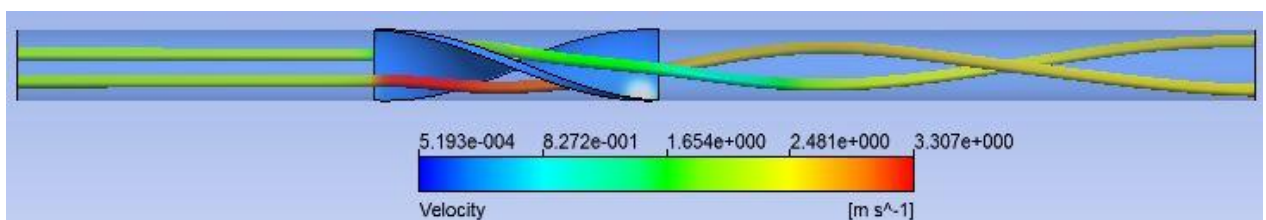


Figura 11. Vórtice helicoidal induzido pela fita torcida $y = 4$ com $u = 2.09$ m/s.

Diferente dos escoamentos turbulentos em tubos circulares em que a região de baixa pressão está localizada no centro do tubo, o escoamento em tubos circulares com inserção do dispositivo helicoidal a região de baixa pressão está contida no núcleo dos vórtices helicoidais; conforme verificado no procedimento experimental por meio do escoamento secundário de bolhas de ar. Esse fenômeno também pode ser observado analisando o contorno de pressão da seção transversal do escoamento, obtidos por simulação numérica utilizando a fita com $y = 2.00$ e ângulo de entrada 180° experimentando $u = 2.09$ m/s, os vórtices helicoidais são identificados por zonas de baixa pressão que são equivalentes ao escoamento secundário de bolhas de ar observado no procedimento experimental. É possível observar na evolução das imagens referentes às posições $2D_i$, $3D_i$, $4D_i$ e $5D_i$, respectivamente a rotação dos vórtices helicoidais em relação ao centro do tubo.

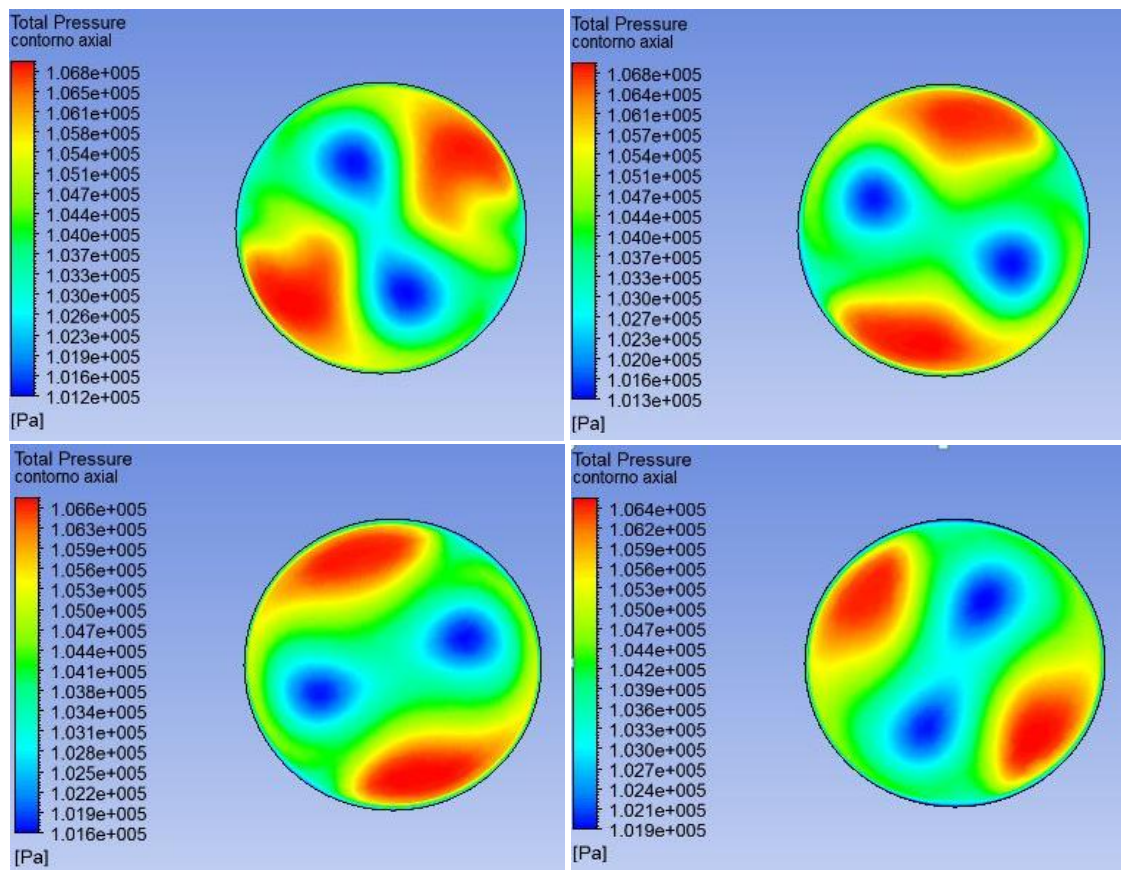


Figura 12. Contorno de pressão, região de baixa pressão referente aos vórtices helicoidais.

A redução da intensidade de swirl é limitada na extensão da seção de teste de visualização. Contudo, conforme verificado por Liu e Bai (2015), a intensidade rotacional do escoamento a jusante do dispositivo helicoidal decai para 10% a 20% de sua intensidade inicial em um comprimento de $50D_i$. A Fig. 13 apresenta o gráfico de intensidade de swirl em função do número de Reynolds, para a fita torcida $y = 2$ com $Re_1 = 2.72 \times 10^4$, $Re_2 = 4.08 \times 10^4$ e $Re_3 = 5.45 \times 10^4$. Por meio do gráfico foi verificado que a intensidade de swirl possui uma tendência de aumentar à medida que o número de Reynolds aumenta.

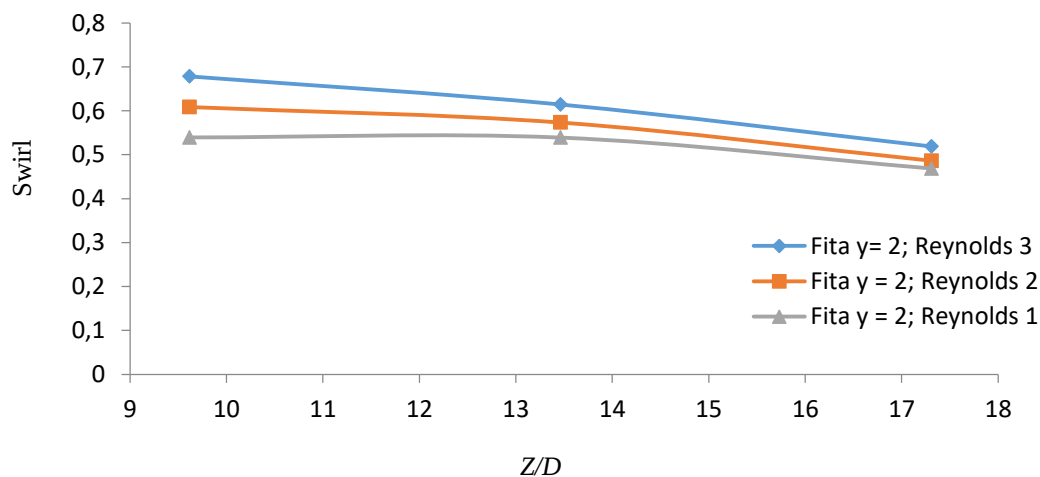


Figura 13. Gráfico de intensidade de swirl em função do comprimento da seção de teste.

6. CONCLUSÃO

Diante dos atuais métodos existentes para introduzir vórtices em escoamentos em tubos, foi selecionado uma fita helicoidal, devido à eficiência dessa geometria na geração de vórtices helicoidais, de forma a investigar a formação e desenvolvimento dessa estrutura em escoamentos turbulentos. Visto que a investigação dos vórtices helicoidais é um

fator importante para compreender a dinâmica dos vórtices presentes no tubo de sucção de turbinas hidráulicas, assim como, o vortex breakdown.

Os resultados experimentais evidenciam a capacidade do dispositivo helicoidal de reproduzir em laboratório o fenômeno hidrodinâmico, vórtice helicoidal (vórtice de núcleo). Por meio das visualizações foi possível verificar que o vórtice helicoidal induzido pela fita torcida é estável, diferente dos vórtices provenientes do vortex breakdown, possuindo um movimento de rotação em relação ao eixo do tubo no mesmo sentido do fluxo principal.

A alteração dos parâmetros geométricos, ângulo de entrada e relação de torção, proporciona modificações na forma do vórtice helicoidal, com isso conclui-se que a forma dos vórtices helicoidais induzidos por fitas torcidas são muito sensíveis aos parâmetros geométricos deste dispositivo. Por outro lado, a variação do número de Reynolds, no intervalo estudado, não promove transformações significativas na estrutura do vórtice helicoidal.

De acordo com o estudo do vórtice helicoidal realizado, observa-se que a investigação deste fenômeno hidrodinâmico deve ser realizada com ênfase no dispositivo de geração, pois assim como no vortex breakdown a formação do vórtice helicoidal se mostra muito sensível ao dispositivo de geração. Dessa forma a investigação dos mecanismos de formação do vórtice helicoidal presentes no tubo de sucção de turbinas hidráulicas deve ser realizada nas condições de operação do equipamento.

7. REFERÊNCIAS

- Angulo, T. M. A., 2016, “Obtenção das Características de Desempenho de Turbinas Francis e Parametrização do Tubo de Sucção Utilizando Técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional”, Msc. Thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2016.
- Althaus W., Brucker C. and Weimer M., 1995, “Breakdown of Slender Vortices”, in Green S.I. editor, *Fluid Vortices – Fluid Mechanics and its Applications*, Vol. 30, Dordrecht: Kluwer Academic, pp. 373-426 (ISBN 0-7923-3376-4).
- Cala, C. E. et al., 2006, “Coherent structures in unsteady swirling jet flow”, *Experiments in Fluids*, v. 40, n. 2, p. 267-276.
- Cazan, R. and Aidun, C. K., 2009, “Experimental investigation of the swirling flow and the helical vortices induced by a twisted tape inside a circular pipe”, *Physics of Fluids*, v. 21, n. 3, p. 037102.
- Cazan, R., 2010, “Dynamics of Swirling Flows Induced by Twisted Tapes in Circular Pipes”, Grad. Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Chen, B. Ho, K. Qin, F. G. Jiang, R. Abakr, Y. A. and Chan, A., 2015, “Validation and visualization of decaying vortex flow in an annulus”, *Energy Procedia*, v. 75, p. 3098-3104.
- Coelho, J. G., 2006, “Estudo numérico de tubos de sucção de turbinas hidráulicas tipo bulbo”.
- Coelho, J. G. e Junior, A. C. B., 2006, “Simulação Numérica da Influência do Swirl no Escoamento em Difusores”.
- DE ALMEIDA, M. T., “Estudo da Variação de Pressão e da Vibração no Tubo de Sucção de Turbinas Francis Induzidas por Vórtices–Método Simplificado” Márcio Tadeu de Almeida Alexandre Augusto Simões.
- Dos Santos, C. C. B. Coelho, J. G. e Junior, A. C. B., 2007, “Estudo Numérico de Turbinas Hidráulicas Tipo Bulbo”.
- Escudier M.P., 1988, “Vortex Breakdown: Observations and Explanations”, *Progress in Aerospace Science*, v. 25, p. 189-229.
- Foroutan, H. and Yavukurt, S., 2014, “A partially-averaged Navier–Stokes model for the simulation of turbulent swirling flow with vortex breakdown”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 50, 402-416.
- Fox, R. w. Pritchard, P. J. e McDonald, A. T., 2012, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, LTC, Brasil, 7ª edição.
- Jochmann, P. et al., 2006, “Numerical simulation of a precessing vortex breakdown”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 27, n. 2, p. 192-203.
- Goyal, R. and Gandhi, B. K., 2018, “Review of hydrodynamics instabilities in Francis turbine during off-design and transient operations”, *Renewable Energy*, v. 116, p. 697-709.
- Goyal, R. Gandhi, B. K. and Cervantes, M. J., 2017, “PIV measurements in Francis turbine—A review and application to transient operations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Junior, S. e Renato, B., (2015), “Estudo experimental comparativo da queda de pressão em um tubo liso com e sem direcionador espiral em uma bancada hidráulica”.
- Leibovich S., 1978, “The Structure of Vortex Breakdown”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 10, p. 22-246.
- Liu, W. and Bai, B., 2015, “A Numerical Study on Helical Vortices Induced by a Short Twisted Tape in a Circular Pipe”, *Case Studies in Thermal Engineering* 5, Xi'an, China, p.134-142.
- Liu, W. and Bai, B., 2015, “Swirl decay in the gas–liquid two-phase swirling flow inside a circular straight pipe”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 68, p. 187-195.
- Lucca-Negro, O. and O'dherty, T., 2001, “Vortex breakdown: a review”, *Progress in energy and combustion science*, v. 27, n. 4, p. 431-481.
- Menter F. R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, *AIAA Journal* v. 32, p. 1598-1605.
- Menter F. R. Kuntz M. and Langtry R., 2003, “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulent Model”, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, v.4.
- Moller, S. V. e Silvestrini, J. H., 2004. “Turbulência, Fundamentos”, v. 4.
- Rezende L. T. A., 2009, “Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada”, tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.

- Ribeiro, J. P., 2007, “Uma investigação de grandezas hidrodinâmicas no tubo de sucção de turbinas com rotor Francis operando em cargas variáveis”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá.
- Sarpkaya T., 1971, “On Stationary and Travelling Vortex Breakdowns”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 45, p. 545-559.
- Silva, L. I. D. C., 2013, “Caracterização do escoamento isotérmico com elevada rotação gerado em um combustor do tipo LPP”.
- Silveira N. A., 2002, “Fundamentos da turbulência nos fluidos”, *Turbulência*, v. 1, p. 3-48.
- Snyder, D. O. and SPALL, R. E., 2000, “Numerical simulation of bubble-type vortex breakdown within a tube-and-vane apparatus”, *Physics of Fluids*, v. 12, n. 3, p. 603-608.
- Susan-Resiga, R. et al., 2006, “Jet control of the draft tube vortex rope in Francis turbines at partial discharge”, In: *Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems*, p. 17-21.
- Tian, Y. Wang, Z. and Zhou, L., 2006, “Numerical Simulation of Vortex Cavitation in Draft tube”, *International Association on Hydraulic Research Symposium, IAHR 2006*, Yokohama, Japan.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERIC STUDY OF THE FLOW IN CIRCULAR CHANNELS WITH THE INSERTION OF A HELICOIDAL TAPE

Pedro Paulo Silva de Almeida, almeidappsa@gmail.com¹
José Leandro Cardoso Rivera Vila, jl.vila@hotmail.com¹
Tiago de Melo, tiago.melo@udf.edu.br¹

¹Centro Universitario do Distrito Federal – UDF, SEP/SUL EQ704 / 904 Conj.A – Brasília / DF - CEP 70390-045

Abstract. *The turbulent flow in circular channels with the insertion of vortex generator devices, have been widely studied through the years due its capacity of reproducing the flow phenomena of complex engineering projects, such as the helicoidal vortices present in the draft tubes of hydraulic turbines. The objective of this research is to investigate the formation and the development of a helicoidal vortex in a circular tube with the insertion of a twisted tape. For this, numeric and experimental studies were conducted, where the numeric procedure was realized on Ansys CFX 18.1, applying the turbulence model K- ω SST, developed for flow simulations with an adverse gradient of pressure and the detachment of the boundary layer, varying the geometric factors of the tape with an attack, in a way to investigate the helicoidal vortex formation mechanisms, by the principle of the vortex breakdown. The study of the vortices was conducted with the injection of compressed air, with 3D printed twisted tapes, with the same parameters of the numeric simulations. The helicoidal vortices are stable, having a rotational aspect in relation to the center of the channel with a constant wavelength in the extension of the visualization test section, different from the turbulent flows in circular tubes without this twisted tape insertion, where the low pressure zone is located at the center of the flow; in the studied flow the low pressure region is located at the nucleus of the helicoidal vortices.*

Keywords: *Twisted Tape, Helicoidal vortices, Vortex Breakdown.*