

Escoamento Laminar Em Conduitas Anelares Com Rotação Interior E Leito De Aparas

Filipe Alexandre Veiga Sarmiento

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Pinho



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março 2011

Dedicado à família

Resumo

O petróleo e o gás natural continuam a assumir um papel fundamental no sector energético mundial. O esvaziamento dos poços mais próximos da superfície tem conduzido à exploração em poços cada vez mais fundos, o que exige técnicas de perfuração cada vez mais sofisticadas. Os poços têm cada vez mais enormes comprimentos e a sua configuração é complexa, com trajectórias que incluem troços com inclinações muito variadas. Daí que o transporte do cascalho pelo fluido de perfuração resulte frequentemente na deposição desses detritos, quando a inclinação do poço se afasta da vertical, formando-se leitos de cascalho que afectam significativamente a geometria e por consequência o desempenho do poço. Na ausência de rotação da coluna de perfuração a posição natural deste leito de aparas é simétrica em relação ao eixo que contém os centros geométricos da conduta exterior e da coluna de perfuração, mas como o poço opera com rotação da coluna é muito provável que esse leito apareça inclinado em relação à sua posição natural. Os leitos de aparas são meios porosos existindo também uma região de interface onde o cascalho está em movimento, pelo que o estudo do escoamento real é complexo e não trás necessariamente resultados muito mais precisos que o recurso a modelos minimamente realistas, embora simplificados. O objectivo deste trabalho consiste precisamente em estudar as características dos escoamentos de fluidos newtonianos, totalmente desenvolvidos em regime laminar, numa conduta anelar com rotação do cilindro interior e na presença de um leito de aparas.

O estudo, efectuado pela via numérica, analisa os efeitos da razão de raios, da excentricidade da conduta anelar, da velocidade de rotação da coluna de perfuração, da espessura do leito de apara e da sua posição angular. Para além do cálculo dos campos de velocidade e pressão, há a preocupação de determinar o factor de atrito (f) uma vez que esta quantidade é fundamental para calcular a variação de pressão ao longo de um poço, um acto de engenharia de poços da maior relevância. Para cada geometria foram efectuados cálculos em três malhas consistentemente refinadas para obter resultados de elevada precisão por aplicação do método da extrapolação de Richardson.

Os cálculos quantificam com precisão o aumento da perda de carga (medido pelo número de Poiseuille, o produto do coeficiente de fricção e do número de Reynolds, $f.Re$) com a espessura do leito de apara e a sua diminuição com a rotação da posição do leito.

Abstract

Oil and natural gas are still a major source of energy in the world market. The depletion of the shallower oil wells is calling for the exploitation of deeper wells, which requires more advanced drilling technologies. New wells are increasingly longer and more complex in their geometry, with sections with strongly variable slopes. Hence, the transport of drilling cuts is more difficult and often leads to their deposition especially when the inclination of the well deviates from vertical. The formation of cuttings beds significantly affects the geometry of the annular duct between the drill string and hole and consequently the performance of the well. In the absence of rotation, the cuttings bed natural position is symmetric relative to symmetry plane of the annulus, but in the presence of inner cylinder rotation the cuttings are dragged by the fluid and the bed is fixed at an inclined position. The cuttings beds are porous media and they also have an interface region where the gravel is in motion with the fluid, so the study of the real flow is extremely complex. The use of some simplifying assumptions can make the flow significantly simpler to solve while providing sufficiently accurate results. The goal of this work is precisely the investigation of Newtonian laminar flow in an annular duct with rotation of the inner cylinder with a cuttings bed.

The numerical study investigates in detail the effects of radius ratio, Taylor and Reynolds number, annulus eccentricity and cuttings bed depth and angle of inclination on the flow dynamics, assessed by the full detail of the velocity and pressure fields, and in particular onto the friction factor, which is so important to calculate the variation of pressure along the well. Each annular geometry was mapped by three consistently refined meshes to allow the determination of a highly accurate friction factor by application of the technique known as Richardson's extrapolation to the limit.

The results quantify accurately the increasing pressure loss (measured by the Poiseuille number, the product of the friction coefficient by the Reynolds number, $f.Re$) with the thickness of the cuttings bed and its decrease with the angle of inclination of the bed.

Agradecimentos

Antes de qualquer coisa, tenho umas palavras a dizer ao meu orientador professor Fernando Pinho: Muito obrigado!

Foi de longe a pessoa que mais me ajudou, mostrando-se sempre disponível e atencioso, zelando sempre pelo meu interesse. Sem dúvida, uma pessoa imprescindível.

Agradeço também ao Nuno Rocha, que me ajudou a dar os primeiros passos na programação.

Agradeço a toda família e em particular à minha mãe, que sempre me apoiou ao longo do curso e me deu todas as condições para o executar com o mínimo de preocupações. Aos meus avós pessoas marcantes ao longo da minha juventude e com um papel muito importante na minha educação.

A todos os amigos e namorada, foram essenciais para tornarem este período de estudante, possivelmente o melhor período da minha vida.

Índice de conteúdos

Índice de conteúdos	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas:.....	xiii
Nomenclatura.....	xv
1-Introdução e objectivos	1
1.1-Contextualização.....	1
Particularidades deste tipo de perfurações:	2
1.2-Objectivos do trabalho.....	4
1.3-Organização do relatório	5
2-Revisão Bibliográfica.....	7
3-Equações Fundamentais	9
3.1- Equações governativas e processo numérico	9
Simplificação e adimensionalização das equações governativas.....	10
3.2-Determinação do diâmetro hidráulico:.....	13
Perímetro molhado:	14
Área da secção transversal e diâmetro hidráulico.....	15
4-Processo De Cálculo	17
4.1-Geração da malha	17
4.2-Extrapolação de Richardson	18
4.3-Validação do método.....	20
5-Discussão dos resultados.....	23
5.1- Estudo da velocidade axial.....	23
Efeito da excentricidade na distribuição axial de velocidades.....	24
Efeito da profundidade do leito de aparas na distribuição axial de velocidades	26
Efeito da rotação do leito de aparas na distribuição axial de velocidades	28
Efeito da velocidade de rotação do cilindro interior na distribuição axial de velocidades	30
Efeito da profundidade e da rotação do leito de aparas num escoamento ao longo de uma conduta anelar com excentricidade e rotação do cilindro interior	32
5.2- Estudo da evolução de $f.Re$	35
Estudo da perda de carga variando a excentricidade (ϵ) para os diferentes valores de K e espessura do leito de apara (ξ)	35
Evolução de $f.Re$ em função de ϵ , com valores crescentes de K e para $\xi=20$	36

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de K e para $\xi=40$	37
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de K e para $\xi=70$	38
Estudo da evolução da perda de carga do escoamento variando a excentricidade (ε) para os diferentes valores de Ta e espessura do leito de apara (ξ).....	39
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=20$	39
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=40$	40
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=70$	41
Estudo da evolução de $f.Re$ do escoamento variando a excentricidade (ε) para os diferentes valores de θ e espessura do leito de apara (ξ)	41
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\xi=20$	42
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\xi=40$	42
Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\xi=70$	43
Estudo da evolução de $f.Re$ em função da excentricidade (ε) para os crescentes valores de ξ e diferentes valores de Ta	44
$f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ξ e para $Ta=1000$	44
Variação de $f.Re$ em função de ε para crescentes valores do número de ξ e para $Ta=50000$	45
6-Conclusões	47
7- Bibliografia	49
Anexos	51

Índice de Figuras

Figura 1.1: Exemplo do escoamento	1
Figura 1.2: Exemplo dos vários tipos de perfurações.....	2
Figura 1.3: Exemplo de um acidente numa plataforma petrolífera no Golfo do México. 4	
Figura 2.1: a) Exemplo da geometria estudada por Rocha (2010); b) exemplo da geometria estudada neste trabalho	8
Figura 3.1: Geometria anelar com $\varepsilon=0,4$, $K=0,5$, $\zeta=0,3$ e $\Theta=45$	9
Figura 3.2: Ilustração das variáveis utilizadas no cálculo do diâmetro hidráulico.....	13
Figura 3.3: Ilustração dos perímetros utilizados no cálculo do diâmetro hidráulico.....	14
Figura 3.4: Ilustração dos perímetros utilizados na área do diâmetro hidráulico.....	15
Figura 4.1: Gráficos dos valores de $f.Re$ para os valores publicados por Escudier e tal (2000) e dos obtidos pelo método utilizado ao longo do trabalho.	21
Figura 4.2: Comparação entre os valores calculados em Escudier et al. (2000) com as distribuições de velocidades medidas em Escudier e Goldson (1997) para $Ta=3000$ e $\varepsilon=0,5$: (a) componente axial da velocidade $\mathbf{u}(\sigma)$, (b) componente tangencial da velocidade $\mathbf{v}(\sigma)$. ■ sector A; ● sector B; ○ sector C; ◆ sector D.....	21
Figura 5.1: Ilustração dos sectores onde se mediu as velocidades axiais.....	23
Figura 5.2: Distribuições de velocidades axiais $\bar{u}(\sigma)$ para condutas anelares com $K=0,5$, $\zeta=0$, $Ta=0$ e crescentes excentricidades. ◆ Sector A; ■ Sector B; ▲ Sector C; + Sector D.	24
Figura 5.3: Isolinhas de velocidade axial adimensional $\bar{u}(\bar{r}, \sigma)$ para condutas com a razão de raios $K=0,5$, sem leito de aparas, sem rotação do cilindro interior e com as crescentes excentricidades a) $\varepsilon=0,2$, (b) $\varepsilon=0,5$, (c) $\varepsilon=0,8$	25
Figura 5.4: Distribuições de velocidades axiais $\bar{u}(\sigma)$ para condutas anelares com $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $Ta=0$ e crescentes profundidades do leito de aparas: ◆ Sector A; ■ Sector B; ▲ Sector C; + Sector D.....	26
Figura 5.5: Isolinhas de velocidade axial adimensional $\mathbf{u}(\mathbf{r}, \sigma)$ para a razão de raios $K=0,5$, sem rotação do cilindro interior, sem excentricidade e para crescentes profundidades do leito de aparas: (a) $\zeta=0$, (b) $\zeta=0,5$, (c) $\zeta=0,9$	27
Figura 5.6: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $\zeta=0,5$, $Ta=0$ e com crescentes posições angulares de ξ :.....	28
Figura 5.7: Isolinhas de velocidade axial adimensional \mathbf{u} para a razão de raios $K=0,5$, sem rotação do cilindro interior, sem excentricidade, com $\zeta=0,5$ e crescentes valores de Θ : a) $\Theta=0^\circ$, b) $\Theta=45^\circ$, c) $\Theta=75^\circ$	29
Figura 5.8: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $\zeta=0,5$, $\Theta=45^\circ$ e com crescentes valores de Ta :	30

Figura 5.9: Isolinhas de velocidade axial adimensional u para a razão de raios $K=0,5$, $\Theta=45^\circ$, sem excentricidade, com $\zeta=0,5$ e crescentes valores de Ta : a) $Ta=100$, b) $Ta=5000$, c) $Ta=50000$	31
Figura 5.10: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$, $\Theta=45^\circ$ e com crescentes valores de ζ :	32
Figura 5.11: Isolinhas de velocidade axial adimensional u para a razão de raios $K=0,5$, $\Theta=45^\circ$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$ e crescentes valores de ζ : a) $\zeta=0,1$, b) $\zeta=0,2$, c) $\zeta=0,4$	33
Figura 5.12: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$, $\Theta=75^\circ$ e com crescentes valores de ζ :	34
Figura 5.13: Isolinhas de velocidade axial adimensional u para a razão de raios $K=0,5$, $\Theta=75^\circ$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$ e crescentes valores de ζ : a) $\zeta=0,1$, b) $\zeta=0,2$, c) $\zeta=0,4$	35
Figura 5.14: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de k com $\zeta=0,2$ e $\Theta=15^\circ$:....	36
Figura 5.15: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de k , com $\zeta=0,4$ e $\Theta=15^\circ$: ...	37
Figura 5.16: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de k com $\zeta=0,7$ e $\Theta=15^\circ$:	38
Figura 5.17: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\zeta=0,2$ e $\Theta=15^\circ$: ..	39
Figura 5.18: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\zeta=0,4$ e $\Theta=15^\circ$:... 40	
Figura 5.19: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\zeta=0,7$ e $\Theta=15^\circ$: .. 41	
Figura 5.20: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Θ com $\zeta=0,2$ e $K=0,5$:	42
Figura 5.21: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Θ com $\zeta=0,4$ e $K=0,5$:	43
Figura 5.22: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Θ com $\zeta=0,7$ e $K=0,5$:	43
Figura 5.23: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ζ com $Ta= 1000$ e $\Theta=15^\circ$: 44	
Figura 5.24: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ζ com $Ta= 50000$ e $\Theta=15^\circ$:	45

Índice de Tabelas:

Tabela 4.1: Resultados obtidos com a aplicação do método de Richardson	20
Tabela 4.2: Comparação dos valores obtidos com os valores de $f.Re$ de Shah e London para validação do método utilizado.	20

Nomenclatura

Letras Romanas

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da superfície anelar	m^2
A_O	Área da conduta exterior (sem leito de aparas)	m^2
A_I	Área da conduta interior	m^2
A_h	Área do sector circular função do tamanho do leito de aparas	m^2
D_h	Diâmetro hidráulico	m
e	Distância entre os centros dos cilindros interior e exterior	m
f	Coefficiente de fricção de Fanning	-
h	Espessura do leito de aparas	m
g	Comprimento do sector (A, B, C ou D)	m
p	Pressão	Pa
\bar{p}	Valor não dimensional da pressão	-
P	Perímetro da superfície anelar	m
P_{arco}	Perímetro do segmento de curva à esquerda da superfície do leito de aparas	m
P_h	Perímetro do segmento de recta leito de aparas	m
P_I	Perímetro do cilindro interior	m
P_O	Perímetro do cilindro exterior (sem leito de aparas)	m
R_I	Raio do cilindro interior	m
R_O	Raio do cilindro exterior	m
Re	Número de Reynolds	-
T	Número de Reynolds rotacional	-

Ta	Número de Taylor	-
r	Distância radial desde a origem do cilindro interior	m
\bar{r}	Valor de r não dimensional	-
u	Componente axial da velocidade	m/s
v	Componente tangencial da velocidade	m/s
w	Componente radial da velocidade	m/s
y	Distância à parede do cilindro interior	m
\bar{u}	Valor adimensional de u	-
\bar{v}	Valor adimensional de v	-
\bar{w}	Valor adimensional de w	-

Letras gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
δ	Diferença entre o raio exterior e o interior	m
ε	Excentricidade	
ξ	Leito de aparas	
ρ	Massa volúmica do fluido	Kg/m ³
σ	Distância não dimensional à parede do cilindro interior y/g	
μ	Viscosidade dinâmica	N.s/m ²

Abreviaturas

Símbolo	Descrição
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CEFT</i>	Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte

1-Introdução e objectivos

1.1-Contextualização

A extracção de petróleo em águas profundas tem impulsionado estudos para soluções de problemas existentes nas perfurações, gerando assim grandes desafios para a engenharia. Estes problemas têm de ser estudados e solucionados para prevenir danos decorrentes de catástrofes naturais e acidentes com perdas de vidas humanas, já para não falar dos custos envolvidos em processos desta natureza.

Com a passagem do tempo, tem-se verificado a necessidade de automatizar o máximo de processos possíveis com a finalidade de diminuir custos, aumentar a eficiência e o rigor dos resultados de qualquer estudo.

Como sabemos, a indústria petrolífera opera com substâncias muito inflamáveis e perigosas. No processo de perfuração há muitas vezes libertação de gases altamente inflamáveis que em determinadas circunstâncias podem causar grandes acidentes se o aparecimento à superfície ocorra de forma descontrolada.

Na perfuração de um poço de petróleo existe uma coluna de perfuração que roda a uma certa velocidade de rotação, no interior da qual existe um fluido de perfuração auxiliar e que na extremidade da qual existe uma broca. O efeito combinado do peso da broca e da sua rotação sobre a formação rochosa causa a fragmentação da rocha. Durante o processo de perfuração, o fluido injectado pela coluna de perfuração, passa pela broca e retrocede através do espaço anelar existente entre a coluna de perfuração e a formação rochosa transporta o cascalho para a superfície. Este processo é extremamente importante e é neste preciso escoamento que este trabalho se vai focalizar.

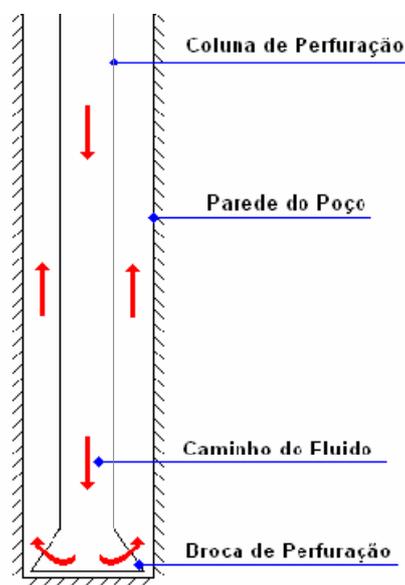


Figura1.1: Exemplo do escoamento

Existem dois aspectos a ter em conta: primeiro, estas perfurações podem ter vários quilómetros de comprimento e nem sempre têm uma trajectória rectilínea, o que possibilita a deposição dos sedimentos provenientes da fragmentação da rocha, segundo lugar, na maior parte das vezes o canal de perfuração não está concêntrico com o furo

do poço. Veremos mais adiante o tão importante são estes dois factores e mostrar o porque tal se torna um desafio para os engenheiros.

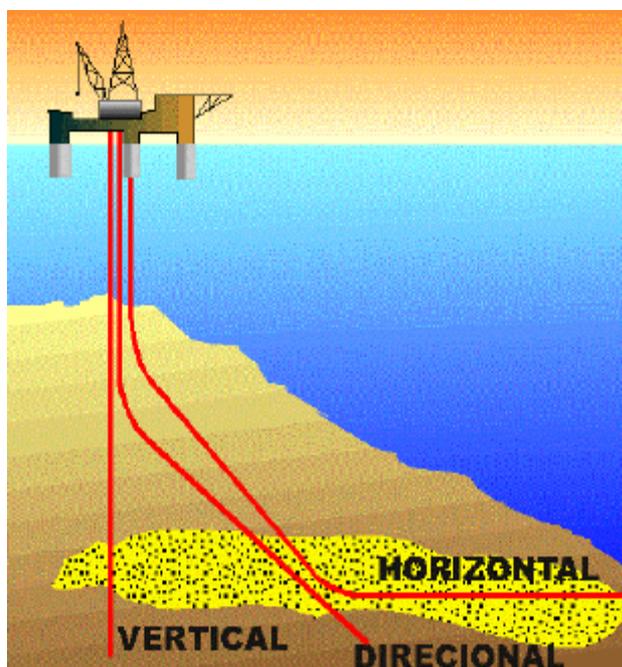


Figura 1.2: Exemplo dos vários tipos de perfurações

Particularidades deste tipo de perfurações:

Relativamente à perfuração de um poço de petróleo existem várias outras características que interessam discutir pois afectam a dinâmica do escoamento.

Começamos por falar dos fluidos de perfuração. Estes fluidos são vitais para o bom funcionamento durante a perfuração, uma vez que uma boa selecção do fluido a utilizar, pode e muito contribuir para o aumento da vida útil de uma ferramenta e a níveis de segurança, estes poderão estar em causa, caso a escolha deste mesmo fluido não seja a correcta. Mas antigamente as coisas não eram processadas desta maneira. Inicialmente o fluido mais utilizado era a água (alem de bom refrigerante, também transportava razoavelmente o cascalho), mas com o aumento das exigências, começaram a utilizar-se fluidos não newtonianos de forma a não deixar pendente a resolução de problemas que falarei a seguir.

Com o passar do tempo, estudos revelaram que estes fluidos podiam ser úteis para desempenhar funções até à data desprezadas. Actualmente os fluidos de perfuração são misturas complexas designadas por lamas de perfuração. Essas lamas consistem em soluções aquosas de polímeros com outros aditivos tais como argila, obtidos com a finalidade de transportar as aparas provenientes da broca, arrefecer e lubrificar a broca, capacidade de sustentação dos diversos sedimentos mesmo quando o escoamento é

interrompido, suporte de parte do peso do sistema de perfuração e controlo da pressão ao longo do poço (muito importante).

Visto a importância do fluido de perfuração, vamos agora estudá-lo com um pouco mais de pormenor. Um dos factores a ter em conta é a viscosidade do fluido de perfuração. A viscosidade influencia a resistência do fluido ao escoamento, que por sua vez tem repercussões, na velocidade e na capacidade de transporte e suspensão das aparas. Assim, quanto maior a viscosidade, menor serão as velocidades de escoamento, maior será a variação de pressão piezométrica no poço, sendo o controlo da pressão também ele fundamental neste tipo de actividade como vamos ver mais à frente e melhor se processa o transporte das aparas. Quando a viscosidade é baixa, as oscilações de pressão são menores, mas por outro lado a capacidade de manter o cascalho também é menor, o que não é bom. De modo a evitar a sedimentação das aparas, é conveniente a utilização de um fluido com tensão de cedência, o que acaba por estar muitas vezes associado a maiores viscosidades, especialmente a baixas velocidades de deformação do fluido.

Assim para uma correcta limpeza da conduta de perfuração, é saudável a utilização de um fluido com a viscosidade e a tensão de cedência adequada, de forma que o transporte das aparas seja eficiente. Caso contrário ocorrerá uma deposição dessas mesmas aparas no fundo da conduta, sobretudo quando o escoamento é interrompido por causas alheias, o que levará à formação de um leito de apara que introduz alterações inconvenientes na geometria da conduta, na pressão, velocidade e perda de carga.

Um dos aspectos mais relevantes da operação de uma conduta de perfuração é o do controlo da pressão ao longo da conduta. Este controlo é fundamental quer em termos de segurança, quer em termos económicos e ambientais. O controlo da pressão é fundamental para que não se verifiquem diferenças de pressão elevadas entre a conduta e as formações rochosas adjacentes para evitar fluxos indesejados entre as duas regiões, devido à possível porosidade da parede do poço. Em particular evitar a entrada de gás existente nas formações rochosas para o interior do poço. Estas fugas se não forem detectadas a tempo, poderão provocar um fluxo descontrolado (blow out) até à superfície destes hidrocarbonetos, provocando acidentes conhecidos por kick.

Por outro lado, caso se verifique na conduta uma pressão muito superior à das formações adjacentes, poderá ocorrer uma fuga do fluido de perfuração para essas formações através das zonas premiáveis da parede do poço.

Os fluidos provenientes das formações rochosas adjacentes que dão origem aos “kicks” podem ser, por exemplo, petróleo ou gás, entre outros. Relativamente à massa volúmica destes fluidos, caso seja inferior à massa volúmica do fluido de perfuração, a mistura dos dois dá origem a um fluido de menor densidade, baixando a pressão facilitando assim estes fluxos indesejados, tornando-se cada vez mais complicado o controlo do escoamento e aumenta assim a probabilidade da ocorrência de acidentes.

Os “blow outs” podem causar danos significativos nas plataformas de perfuração, ferimentos em trabalhadores, para não falar dos danos significativos ao meio ambiente, uma vez que estamos a falar da combustão incontrolada de hidrocarbonetos. Por estas razões é fundamental avaliar continuamente do poço, monitorizando as pressões, as propriedades da lama e a presença de gás durante todo o processo de perfuração.



Figura 1.3: Exemplo de um acidente numa plataforma petrolífera no Golfo do México

1.2-Objectivos do trabalho

Com base na problemática das perfurações de poços de petróleo, foram feitos estudos sobre o comportamento do escoamento laminar em condutas anelares na ausência de leito de apara, mas existem lacunas quanto ao efeito da presença deste leito.

Esta tese surge na continuação do trabalho do Rocha (2010) em que se estuda pela via numérica a dinâmica do escoamento laminar Newtoniano para uma posição do leito e se avalia o efeito da excentricidade, rotação do cilindro interior e profundidade do leito. Nesta nova contribuição pretende-se estudar também numericamente todos estes efeitos combinados com o da posição angular do leito de apara. Assim, eu debruçar-me-ei e aproveitarei todo o trabalho que já foi feito, e vou analisar o escoamento idêntico ao já estudado, e introduzirei a variável θ , que diz respeito à rotação do leito de apara e para ângulo vou fazer varia a razão de raios (K), a excentricidade (ϵ), a espessura do leito de apara (ζ) e a velocidade de rotação (Ta) e ver qual a influencia desse novo parâmetro introduzido no escoamento. Espero dar um passo em frente na continuação de um estudo complexo que vem sido feito há anos.

1.3-Organização do relatório

Esta tese é composta por 6 capítulos e organiza-se da seguinte forma: o primeiro capítulo introdutório, contextualiza o problema a analisar, realça os problemas existentes e traçam-se os objectivos. O segundo capítulo, consiste na revisão bibliográfica, onde se assinalam os estudos já feitos em condutas anelares e por omissão se identifica o que falta fazer.

No terceiro capítulo, apresenta-se as equações governativas de todo o processo de cálculo segue-se um quarto capítulo, onde se explica de forma breve o processo do cálculo numérico e se realiza um exercício de validação do método que também tem como objectivo quantificar as incertezas de cálculo.

Finalmente, quinto capítulo analisa e discute os resultados obtidos e para finalizar, teremos as conclusões num sexto capítulo.

2-Revisão Bibliográfica

As inúmeras aplicações industriais dos escoamentos em condutas de forma anelar (por exemplo em permutadores de calor ou chumaceiras) tem motivado muita investigação nesta temática, sendo que a ênfase principal tem sido sempre o cálculo do factor de fricção e do número de Nusselt. Assim, temos os cálculos de Tiedt (1966, 1967), como parcialmente relatado por Shah e Londres (1978), onde mostra que para uma dada razão de raio (K), o factor $f.Re$ diminui com a excentricidade (ϵ), onde f é o factor de Fanning e Re o número de Reynolds.

O fluxo gerado numa conduta anelar, devido à rotação do cilindro interior, na ausência de fluxo axial, é um dos temas mais amplamente investigados na mecânica dos fluidos. Dos trabalhos publicados até à data, a maioria tem se preocupado com o aparecimento de instabilidades, os chamados vórtices de Taylor que aparecem acima de um valor crítico do número de Taylor. Lockett (1992) mostrou que a ocorrência de vórtices de Taylor é inibida pela excentricidade do cilindro interior e os seus cálculos numéricos foram confirmados pelo recente trabalho experimental de Escudier e Gouldson (1997). A separação do fluxo e do vórtice de recirculação que ocorre acima de uma excentricidade crítica para uma determinada razão de raios, também têm recebido atenção generalizada (Kamal, 1966; Ballal e Rivlin, 1976; San Andres e Szeri, 1984; Ho Tung et al, 1993; Siginer e Bakhtiyarov, 1998). Embora este movimento radial/tangencial seja independente da componente axial da velocidade, quando a viscosidade é constante tem uma influência muito forte sobre a distribuição de velocidade axial quando há um fluxo axial, particularmente para o caso de grande excentricidade.

Relativamente a este tipo de estudos pouco tem sido publicado para o fluxo axial através de uma conduta anelar com variação da excentricidade e rotação do cilindro interior. Então, um trabalho de Escudier et al. (2000) traz-nos um estudo sobre a evolução de $f.Re$ em escoamentos completamente desenvolvidos de fluidos newtonianos em condutas anelares sem leito de apara, fazendo variar a excentricidade (ϵ), a velocidade de rotação do cilindro interior (Ta) e a razão de raios (K) e mais recentemente estudada em Rocha (2010), que explorou esta temática e efectuou cálculos do factor $f.Re$ exactamente para as mesmas condições mas agora com a presença de leito de apara de espessura (ξ).

No entanto, Rocha considerou fixa a posição angular do leito de aparas, que ele localizou na zona mais estrangulada da conduta anelar, como se representa na figura(2.1.a). Ora a rotação do cilindro interior e do escoamento gera tensões de corte que na prática conduzem a um deslocamento angular do leito de aparas. Este problema é discutido em Schlumberger e constitui o aspecto crucial do presente trabalho. Convém ainda dizer que na realidade o leito de aparas é um leito poroso e à sua superfície existe uma forte interacção entre as forças associadas às partículas e as forças do escoamento

que só um tratamento como escoamento bifásico resolveria de forma rigorosa, como explicado em Ozbayoglu et al. (2005)

No entanto, e como primeira aproximação é válido considerar o leito como um meio sem porosidade e o escoamento sobre o leito como o de um fluido a uma fase.

Dito isto, o meu trabalho incide na continuação destes estudos feitos anteriormente onde analisarei a influência da rotação do leito de aparas neste tipo de escoamentos.

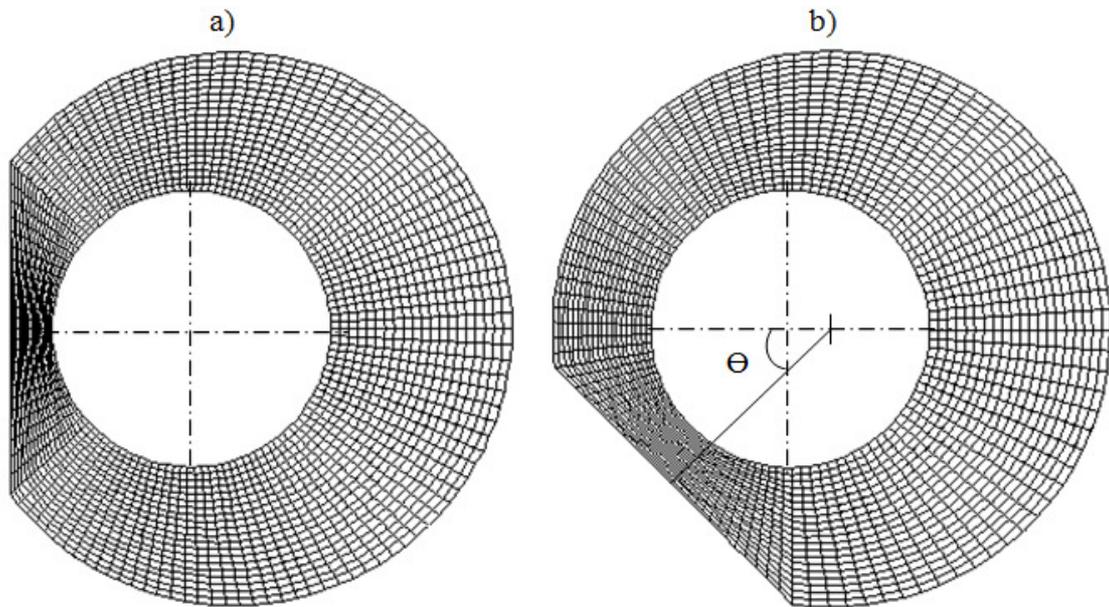


Figura 2.1: a) Exemplo da geometria estudada por Rocha (2010); b) Exemplo da geometria estudada neste trabalho

3-Equações Fundamentais

Neste capítulo apresentam-se as equações governativas e a sua adimensionalização e assumimos valores teóricos para determinadas variáveis. Para este efeito será também necessário definir a geometria em estudo e as correspondentes dimensões relevantes

3.1- Equações governativas e processo numérico

O cálculo da pressão ao longo da conduta é feito a partir da combinação de várias equações (Navier-Stokes e a equação da continuidade), tendo em conta que o fluido que utilizamos é um fluido Newtoniano, isto é, um fluido de densidade e viscosidade constante e o escoamento encontra-se totalmente desenvolvido e em regime laminar. Estas equações podem ser encontradas em grande parte dos livros sobre mecânica dos fluidos, Munson et al. (2002).

Assim temos a seguinte forma da equação da continuidade em coordenadas cilíndricas para fluidos incompressíveis:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rw)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

onde w, v e u são as componentes do vector velocidade nas direcções r (radial), ϕ (tangencial) e z (axial), respectivamente. As equações Navier-Stokes em coordenadas cilíndricas:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \phi} - \frac{v^2}{r} + u \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{w}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (3.2.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + w \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{vw}{r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3.2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + w \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.2.3)$$

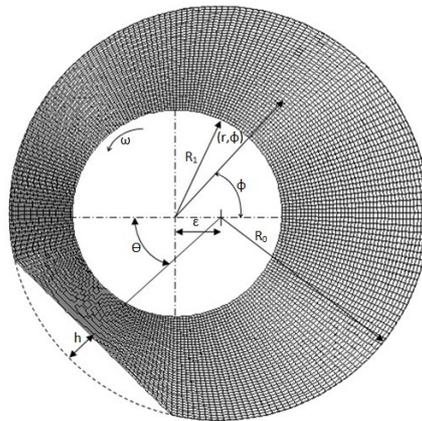


Figura 3.1: Geometria anelar com $\varepsilon=0,4$, $K=0,5$, $\zeta=0,3$ e $\theta=45^\circ$

Simplificação e adimensionalização das equações governativas

As equações atrás referidas, foram simplificadas para um escoamento totalmente desenvolvido ao longo da conduta considerando o caso geral de rotação do cilindro interior. Sendo assim, as variações segundo a coordenada longitudinal são nulas ($\partial/\partial z = 0$), excepto para a pressão onde essa variação não é nula e as variações com o tempo também são nulas (regime permanente).

Aplicando as simplificações às equações 3.1 e 3.2, temos:

equação da continuidade:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rw)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} = 0 \quad (3.3)$$

equações de Navier-Stokes:

$$\rho \left(w \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \phi} - \frac{v^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{w}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \phi} \right] \quad (3.4.1)$$

$$\rho \left(w \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{vw}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \phi} \right] \quad (3.4.2)$$

$$\rho \left(w \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} \right] \quad (3.4.3)$$

Há todo o interesse em generalizar as soluções obtidas por intermédio de uma adimensionalização judiciosa. Para esse efeito, vamos introduzir as seguintes definições de grandezas adimensionais. Assim por exemplo, as componentes v e w da velocidade são normalizadas pela velocidade periférica de rotação da conduta interior, onde ω e R_1 são a velocidade angular de rotação e o raio do cilindro interior.

$$\bar{v} \equiv \frac{v}{\omega R_1} \leftrightarrow v \equiv \bar{v} \omega R_1 \quad (3.5)$$

$$\bar{w} \equiv \frac{w}{\omega R_1} \leftrightarrow w \equiv \bar{w} \omega R_1 \quad (3.6)$$

enquanto que a componente u da velocidade é adimensionalizada pela velocidade média na mesma direcção:

$$\bar{u} \equiv \frac{u}{U} \leftrightarrow u \equiv \bar{u} U \quad (3.7)$$

Em relação à posição radial e à pressão estas são normalizadas como mostra as equações 3.8 e 3.9, onde D_h é o diâmetro hidráulico.

$$\bar{r} \equiv \frac{2r}{D_h} \leftrightarrow r \equiv \frac{\bar{r} D_h}{2} \quad (3.8)$$

$$\bar{p} \equiv \frac{p D_h}{2\mu \omega R_1} \leftrightarrow p \equiv \frac{2\bar{p} \mu \omega R_1}{D_h} \quad (3.9)$$

Reescrevendo agora as equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade na forma adimensional ficamos com:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial(\bar{r}\bar{w})}{\partial\bar{r}} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial\phi} = 0 \quad (3.10)$$

Equações de Navier-Stokes:

$$\frac{\rho\omega R_i D_H}{2\mu} \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\phi} - \frac{\bar{v}^2}{\bar{r}} \right) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{r}} + \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left[\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} (\bar{r}\bar{w}) \right] + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial\phi^2} - \frac{2}{\bar{r}^2} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\phi} \quad (3.11.1)$$

$$\frac{\rho\omega R_i D_H}{2\mu} \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\phi} - \frac{\bar{v}\bar{w}}{\bar{r}} \right) = -\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{p}}{\partial\phi} + \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left[\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} (\bar{r}\bar{v}) \right] + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\phi^2} + \frac{2}{\bar{r}^2} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\phi} \quad (3.11.2)$$

$$\frac{\rho\omega R_i D_H}{2\mu} \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\phi} \right) = \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \frac{D_H}{2\rho U^2} \right) \cdot \frac{\rho U D_H}{\mu} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\phi^2} \quad (3.11.3)$$

definindo o número de Reynolds (Re), Reynolds rotacional (T) e o coeficiente de Fanning (f) a partir das seguintes equações:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (3.12)$$

$$T = \frac{\rho\omega R_i D_h}{\mu} \quad (3.13)$$

$$f = -\frac{D_h}{2\rho U^2} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.14)$$

Substituindo as equações 3.12, 3.13 e 3.14 nas equações 3.11 temos:

$$T \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\phi} - \frac{\bar{v}^2}{\bar{r}} \right) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{r}} + \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left[\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} (\bar{r}\bar{w}) \right] + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial\phi^2} - \frac{2}{\bar{r}^2} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\phi} \quad (3.15.1)$$

$$T \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{v}}{\partial\phi} - \frac{\bar{v}\bar{w}}{\bar{r}} \right) = -\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{p}}{\partial\phi} + \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left[\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} (\bar{r}\bar{v}) \right] + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\phi^2} + \frac{2}{\bar{r}^2} \frac{\partial\bar{w}}{\partial\phi} \quad (3.15.2)$$

$$T \left(\bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{r}} + \frac{\bar{v}}{\bar{r}} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\phi} \right) = \frac{1}{2} f \cdot Re + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial\bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\phi^2} \quad (3.15.3)$$

Em alternativa ao número de Reynolds rotacional temos o número de Taylor (Ta) definido pela seguinte equação:

$$Ta = \left(\frac{1}{K} - 1\right) T^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{\rho\omega}{\mu}\right)^2 R_i D_h^2 (R_0 - R_1) \quad (3.16)$$

onde K é a razão de raios

$$K = \frac{R_1}{R_0} \quad (3.17)$$

δ é a diferença de raios

$$\delta = R_0 - R_1 \quad (3.18)$$

e D_h é o diâmetro hidráulico

$$D_h = 2\delta \quad (3.19)$$

Esta equação é utilizada para condutas anelares sem leito de aparas. Para o problema em questão, o cálculo do diâmetro hidráulico será explicado na secção 3.3.

Quanto às condições de fronteira estas definidas como condições de não deslizamento, isto é:

para o cilindro exterior temos: $\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$

para o cilindro interior temos: $\bar{u} = 0, \bar{v} = 1, \bar{w} = 0$

Para além do escoamento depender do número de Reynolds, do número de Taylor e da razão de raios, depende também da excentricidade adimensional (ε), da espessura do leito adimensional (ξ) e da posição angular (θ) deste leito de aparas

Durante trabalho, foram calculadas varias excentricidades (ε) a partir da equação (eq.3.20) e espessuras do leito de aparas (ξ) calcula pela equação (eq.3.21).

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta} \quad (3.20)$$

$$\xi = \frac{h}{\delta} \quad (3.21)$$

3.2-Determinação do diâmetro hidráulico:

O diâmetro hidráulico, D_h , é a quantidade geométrica utilizada para quantificar a dimensão transversal de canais e condutas de secção não circular. Utilizando este parâmetro, pode-se frequentemente generalizar os resultados obtidos para condutas de diferentes geometrias.

Este parâmetro é necessário ao cálculo do coeficiente de Fanning e depende da altura do leito de aparas (h), raio interior (R_I) e raio exterior (R_O) da conduta.

De facto, o diâmetro hidráulico é definido como:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3.22)$$

onde A é a área onde se processa o escoamento e P é o perímetro dessa mesma secção.

Olhando para a geometria da figura 3.2, podemos definir algumas variáveis úteis para o cálculo da área e do perímetro molhado.

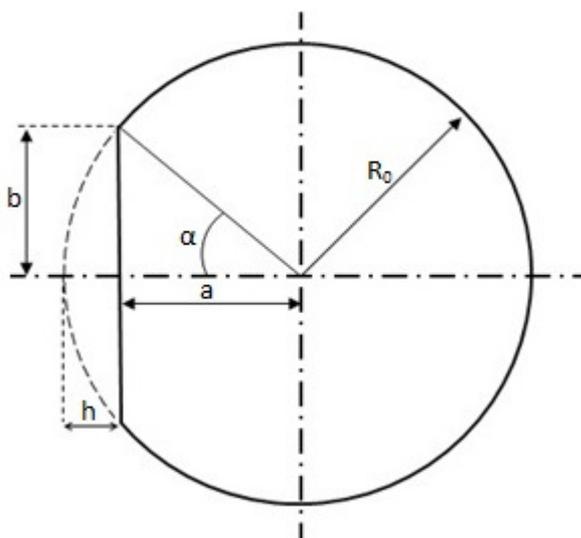


Figura 3.2: Ilustração das variáveis utilizadas no cálculo do diâmetro hidráulico

$$a = R_0 - h \quad (3.23)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{R_0 - h}{R_0} \right) \quad (3.24)$$

$$b = R_0 \cdot \sin \alpha \quad (3.25)$$

Perímetro molhado:

O perímetro molhado da secção anelar é descrito por:

$$P = P_0 + P_1 + P_h - P_{arco} \quad (3.26)$$

onde, P_0 é o perímetro do círculo exterior, P_1 é o perímetro do círculo interior e P_h e P_{arco} são os perímetros do segmento de recta e do arco de círculo, correspondentes ao leito de aparas.

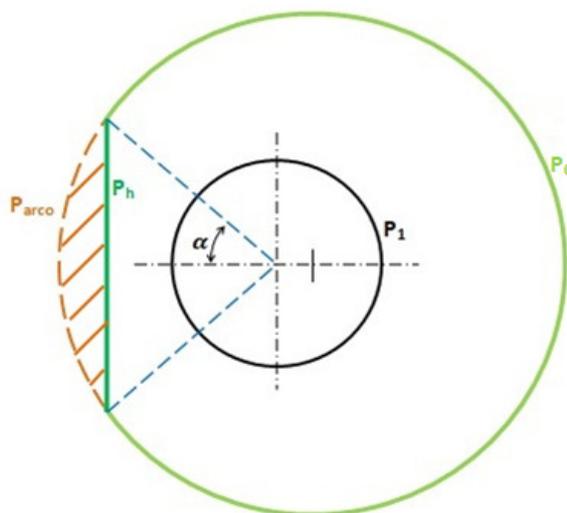


Figura 3.3: Ilustração dos perímetros utilizados no cálculo do diâmetro hidráulico

As expressões que permitem calcular os vários perímetros definidos na figura 3.3 são:

$$P_0 = 2\pi R_0 \quad (3.27)$$

$$P_1 = 2\pi R_1 \quad (3.28)$$

$$P_h = 2b \quad (3.29)$$

$$P_{arco} = 2\alpha R_0 \quad (3.30)$$

No final da combinação das equações anteriores com a equação (3.26), podemos extrair o perímetro molhado.

$$P = 2\pi R_0 + 2\pi R_1 + 2b - 2\alpha R_0 \quad (3.31)$$

Área da secção transversal e diâmetro hidráulico

A área utilizada no cálculo do diâmetro hidráulico é a área onde se processa o escoamento, que corresponde à zona cinzenta na Figura 3.4 e é dada pela expressão seguinte:

$$A = A_0 - A_1 - A_h \quad (3.32)$$

onde, A_0 é a área do cilindro exterior, A_1 é a área do cilindro interior e A_h é a área do leito de aparas como exemplifica a Figura 3.4 (zona tracejada).

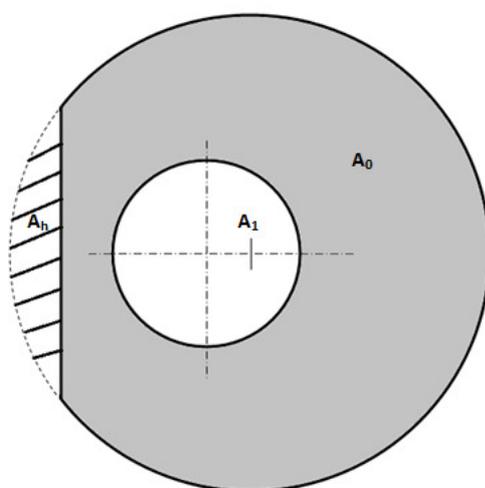


Figura 3.4: Ilustração dos perímetros utilizados na área do diâmetro hidráulico

Assim temos:

$$A_0 = \pi R_0^2 \quad (3.33)$$

$$A_1 = \pi R_1^2 \quad (3.34)$$

$$A_h = 2\alpha \left(\frac{\pi R_0^2}{2\pi} \right) - \frac{2ab}{2} = \alpha R_0^2 - ab \quad (3.35)$$

Substituindo as equações 3.33, 3.34 e 3.35 na equação 3.32 temos

$$A = \pi R_0^2 - \pi R_1^2 - (\alpha R_0^2 - ab) \quad (3.36)$$

e assim chegamos a expressão final do diâmetro hidráulico:

$$D_H = \frac{2(\pi R_0^2 - \pi R_1^2 - \alpha R_0^2 + ab)}{\pi R_0 + \pi R_1 + b - \alpha R_0} \quad (3.37)$$

4-Processo De Cálculo

A resolução das equações governativas foi efectuada por um programa de simulação numérica do Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte (CEFT). Esse programa resolve as equações pelo método dos volumes finitos para malhas não ortogonais e estruturadas por blocos, como descrito em Escudier et al.(2000). De forma sucinta as equações governativas foram discretizadas recorrendo a esquemas de segunda ordem de precisão, nomeadamente diferenças centradas para os termos difusivos e o método de montante linear (ou de segunda ordem) para os termos convectivos. A resolução de sistemas de equações algébricas usou métodos de gradientes convergentes

Os resultados foram processados usando o pacote gráfico Tecplot. Por outro lado, o pré-processamento necessita de trabalho de programação. Embora o gerador de malha, também do CEFT, seja geral, não possui qualquer interface amigável e a geração de cerca de 5800 malhas teria sido impossível sem um programa que foi desenvolvido pelo autor.

Por forma a obter valores de $f.Re$ com elevada precisão, em vez de se fazer uma única simulação numa malha muito refinada, optou-se por realizar a mesma simulação em três malhas progressivamente mais refinadas. Ao resultado das três malhas aplicou-se então o método da extrapolação de Richardson, que providencia um valor de $f.Re$ muito preciso com um custo menor (Ferziger, J.H. 1983).

De seguida descrevemos em mais detalhe a contribuição para este trabalho do programa de geração de malha e ainda o método da extrapolação de Richardson.

4.1-Geração da malha

O programa gerador de malha, é um programa essencial, dado que sem ele não é possível fazer o que se deseja. Este algoritmo foi todo ele criado por mim onde o processo de aprendizagem do manuseamento do software foi no início um pouco complicada, mas no final de um mês, sensivelmente, o programa estava pronto a trabalhar.

O programa criado, é um programa funcional para escoamentos que ocorrem em condutas de secção anelar com ou sem leito de aparas e com ou sem excentricidade. É um programa fácil de usar, onde apenas temos de introduzir as diferentes variáveis de

entrada como os raios interior e exterior, a excentricidade, o ângulo de rotação do leito de apara, a altura do leito de apara e o número de células em que vamos dividir a secção onde se processa o escoamento. Tem como restrições, o impedimento do leito de apara tocar no cilindro interior e a excentricidade não pode exceder a diferença de raios δ .

Foram criadas três malhas progressivamente mais refinadas, com um número de células radiais e tangenciais iguais a 10x64, 20x128 e 40x256. Temos apenas uma célula axial, dado que o escoamento é completamente desenvolvido e com o programa de processamento utilizado, é possível realimentar a entrada do domínio de cálculo com a saída do mesmo. A obtenção de três resultados do cálculo da diferença de pressão é feita para que em seguida se possa aplicar o método da extrapolação de Richardson, que será explicado mais a frente, obtendo assim um resultado com um erro menor e mais preciso, (com uma precisão de quarta ordem).

Ainda relativamente as malhas, falta referir que foram criadas cerca de 5800 malhas diferentes onde a excentricidade variava ente 0 e 95%, a altura do leito de apara variava entre 0 e 90% e o ângulo de posicionamento entre 15° a 75° (o caso de $\theta=0^\circ$ foi estudado por Rocha (2010)).

4.2-Extrapolação de Richardson

Uma vez criadas três malhas diferentes, consecutivamente mais refinadas permite-nos ter para o mesmo escoamento três valores diferentes de dp/dz . Se estas malhas foram refinadas de forma consistente, é possível estimar um valor mais preciso que qualquer um dos três valores originais, sem ser necessário efectuar qualquer simulação.

Suponhamos que temos uma função g , que não pode ser avaliada de forma exacta. Suponhamos também que temos um método de aproximação dessa função que depende de um parâmetro, h , considerado pequeno, e que dá origem à função de aproximação $g(h)$. Acontece frequentemente que a aproximação pode ser representada por uma extensão em série de Taylor:

$$g(h) = g + c_1 h + c_2 h^2 + \dots \quad (4.1)$$

em que c_1, c_2, \dots são constantes e onde todos os termos excepto o primeiro representam erros que pretendemos eliminar.

Agora, suponhamos que recalculamos a função aproximada $g(h)$ para um novo h , que é de facto igual a metade do valore inicial, $g(h/2)$:

$$g\left(\frac{h}{2}\right) = g + \frac{1}{2} c_1 h + \frac{1}{4} c_2 h^2 + \dots \quad (4.2)$$

Esta função tem aproximadamente o dobro da precisão e metade do erro da função $g(h)$. A extrapolação de Richardson combina $g(h)$ e $g(h/2)$, de forma a obter uma maior precisão. Subtraindo a equação 4.1 ao dobro da equação 4.2 temos:

$$g_1(h) = 2g\left(\frac{h}{2}\right) - g(h) = g + c_2'h^2 + c_3'h^3 + \dots \quad (4.3)$$

Note-se que aqui o primeiro termo do erro é agora de ordem superior relativamente à função inicial, sendo por isso mais precisa. Uma vez que a aproximação $g_1(h)$ é de segunda ordem, é possível uma outra aproximação de ordem superior combinando $g_1(h)$ e $g_1(h/2)$, de onde resulta:

$$g_2(h) = \frac{1}{3}\left[4g_1\left(\frac{h}{2}\right) - g_1(h)\right] = g + c_3''h^3 + \dots \quad (4.4)$$

Podemos aplicar esta técnica as vezes que quisermos e desde que tenhamos acesso aos valores de $g(h)$ com h a assumir valores diferentes e cada vez menores para um factor de dois.

Assim, a expressão generalizada da aproximação de ordem n vem dada por:

$$g_{n+1}(h) = \frac{2^n g_n(h/2) - g_n(h)}{2^n - 1} = g + O(h^{n+1}) \quad (4.5)$$

Exemplo da aplicação:

Considere-se três cálculos do mesmo escoamento em três malhas consecutivamente refinadas. Em cada cálculo foi determinado o valor de dp/dz adimensionalizados nos valores f_1, f_2 e f_3 do factor de Fanning como na tabela 4.1. Em primeiro lugar é necessário conhecer a ordem de aproximação n dos resultados obtidos originalmente e isso é possível a partir da seguinte expressão:

$$n = \left| \frac{\ln \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}}{\ln 2} \right| \quad (4.6)$$

Onde $\ln(2)$ surge do facto do refinamento da malha ter sido sempre feito consistentemente com o duplicado do número de volumes de controlo.

Utilizando os valores da tabela 4.1 para resolver a equação (4.6), obtém-se $n=2$, um grau de aproximação de segunda ordem, o que é consistente com os esquemas de interpolação utilizados pelo código de simulação do escoamento.

Aplicando agora o método de Richardson obtemos duas novas funções, mais precisas que as originais e dadas por:

$$f_2' = \frac{4f_2 - f_1}{3} \quad (4.7)$$

$$f_3' = \frac{4f_3 - f_2}{3} \quad (4.8)$$

Podemos de seguida combinar f'_2 e f'_3 para obtermos uma estimativa ainda mais correcta sendo aqui necessário admitir qual a ordem do primeiro termo da expansão que relaciona f'_2 ou f'_3 com o valor exacto. Admitindo que a expansão contem termos de todas as ordens então reaplica-se o método com $n=3$ e obtém-se uma aproximação de quarta ordem com a equação:

$$f''_3 = \frac{8f'_3 - f'_2}{7} \quad (4.9)$$

Tabela 4.1: Resultados obtidos com a aplicação do método de Richardson

i	f_i	f'_i	f''_i
1	0,091627		
2	0,092586	0,09290585	
3	0,092930	0,09304432	0,0930641

Assim o valor de f''_3 é uma melhor aproximação ao valor exacto e o correspondente erro (ou incerteza) em relação ao valor exacto é menor. A verificação das qualidades deste método é revelada sobretudo aplicando a um caso em que se conheça a solução exacta.

4.3-Validação do método.

Antes de realizar o novo conjunto de simulações, validou-se o método de cálculo através de casos documentados na literatura.

Num primeiro exercício compara-se os nossos resultados com a solução analítica para escoamentos numa conduta concêntrica sem rotação do cilindro interior e leito de aparas. Os resultados analíticos estão em Shah e London (1978) e a comparação para três valores diferentes da razão de raios está feita na tabela 4.2. O erro é, como podemos ver, nulo.

Tabela 4.2: Comparação dos valores obtidos com os valores de $f.Re$ de Shah e London para validação do método utilizado.

K	Valores $f.Re$ de Sahah e London (1978)	Valores obtidos de $f.Re$	Erro relativo (%)
0,2	23,088	23,088	0,000
0,5	23,813	23,813	0,000
0,8	23,980	23,980	0,000

No segundo exercício de validação compara-se o resultado das simulações com os valores numéricos de Escudier et al.(2000) para escoamentos numa conduta anelar com excentricidade e rotação do cilindro interior. A comparação está na figura 4.1.

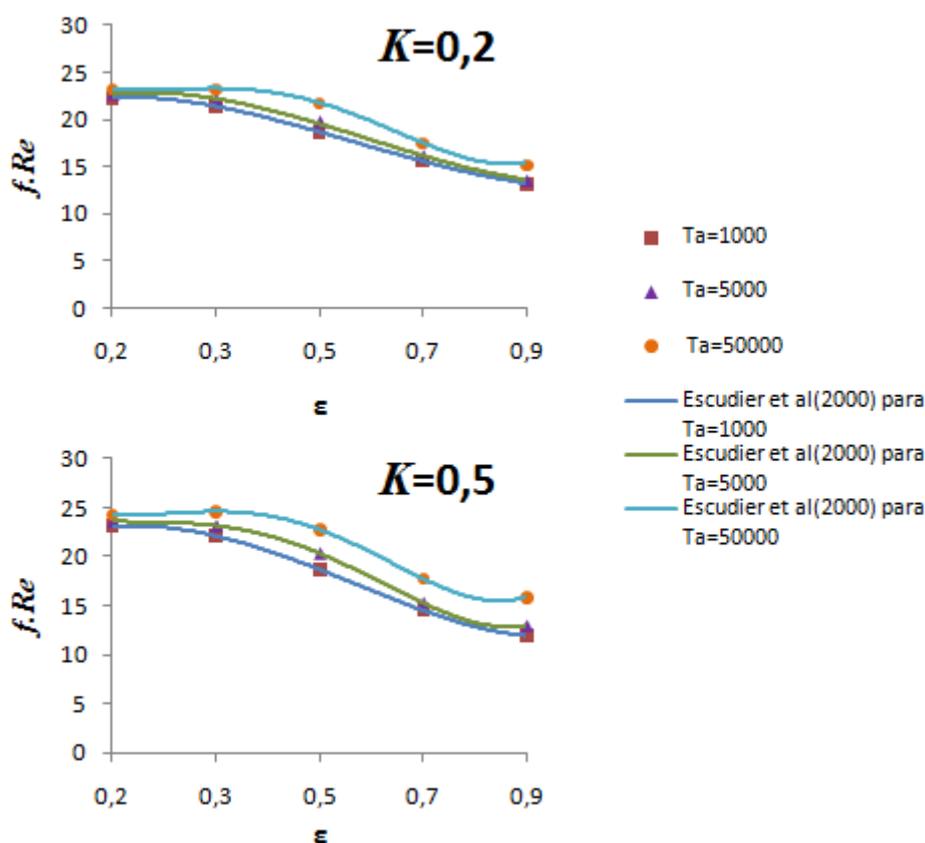


Figura 4.1: Gráficos dos valores de $f.Re$ para os valores publicados por Escudier et al (2000) e dos obtidos pelo método utilizado ao longo do trabalho.

De notar que os resultados de Escudier et al.(2000) foram também obtidas por via numérica. Finalmente convém comparar os resultados de um dos cálculos numéricos com os resultados experimentais para fluidos newtonianos. A figura 4.2 compara as nossas previsões com os resultados experimentais de Escudier e Gouldson (1997) para $Ta=3000$ e $\epsilon=0,5$. Como se vê a comparação é excelente havendo só uma pequena discrepância no perfil do sector A.

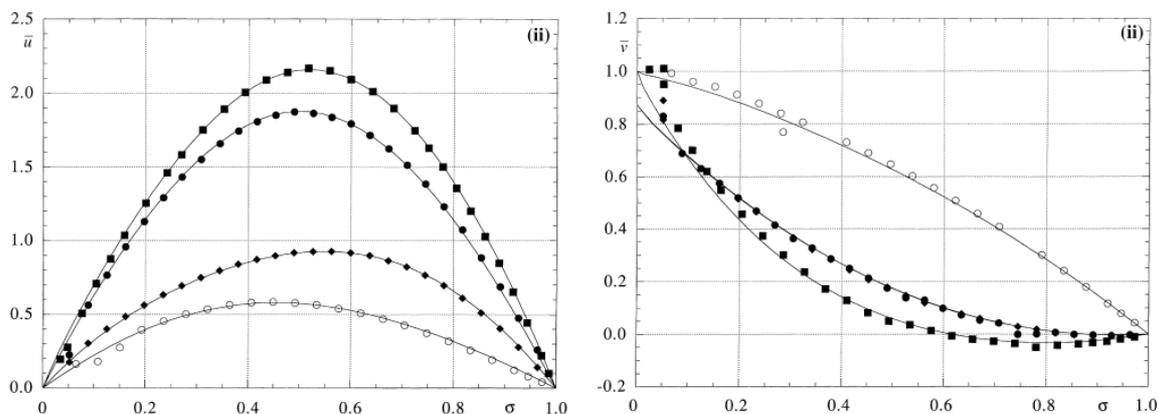


Figura 4.2: Comparação entre os valores calculados em Escudier et al. (2000) com as distribuições de velocidades medidas em Escudier e Goldson (1997) para $Ta=3000$ e $\epsilon=0,5$: (a) componente axial da velocidade $\bar{u}(\sigma)$, (b) componente tangencial da velocidade $\bar{v}(\sigma)$. ■ sector A; ● sector B; ○ sector C; ◆ sector D.

Em análise, é possível ver que os resultados obtidos via um programa de cálculo numérico não variam muito dos resultados obtidos via experimental. Assim está provada validade deste método.

5-Discussão dos resultados

Neste capítulo apresentamos e discutimos os resultados das simulações numéricas efectuadas. Para cada valor da espessura do leito de apara (ζ) varia-se a excentricidade do cilindro interior (ε) até 90%, o número de Taylor (Ta) até 50 000, a razão de raios entre os cilindros interior e exterior (K) até 0,8 e o ângulo de posição angular do leito de apara (Θ) até 75°.

A seguir, algumas amostras exemplificativas do comportamento do escoamento em diversas situações serão alvo de análise, com principal atenção para a evolução da perda de carga $f.Re$, mas também serão analisadas as variações da velocidade axial com o aumento da razão de raios entre (K), da excentricidade (ε), número de Taylor (Ta), espessura do leito de apara (ζ) e do ângulo do leito de apara (Θ).

5.1- Estudo da velocidade axial

A velocidade axial pode ser alterada ou não consoante as alterações que são executadas relativamente a determinados parâmetros. Neste capítulo, complementa-se o estudo de Rocha (2010) sobre a evolução das características de escoamentos em condutas anelares para diferentes excentricidades, razões de raios, velocidade de rotação do cilindro interior, espessuras do leito de apara e posição angular do mesmo e analisar os seus efeitos na distribuição da velocidade.

À partida, todos estes parâmetros influenciam o escoamento uma vez que a maioria deles mexe com a geometria da conduta ou, no caso da rotação do cilindro interior estamos a introduzir velocidades radiais e tangenciais ao escoamento.

Os cálculos serão feitos para as secções A, B, C e D ilustradas na Figura 5.1

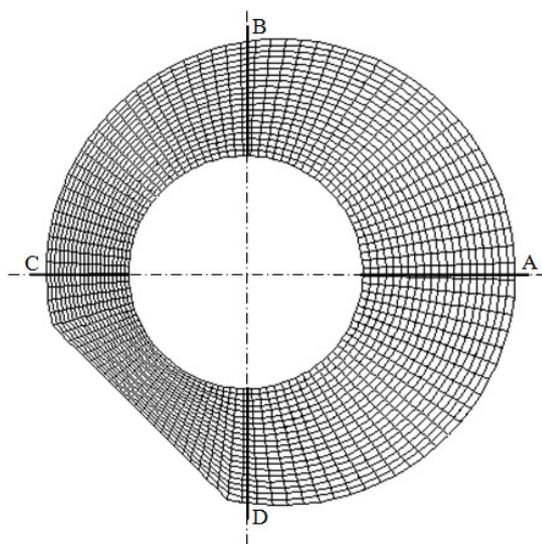


Figura 5.1: Ilustração dos sectores onde se mediram as velocidades axiais.

Efeito da excentricidade na distribuição axial de velocidades

A excentricidade, embora não traga alterações ao valor do diâmetro hidráulico, causa uma assimetria na conduta, responsável pelas alterações registadas da velocidade axial.

Esta assimetria provoca com o aumento da excentricidade, uma menor distância do cilindro interior relativamente à parede do poço nos sectores B, C e D e consequentemente o contrário se regista no sector A.

Assim, podemos ver que com o aumento da excentricidade verifica-se no sector A um aumento da velocidade máxima, e nos restantes sectores verifica-se exactamente o oposto. Note que todas as curvas são simétricas, registando-se velocidade nula junto às paredes da conduta e que para uma excentricidade de 0,8 a velocidade é nula no sector C como ilustra a Figura 5.2.

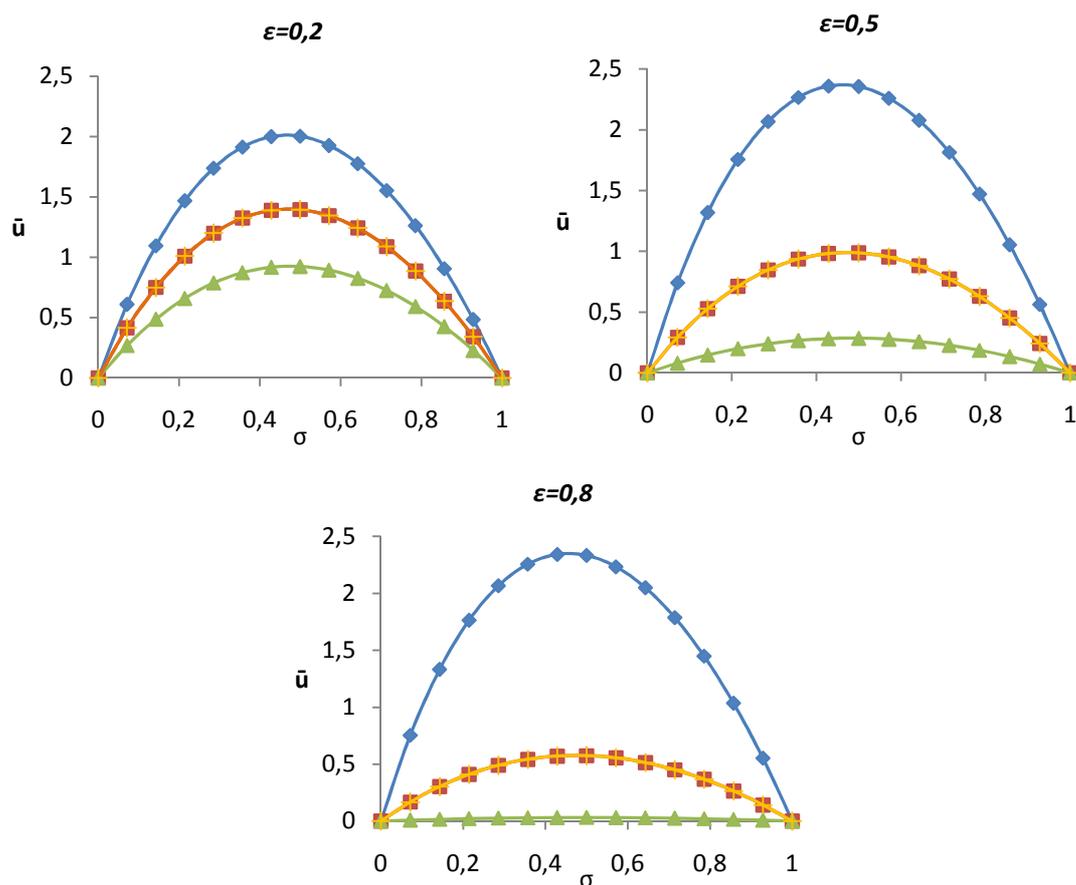


Figura 5.2: Distribuições de velocidades axiais $\bar{u}(\sigma)$ para condutas anelares com $K=0,5$, $\zeta=0$, $Ta=0$ e crescentes excentricidades. \blacklozenge Sector A; \blacksquare Sector B; \blacktriangle Sector C; \blackplus Sector D.

A figura que se segue representa as isolinhas de velocidade axial para os escoamentos representados na Figura 5.2. Esta é uma perspectiva de mais fácil compreensão de como varia a velocidade axial e a partir desta figura, podemos provar mais uma vez tudo o que foi dito anteriormente quando fizemos a análise da Figura 5.2. Repare mais uma vez que para excentricidades elevadas como a representada na Figura 5.3 (C), o escoamento na secção C é quase inexistente.

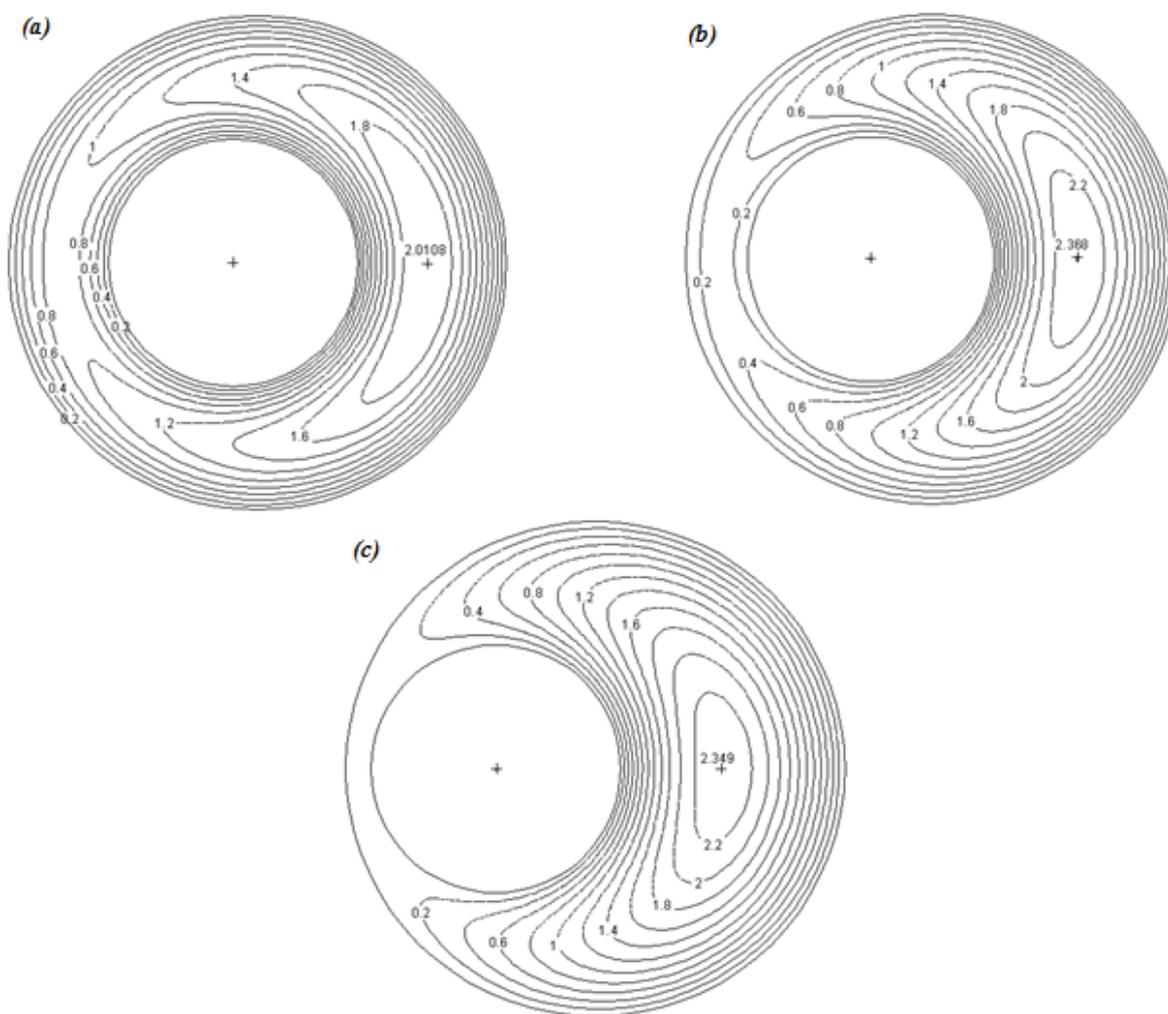


Figura 5.3: Isolinhas de velocidade axial adimensional $\bar{u}(\bar{r}, \sigma)$ para condutas com a razão de raios $K=0,5$, sem leito de aparas, sem rotação do cilindro interior e com as crescentes excentricidades *a*) $\varepsilon=0,2$, *b*) $\varepsilon=0,5$, *c*) $\varepsilon=0,8$.

Efeito da profundidade do leito de aparas na distribuição axial de velocidades

O leito de para trás também alterações à geometria e como tal na velocidade axial. Podemos ver na Figura 5.4, quais as verdadeiras consequências da formação de um leito de para relativamente à velocidade. Em análise, é notório que com o crescimento de ξ , a velocidade axial nos diferentes sectores aumenta excepto no sector C, mas não altera a simetria das curvas. Isto deve-se à diminuição da distância entre a parede da conduta e do cilindro interior no sector C.

E mais uma vez, a par do que acontece para grandes excentricidades como vimos anteriormente, também para elevados valores de ξ não existe escoamento no sector C.

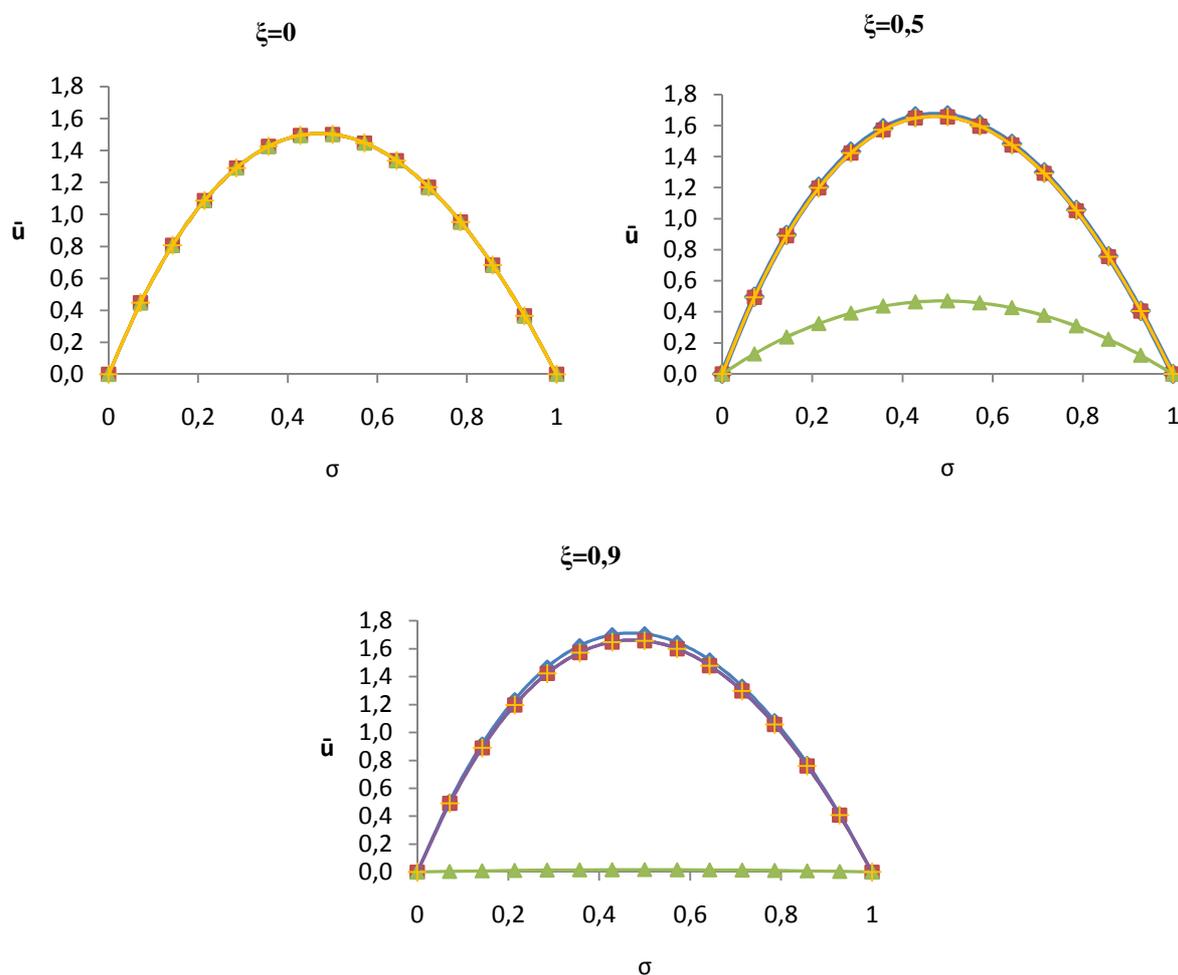


Figura 5.4: Distribuições de velocidades axiais $\bar{u}(\sigma)$ para condutas anelares com $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $Ta=0$ e crescentes profundidades do leito de aparas: \blacklozenge Sector A; \blacksquare Sector B; \blacktriangle Sector C; \blackplus Sector D

A Figura 5.5 é um reflexo da Figura 5.4, mas a velocidade aqui é apresentada a partir de isolinhas de velocidade. Tornam-se aqui mais visíveis as alterações provocadas pela formação do leito de aparas à geometria e a inexistência de escoamento no sector C para $\zeta=0,8$.

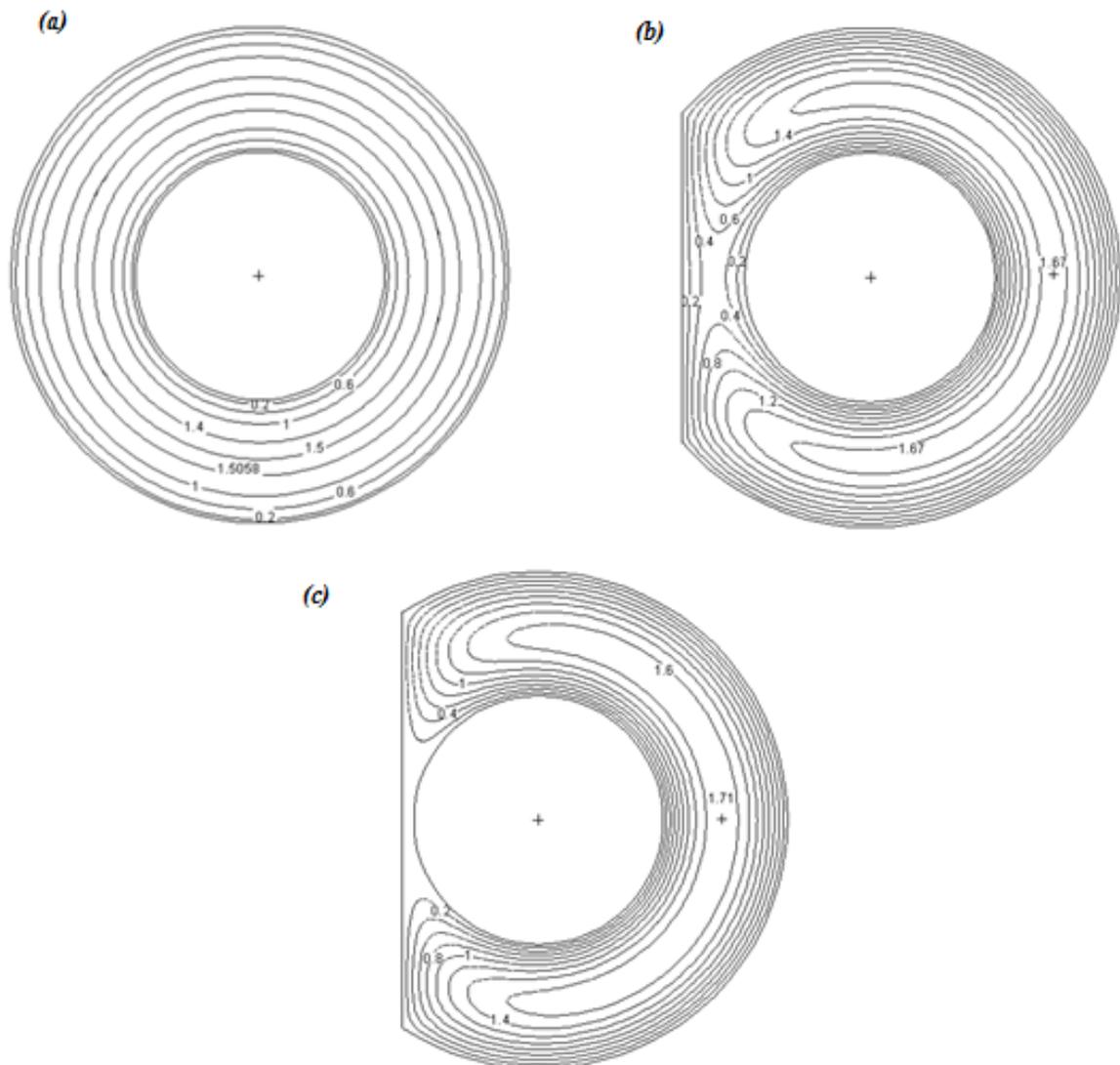


Figura 5.5: Isolinhas de velocidade axial adimensional $\bar{u}(\bar{r}, \sigma)$ para a razão de raios $K=0,5$, sem rotação do cilindro interior, sem excentricidade e para crescentes profundidades do leito de aparas: (a) $\zeta=0$, (b) $\zeta=0,5$, (c) $\zeta=0,9$.

Efeito da rotação do leito de aparas na distribuição axial de velocidades

Vejam os agora como varia a velocidade axial nos diferentes sectores estabelecidos na Figura 5.1 com a rotação do leito de aparas para três ângulos diferentes, mantendo a excentricidade e a velocidade de rotação nulas e a razão de raios e a espessura do leito de aparas igual a 0,5.

Na Figura 5.6 estão os resultados obtidos, e sem surpresas, verifica-se para os sectores A e B curvas iguais de velocidade axial, para qualquer que seja o ângulo escolhido. Mas, analisando a situação mais detalhadamente para cada ângulo de rotação temos, para $\theta=45^\circ$ curvas iguais de velocidade para os sectores C e D, no entanto regista-se uma velocidade inferior ao registado nos sectores A e B. Quando rodamos para $\theta=75^\circ$, as curvas de velocidade são iguais nos sectores A, B e C e quanto ao sector D, devido à menor distância entre o cilindro interior e a parede do poço, temos velocidades muito inferiores. Semelhante situação temos quando não existe rotação do leito de aparas, mas desta vez o sector onde se regista uma descida drástica da velocidade, exactamente pelo mesmo motivo, é no sector C.

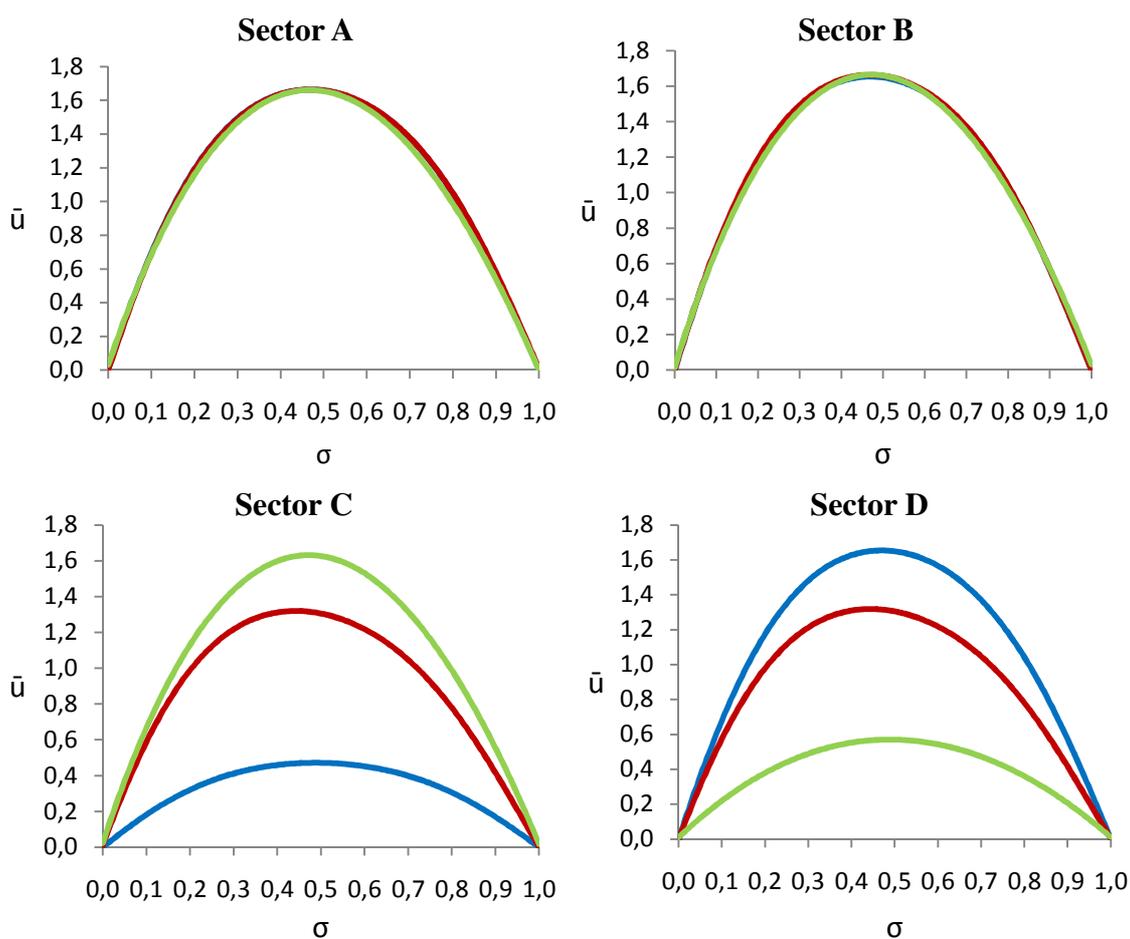


Figura 5.6: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $\zeta=0,5$, $Ta=0$ e com crescentes posições angulares de ζ : — $\theta=0^\circ$ — $\theta=45^\circ$ — $\theta=75^\circ$

Como podemos ver na Figura 5.7 o facto de introduzir rotação do leito de aparas numa conduta anelar concêntrica, não traz alterações nenhuma ao escoamento. Basicamente o que nós fizemos ao rodar o leito de aparas foi, medir a velocidade axial em 12 sectores diferentes, uma vez que não se alteraram as posições onde foram feitas as medições, mas alterou-se a rotação do leito de aparas. Assim, alterando a rotação do leito de aparas, por si só não introduz alterações no escoamento.

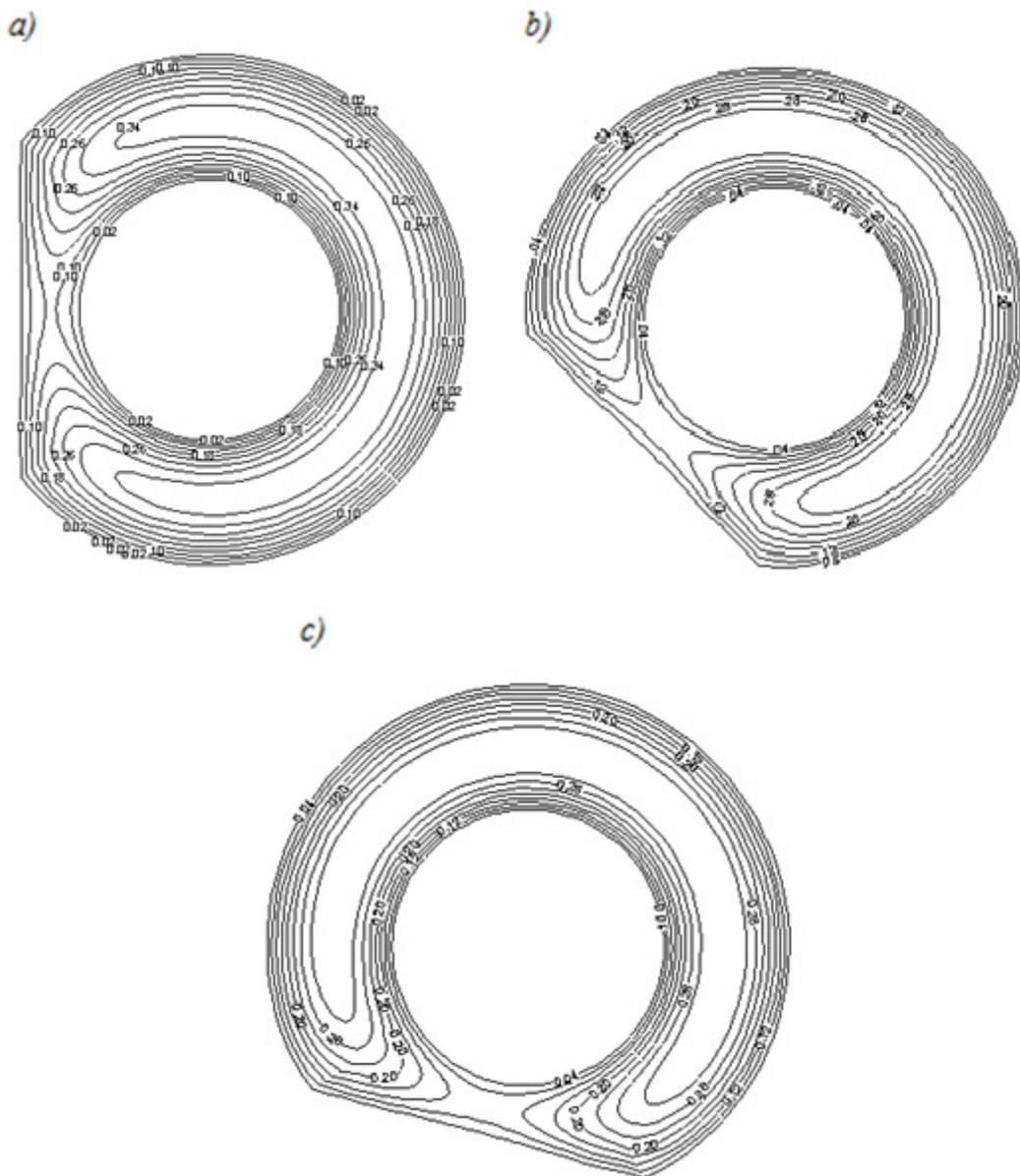


Figura 5.7: Isolinhas de velocidade axial adimensional \bar{u} para a razão de raios $K=0,5$, sem rotação do cilindro interior, sem excentricidade, com $\zeta=0,5$ e crescentes valores de θ : a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=45^\circ$, c) $\theta=75^\circ$

Efeito da velocidade de rotação do cilindro interior na distribuição axial de velocidades

Mais uma vez, os sectores mais afectados, são os sectores que sofrem influência directa do leito de apara (sectores C e D) e são os sectores onde existe uma maior variação das curvas de velocidade axial. A rotação do cilindro interior introduz um segundo escoamento com velocidades tangenciais e radiais que provocam alterações no perfil de velocidades axiais. Assim, as curvas obtidas deixam de ser simétricas, chagando a ter uma evolução menos uniforme como se regista no sector D. Podemos então dizer que com o aumento da velocidade de rotação e do leito de apara, são criadas zonas mais instáveis como as demonstradas no sector D.

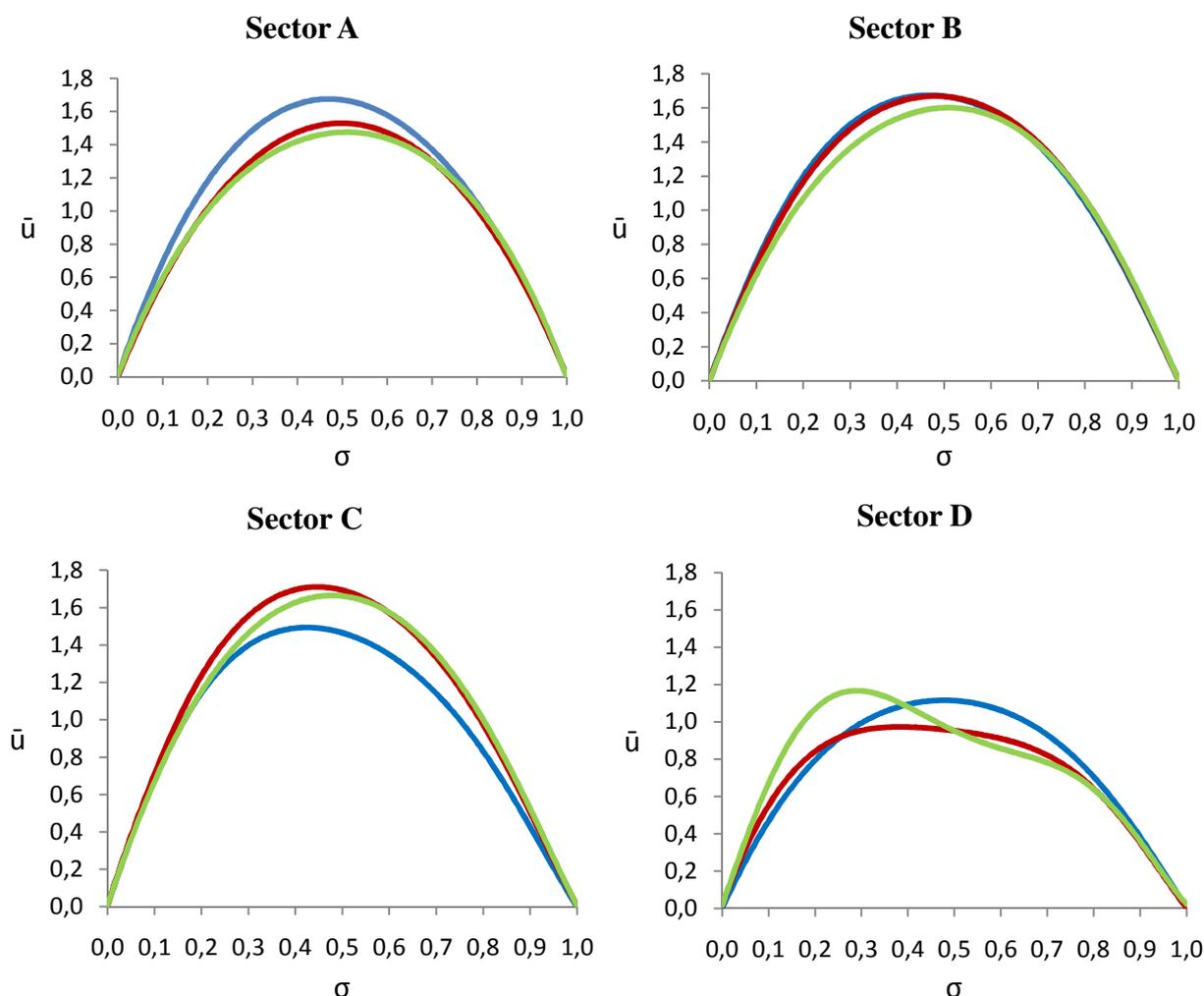


Figura 5.8: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0$, $\zeta=0,5$, $\Theta=45^\circ$ e com crescentes valores de Ta : $\color{blue}\blacktriangleleft Ta=100$ $\color{red}\blacktriangleleft Ta=5000$ $\color{green}\blacktriangleleft Ta=50000$

Segundo as isolinhas de velocidade, podemos extrair informação extra, imperceptível a partir da leitura do gráfico da Figura 5.8. Vejamos a Figura 5.9 onde podemos ver que as isolinhas de velocidade são transladadas no sentido da rotação. Assim para velocidades baixas existe, a meio do leito de aparas, uma zona onde praticamente não se dá o escoamento como mostra a Figura 5.9 (a). Quando aumentamos a velocidade de rotação, essa zona translada para a região do sector D, mas uma vez que a distância entre o cilindro interior e a parede do poço neste sector é maior, o escoamento ocorre, mas com grandes oscilações da velocidade axial.

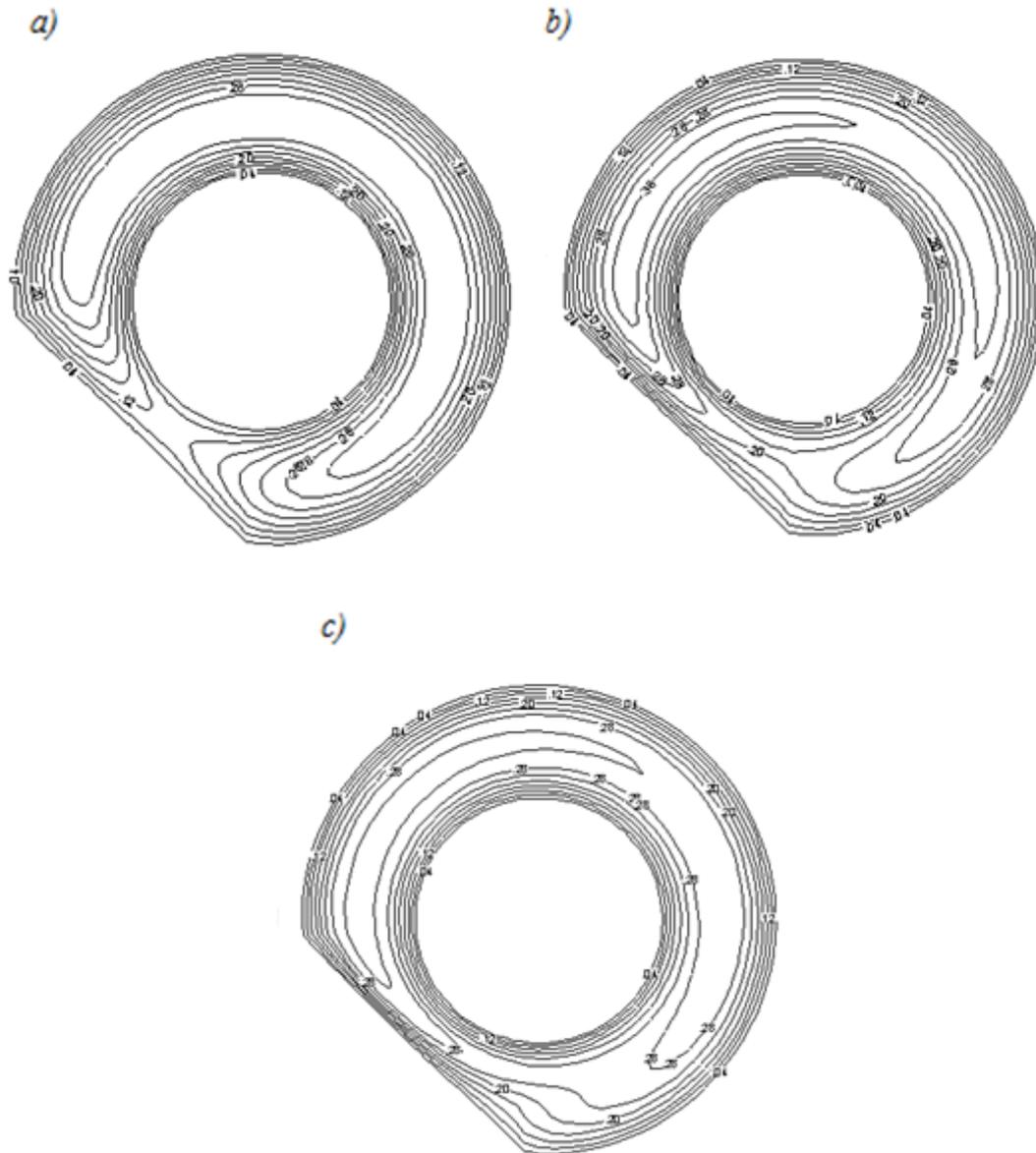


Figura 5.9: Isolinhas de velocidade axial adimensional \bar{u} para a razão de raios $K=0,5$, $\Theta=45^\circ$, sem excentricidade, com $\zeta=0,5$ e crescentes valores de Ta : a) $Ta=100$, b) $Ta=5000$, c) $Ta=50000$

Efeito da profundidade e da rotação do leito de aparas num escoamento ao longo de uma conduta anelar com excentricidade e rotação do cilindro interior

É nesta análise que vamos poder ver os verdadeiros efeitos da rotação do leito de aparas, uma vez que as alterações na geometria provocadas pela rotação deste, só existem quando também existe excentricidade. Observando a Figura 5.10, podemos ver o aumento da velocidade registada no sector A, uma vez a distância entre as duas paredes foi aumentada. Já no sector B, a excentricidade trás uma diminuição dessa distancia e conseqüentemente uma menor velocidade axial. Juntando a isso o leito de aparas, é possível que nas secções mais afectadas pelo leito de aparas apresentem velocidades axiais inferiores. O efeito da rotação é visível pela assimetria apresentada pelas curvas.

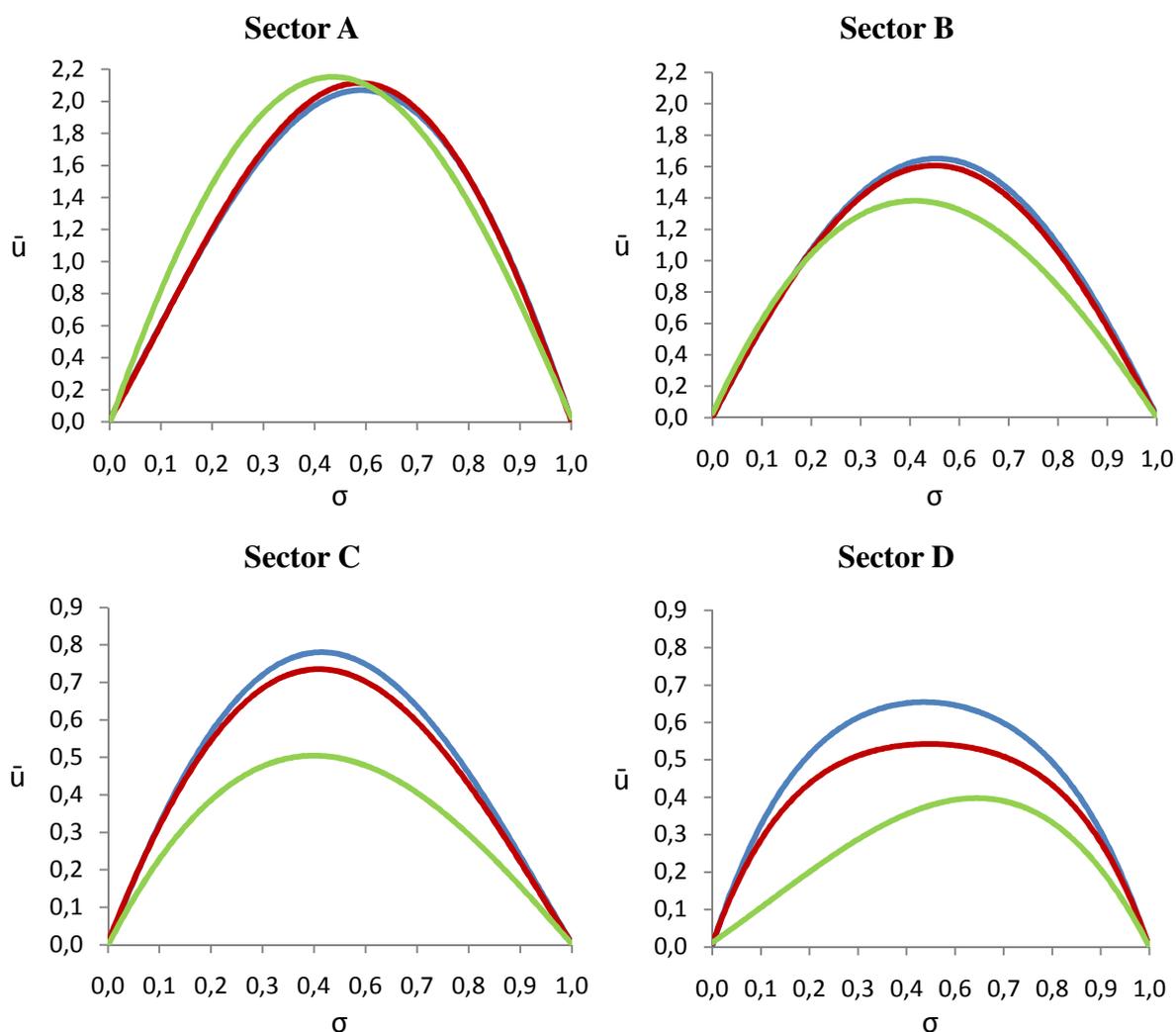


Figura 5.10: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$, $\theta=45^\circ$ e com crescentes valores de ξ : — $\xi=0,1$ — $\xi=0,2$ — $\xi=0,4$

A partir das isolinhas de velocidade é possível constatar tudo o que já falamos. Podemos ver aqui que para espessuras do leito de apara elevadas, onde o leito de apara esta muito próximo do cilindro interior, existem zonas onde quase não se dá o escoamento, ou onde o escoamento é mesmo inexistente.

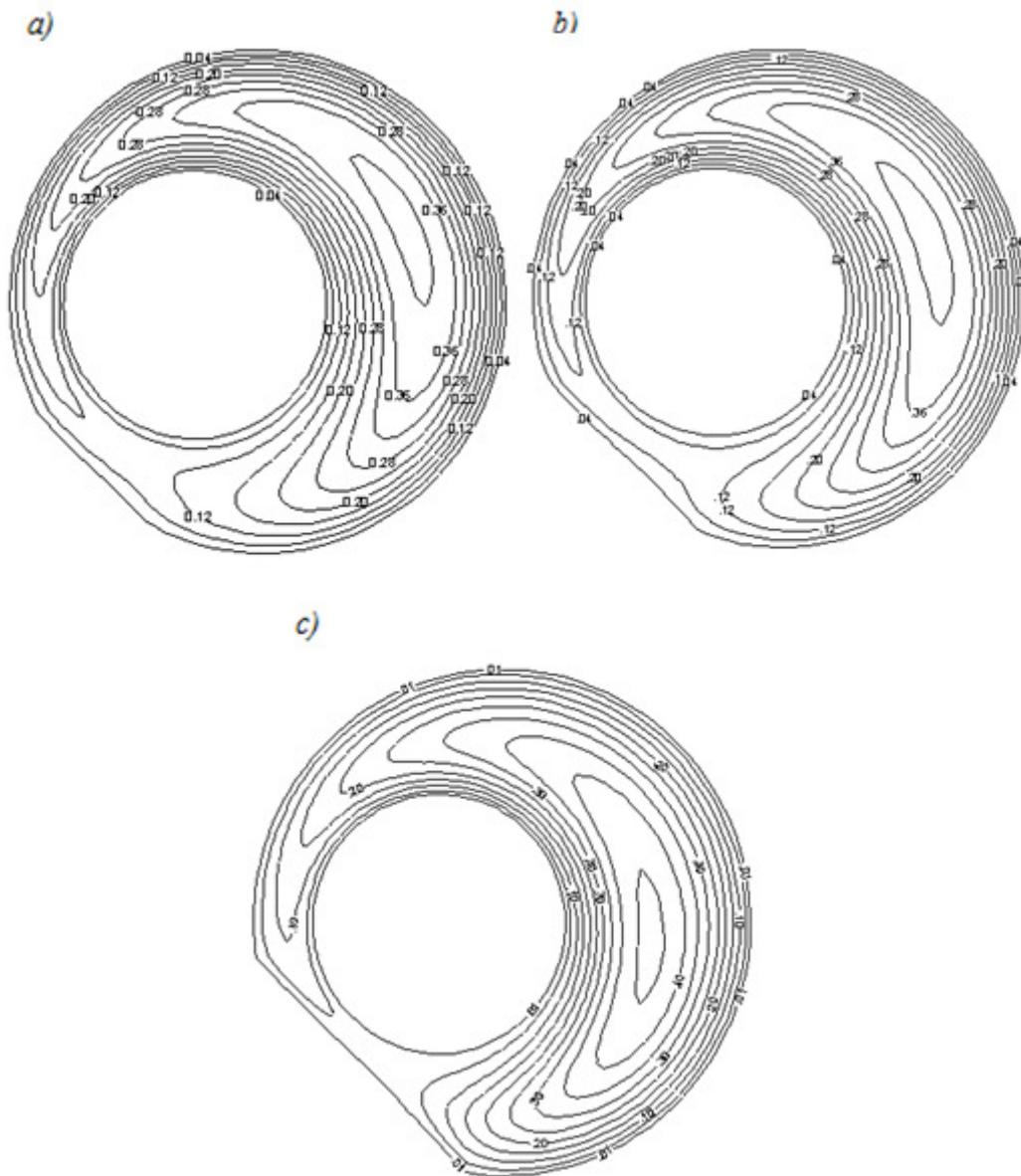


Figura 5.11: Isolinhas de velocidade axial adimensional \bar{u} para a razão de raios $K=0,5$, $\theta=45^\circ$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$ e crescentes valores de ζ : a) $\zeta=0,1$, b) $\zeta=0,2$, c) $\zeta=0,4$

Na Figura 5.10 temos os resultados para $\theta=45$ e agora vamos comparar esses mesmos resultados com os da Figura 5.12 ($\theta=75$) e ver quais as verdadeiras consequências da rotação do leito de apara nas curvas de velocidade axial. Feita a análise, podemos dizer que a rotação do leito de apara vem uniformizar mais o escoamento. Vejamos as curvas obtidas e reparem que existe uma diminuição contínua da velocidade máxima desde o sector A até ao sector D. Isto acontece porque, com a excentricidade e com a rotação do leito de apara, existe uma diminuição da distância entre as duas paredes de sector para sector até a meio do leito de apara (aproximadamente no sector D), a partir de onde essa mesma distância começa a aumentar até ao sector A.

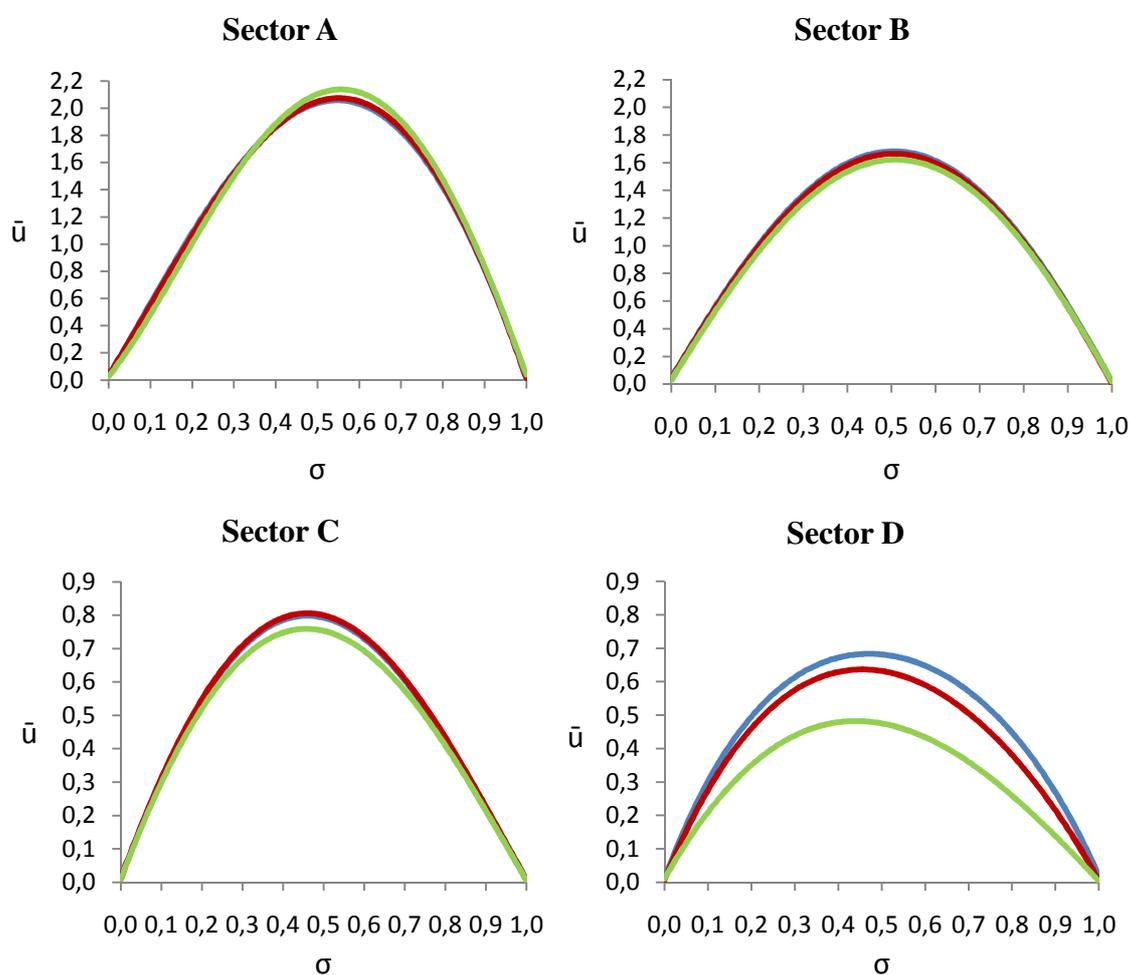


Figura 5.12: Distribuição da velocidade axial para condutas anelares com: $K=0,5$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$, $\theta=75^\circ$ e com crescentes valores de ζ : — $\zeta=0,1$ — $\zeta=0,2$ — $\zeta=0,4$

Essa uniformidade é mais notória quando comparamos os gráficos com as isolinhas de velocidade. Existe assim um escoamento mais suave, sem grandes oscilações de velocidade e onde o escoamento se dá por toda a secção ao contrário do que aconteceu anteriormente como ilustra a Figura 5.11 (C).

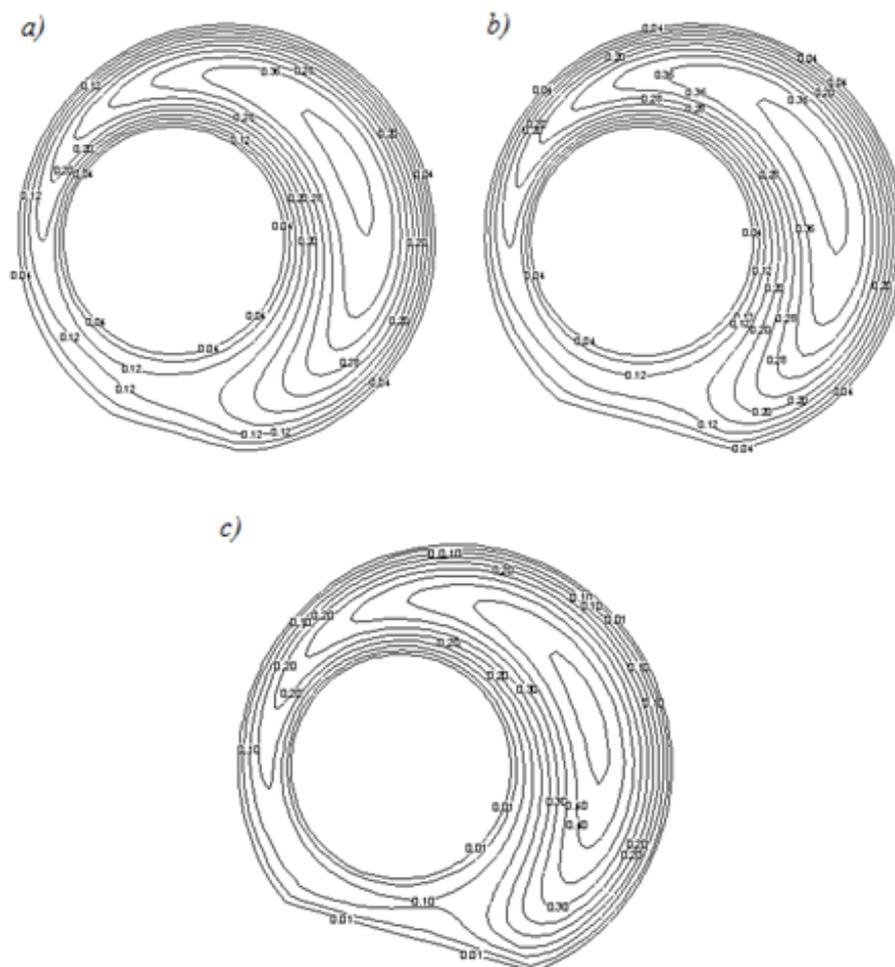


Figura 5.13: Isolinhas de velocidade axial adimensional \bar{u} para a razão de raios $K=0,5$, $\theta=75^\circ$, $\varepsilon=0,5$, $Ta=10000$ e crescentes valores de ζ : a) $\zeta=0,1$, b) $\zeta=0,2$, c) $\zeta=0,4$

5.2- Estudo da evolução de $f.Re$

O estudo, efectuado pela via numérica, analisa os efeitos da razão de raios, da excentricidade da conduta anelar, da velocidade de rotação da coluna de perfuração, da espessura do leito de apara e da sua posição angular.

A seguir, algumas amostras exemplificativas do comportamento do escoamento em diversas situações serão alvo de análise, com principal atenção para a evolução da perda de carga $f.Re$ com a variação dos parâmetros escritos atrás.

Estudo da perda de carga variando a excentricidade (ε) para os diferentes valores de K e espessura do leito de apara (ξ)

A alteração de determinadas variáveis como K e ξ causa alterações importantes na conduta que influenciam a resistência do fluido ao escoamento.

Como vimos anteriormente relativamente ao aumento de leito de apara este traz uma diminuição do perímetro hidráulico, ao contrário de K e, relativamente à área onde

se processa o escoamento, o contínuo crescimento das duas variáveis provocam uma diminuição da mesma. É óbvio que com uma diminuição garantida da área e consequentes variações do perímetro hidráulico ocorrem alterações na velocidade do escoamento com consequências ao nível da perda de carga expressa a partir dos valores de $f.Re$ analisados com mais pormenor a seguir.

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de K e para $\xi=20$

Com base na análise dos resultados abaixo na Figura 5.14 salta logo à vista o facto que, para qualquer que seja a razão de raios (K) a perda de carga tem tendência para diminuir com o aumento da excentricidade. Mas numa análise mais profunda existe pormenores a destacar: para Taylor igual a 1000 e 5000 e excentricidades até $\pm 0,4$ o valor de $f.Re$ é maior quanto maior for K , e para excentricidades superiores a 0,4 é sensivelmente igual para qualquer valor deste. Nota ainda que para excentricidades até 0,4 os valores registados de $f.Re$ para K igual a 0,2 são bem inferiores aos registados para K igual a 0,5 e 0,8. Para todos os números de Taylor existe uma semelhança muito grande no comportamento do escoamento para K igual a 0,5 e 0,8 e aumentando o número de Taylor, o valor da excentricidade para o qual se começa a registar uma diminuição de $f.Re$ aumenta também.

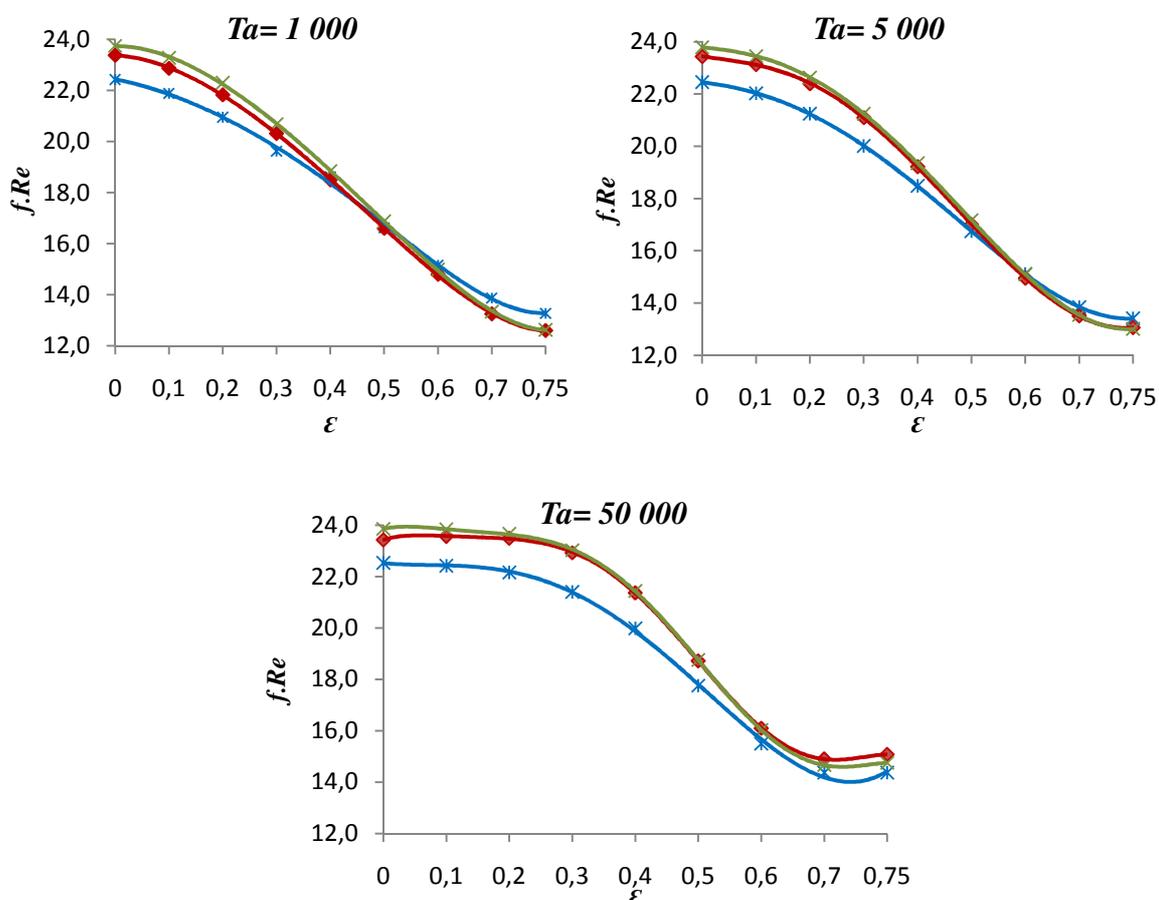


Figura 5.14: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de k com $\xi=0,2$ e $\theta=15^\circ$: * $K=0,2$ ♦ $K=0,5$ × $K=0,8$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de K e para $\xi=0,4$

Neste caso, para ξ igual a 0,4 é possível retirar daqui quais conclusões relativamente aos verdadeiros efeitos da alteração do valor de K . As curvas são praticamente paralelas e quanto maior o valor da razão de raios (K) maior será o valor de $f.Re$. Nota-se que para a mesma excentricidade e mesmo K , o valor da perda de carga aumenta com o aumento da velocidade de rotação e que para $Ta=50000$ e para baixas excentricidades, os valores da perda de carga para K igual a 0,5 e 0,8 são muito idênticos.

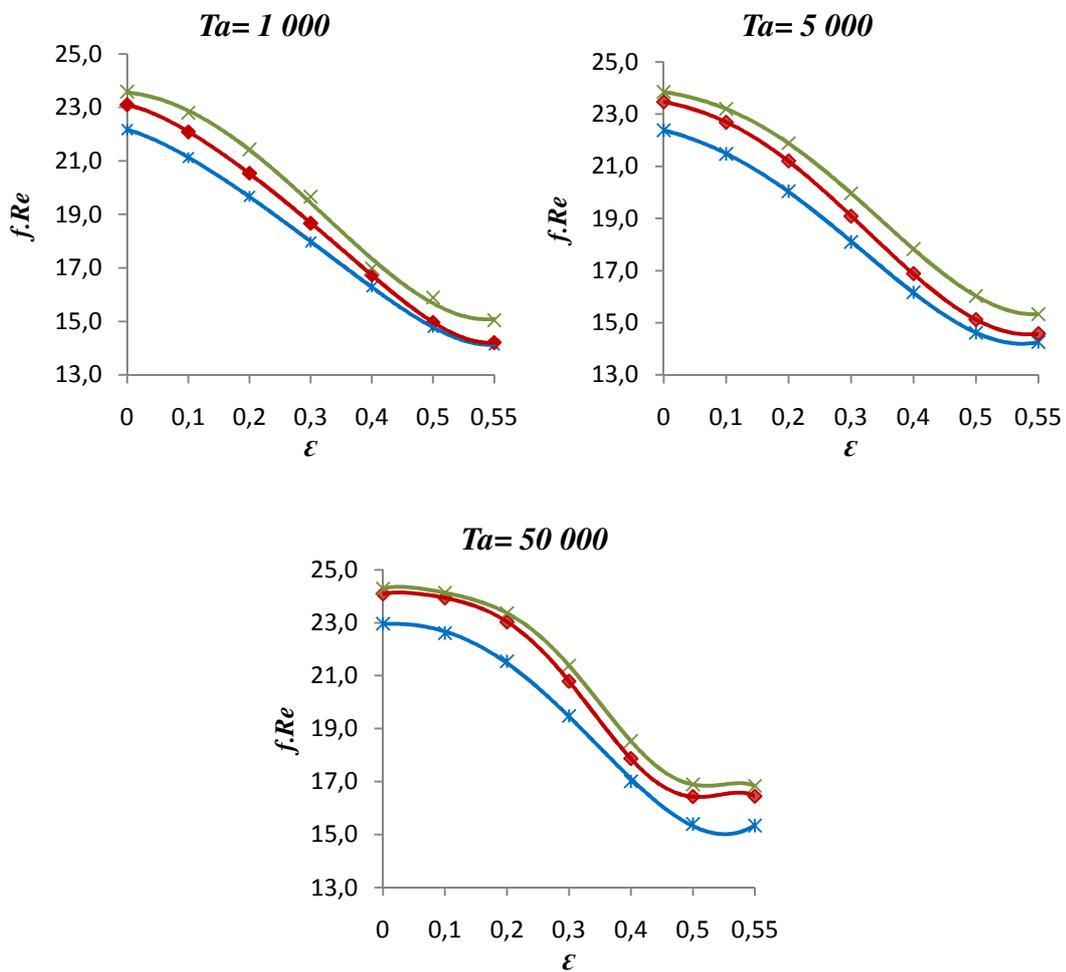


Figura 5.15: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de K , com $\xi=0,4$ e $\theta=15^\circ$: * $K=0,2$ * $K=0,5$ * $K=0,8$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de K e para $\xi=0,7$

A prova de que o aumento da razão de raios provoca uma subida no valor da perda de carga é agora mais evidente na figura a baixo, mas o mais importante e que é comum em todos os resultados obtidos, é o facto de que para cada excentricidade, altura do leito de aparas e razão de raios, o aumento do número de Taylor induz um aumento no valor de $f.Re$ (assunto este que será demonstrado com mais evidencia mais à frente). Também se mantém o decréscimo de $f.Re$ com o aumento de ε , independentemente do numero de Taylor e do valor de K .

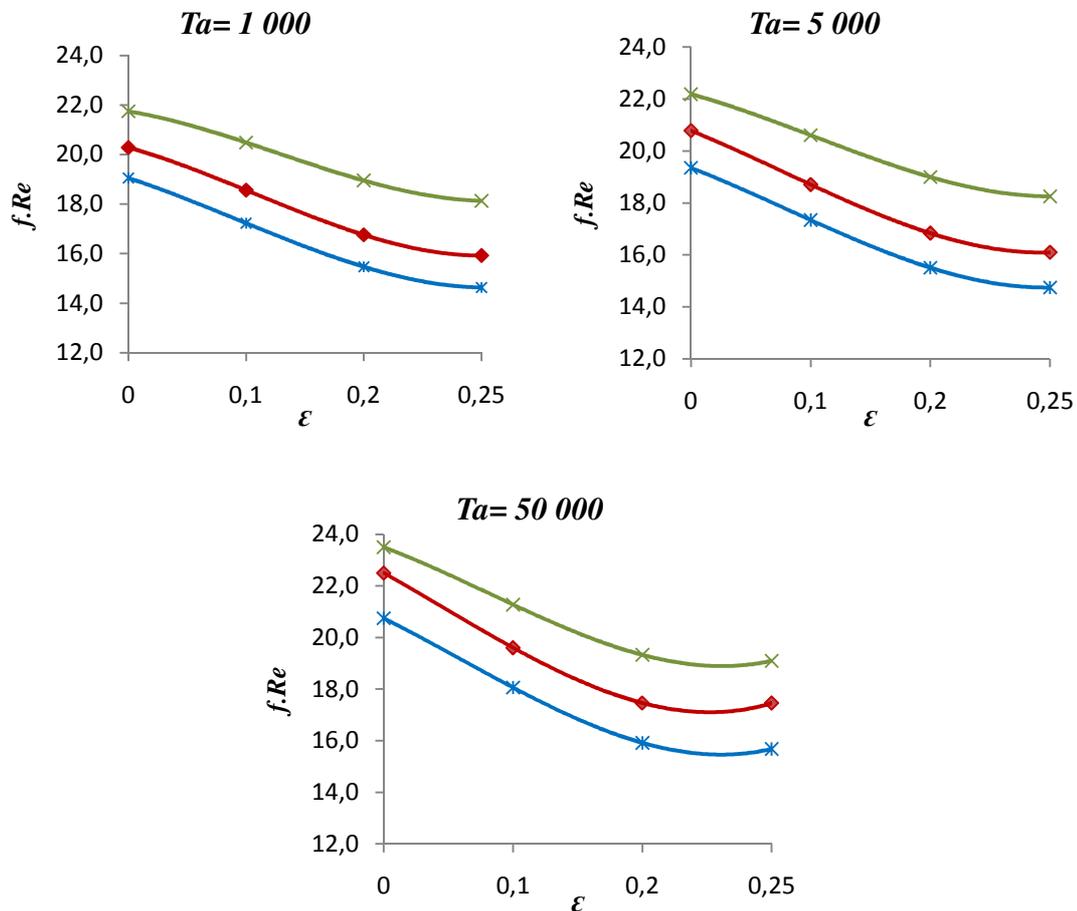


Figura 5.16: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de K com $\xi=0,7$ e $\Theta=15^\circ$: \ast $K=0,2$ \blacklozenge $K=0,5$ \times $K=0,8$

Estudo da evolução da perda de carga do escoamento variando a excentricidade (ε) para os diferentes valores de Ta e espessura do leito de apara (ξ)

O aumento do número de Taylor implica uma maior velocidade de rotação do cilindro interior responsável por um segundo escoamento com velocidades tangenciais e radiais. O estudo incide agora na influência da velocidade de rotação do cilindro interior na perda de carga existente ao longo do escoamento variando a excentricidade e a altura do leito de apara. Aqui coloquei alguns resultados que exemplificam então, qual o efeito no valor de $f.Re$ deste parâmetro.

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=0,2$

Como podemos ver na Figura 5.17 o aumento da velocidade de rotação tem como efeito aumentar a perda de carga, mas continua-se a verificar a diminuição de $f.Re$ com o aumento de ε , ao contrário do que acontece com o aumento de K . É interessante ver que para velocidades de rotação pequenas, essa variação é quase linear. Mas para $Ta=50000$ esse comportamento deixa de ser linear e o factor $f.Re$ permanece elevado para excentricidades até cerca de 0,3, valor a partir do qual decai acentuadamente.

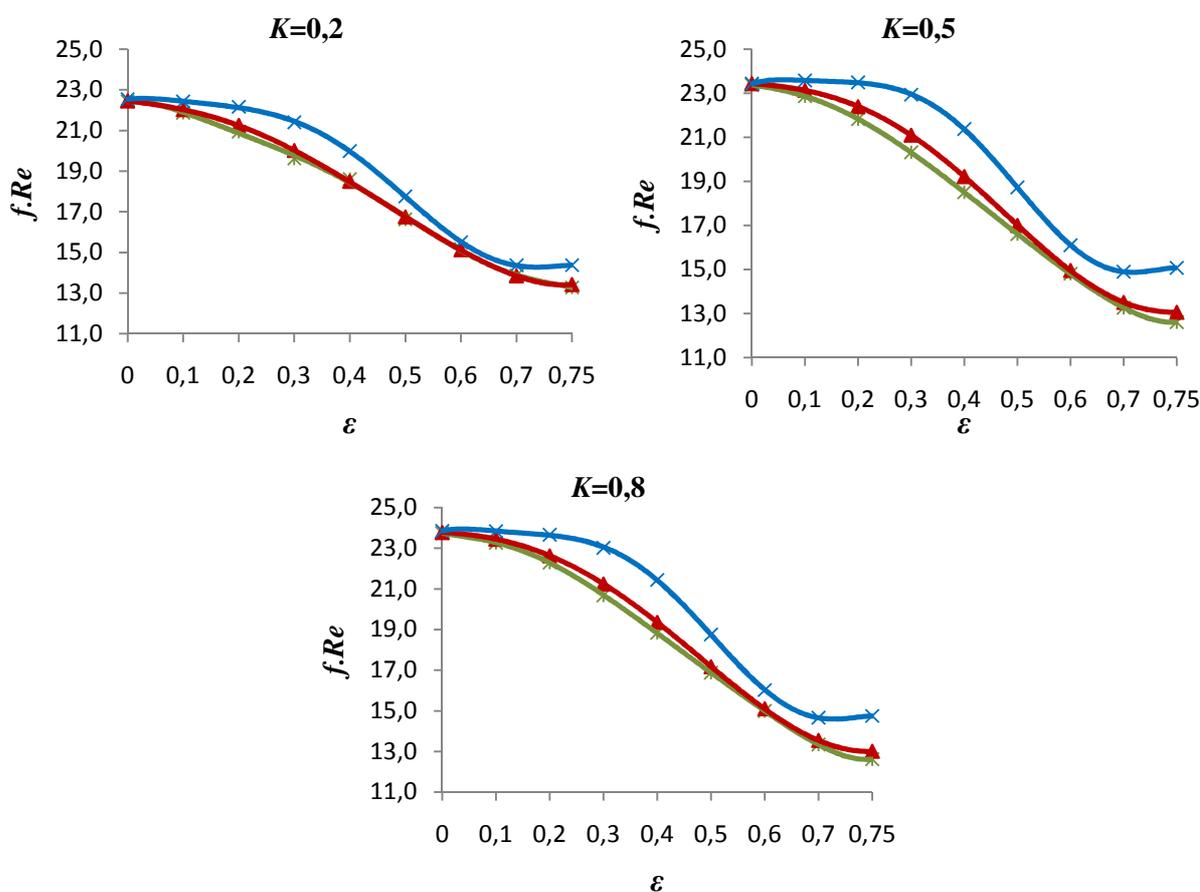


Figura 5.17: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\xi=0,2$ e $\theta=15^\circ$: * $Ta=1000$ ▲ $Ta=5000$ × $Ta=50000$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=0,4$

Para $\xi=0,4$, a evolução do valor da perda de carga para crescentes excentricidades evoluiu de forma semelhante ao registado para $\xi=0,2$, continuando a verificar-se uma diminuição da perda de carga com o aumento da excentricidade, ao contrário do que acontece com K e com o número de Taylor.

As curvas são relativamente lineares excepto para $Ta=50000$. O crescimento do parâmetro K faz crescer o valor de $f.Re$ e a forma das curvas, apresentando um declive baixo para excentricidades entre $0 < \varepsilon < 0,2$ e $0,5 < \varepsilon < 0,55$ e para os restantes valores de excentricidade os declives são mais acentuados.

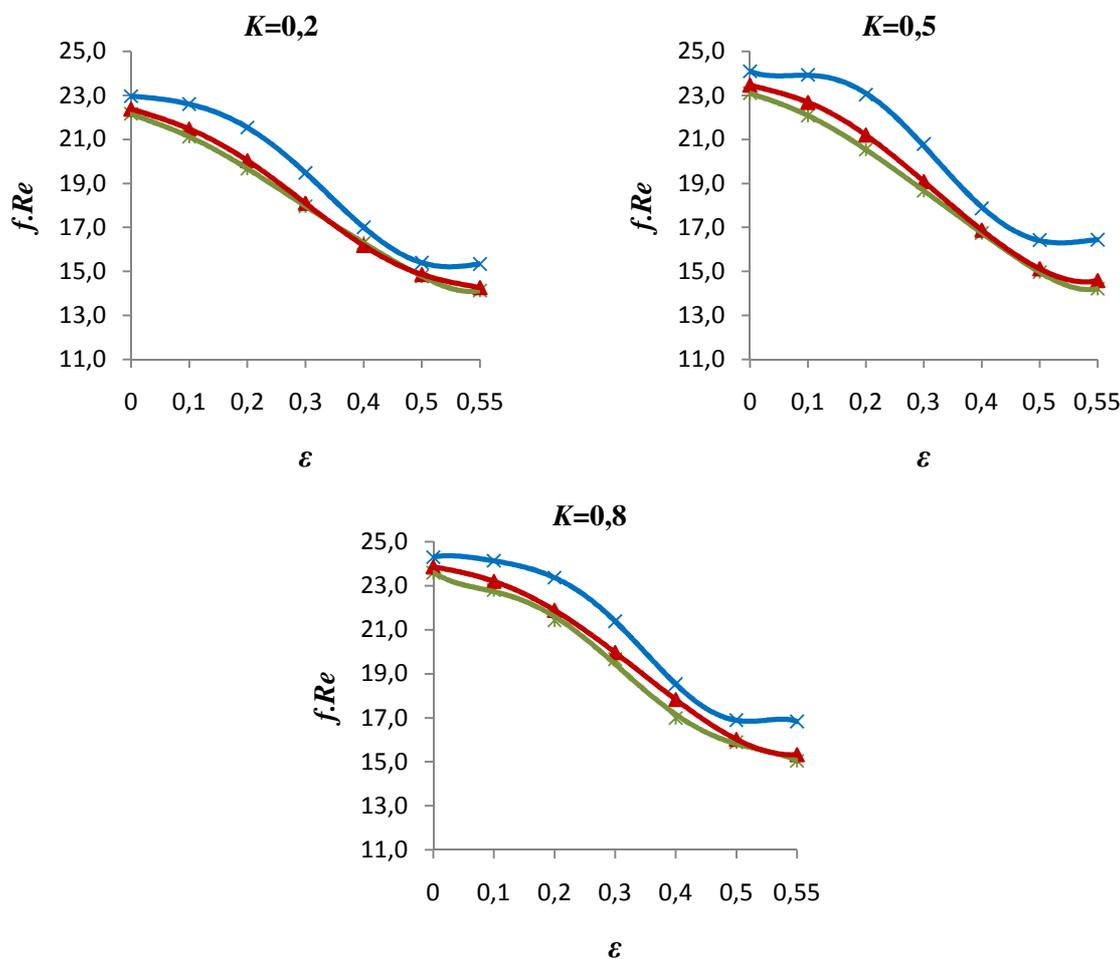


Figura 5.18: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\xi=0,4$ e $\theta=15^\circ$: * $Ta=1000$ ▲ $Ta=5000$ × $Ta=50000$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de Ta e para $\xi=0,7$

Para este caso temos apenas 4 pontos por cada número de Ta , correspondente às excentricidades que permitem ter um escoamento de forma a que não exista contacto entre o leito de apara e o cilindro interior. Mas mesmo tendo poucos dados, os resultados que obtivemos para $\xi=0,7$, expressos na Figura 5.19, mostram também a tal linearidade para velocidades de rotação baixas e o aumento do valor de $f.Re$ com o aumento de Ta e K .

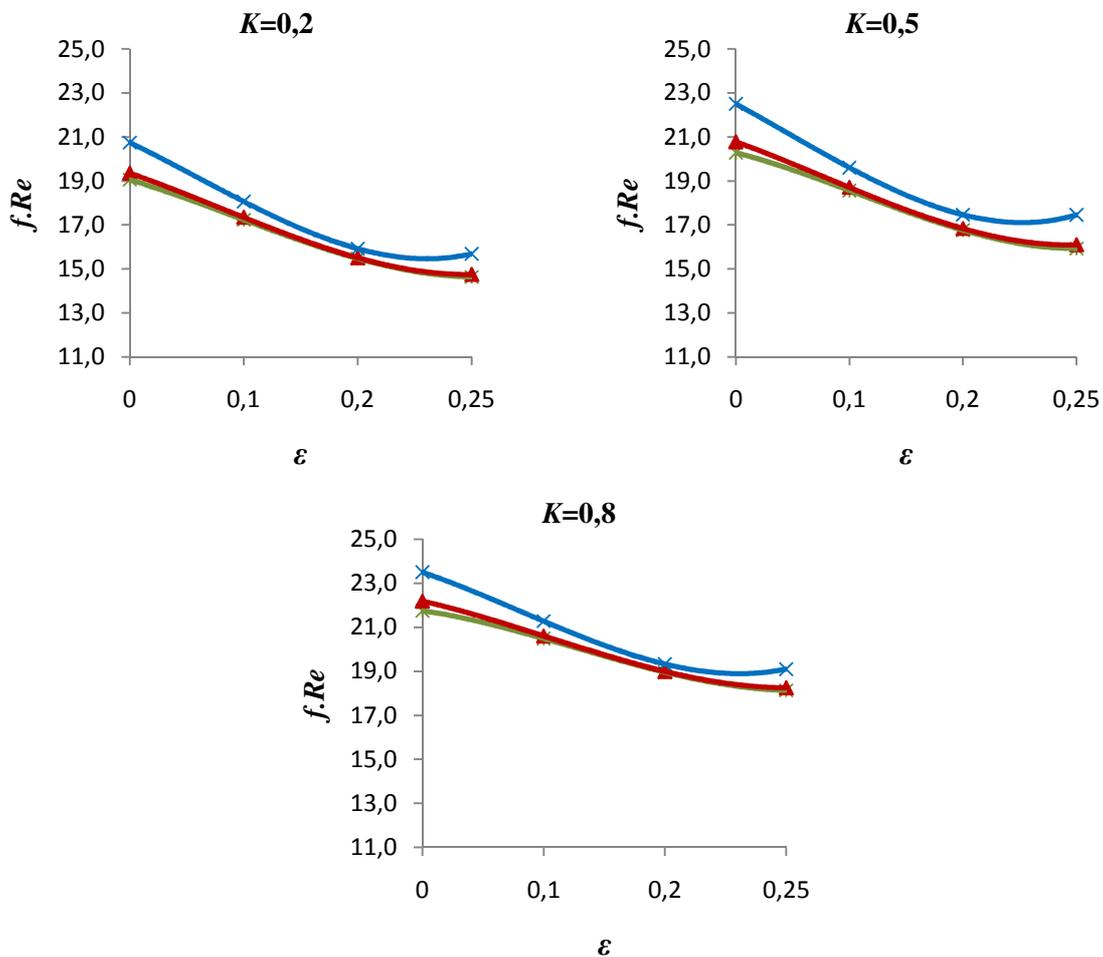


Figura 5.19: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de Ta com $\xi=0,7$ e $\theta=15^\circ$: * $Ta=1000$ ▲ $Ta=5000$ × $Ta=50000$

Estudo da evolução de $f.Re$ do escoamento variando a excentricidade (ε) para os diferentes valores de θ e espessura do leito de apara (ξ)

Esta problemática é de certa forma a novidade neste tipo de estudos. Como disse anteriormente, a influência de parâmetros como da excentricidade (ε), a razão de raios entre o cilindro interior e o exterior (K) e a velocidade de rotação (Ta), já foram

estudados no trabalho de Escudier e tal. (2000) e mais recentemente a influência da existência do leito de apara Rocha (2010), mas a influência da rotação do leito de apara, ainda não.

A introdução deste parâmetro surge uma vez que trabalhamos com uma conduta anelar onde existe rotação do cilindro interior, e onde faz todo sentido que os sedimentos constituintes do leito de apara, com o aumento da velocidade de rotação do cilindro interior se depositem desviados um ângulo θ da posição original.

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\xi=0,2$

Na Figura 5.20 estão apenas os resultados obtidos para $Ta= 10000$ e $Ta=50000$, uma vez que são os únicos que permitem ver qual o comportamento do escoamento com o evoluir de θ . Também me limitei a colocar aqui os resultados para $K=0,5$, já que para os outros valores de K a rotação do leito de apara tem efeitos muito semelhantes.

Dos resultados apresentados podemos ver um aumento da perda de carga com o aumento de θ para a mesma excentricidade e que para $\theta=15^\circ$ e $\varepsilon >0,7$ existe um aumento no valor de $f.Re$.

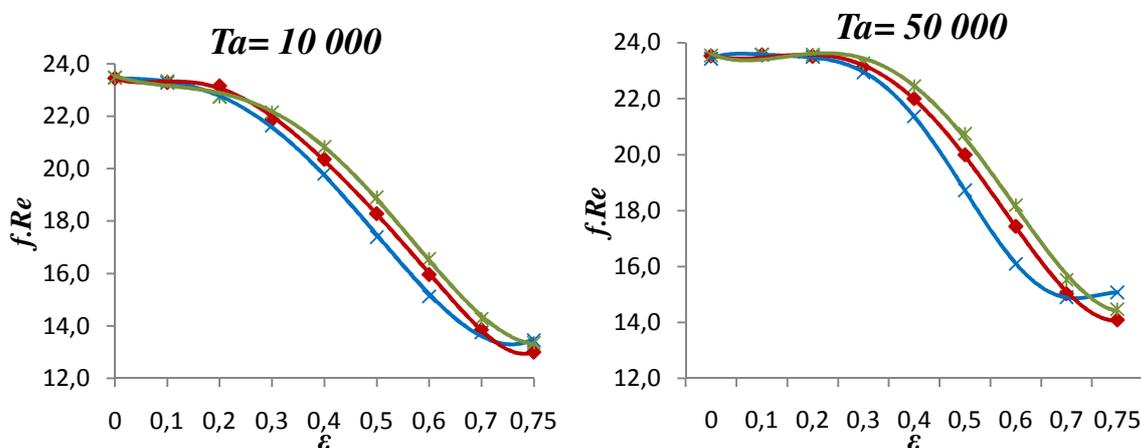


Figura5.20: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de θ com $\xi=0,2$ e $K=0,5$: \times $\theta=15^\circ$ \bullet $\theta=45^\circ$ \ast $\theta=75^\circ$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\xi=0,4$

Para um leito de apara de 0,4, torna-se mais visível o aumento de $f.Re$ com o aumento de θ . Na figura 5.21, é possível ver que para excentricidades muito baixas, a rotação do leito de apara não provoca grandes alterações da perda de carga, mas a sua influência é notória a partir do momento que aumentamos ε como podemos ver a seguir.

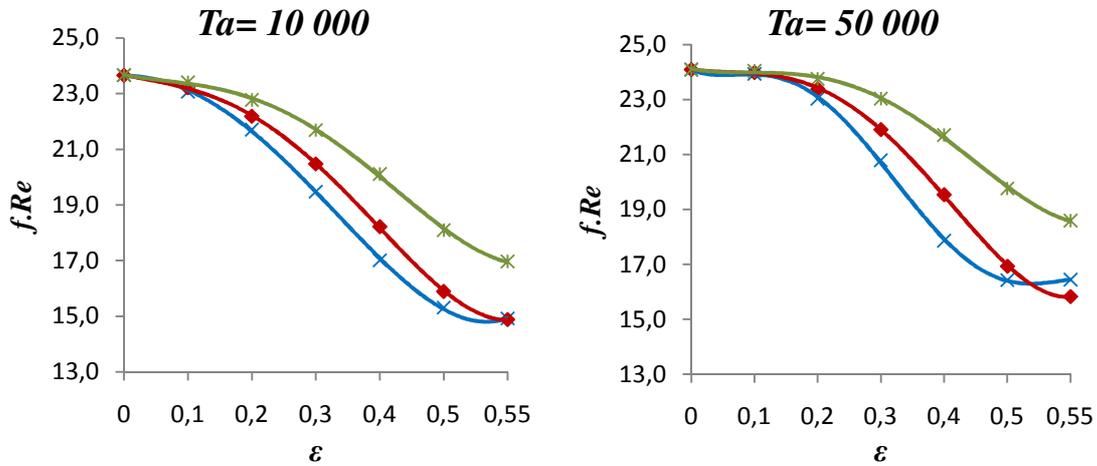


Figura 5.21: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de θ com $\zeta=0,4$ e $K=0,5$: \times $\theta=15^\circ$ \bullet $\theta=45^\circ$ \ast $\theta=75^\circ$

Evolução de $f.Re$ em função de ε , com valores crescentes de θ e para $\zeta=0,7$

Nos cálculos feitos para $\zeta=0,7$, a par do que tem acontecido, os efeitos da rotação do leito de aparas são semelhantes aos atrás relatados. Também é notório, comparando os três gráficos a diminuição de $f.Re$ para cada excentricidade quando aumentamos ζ

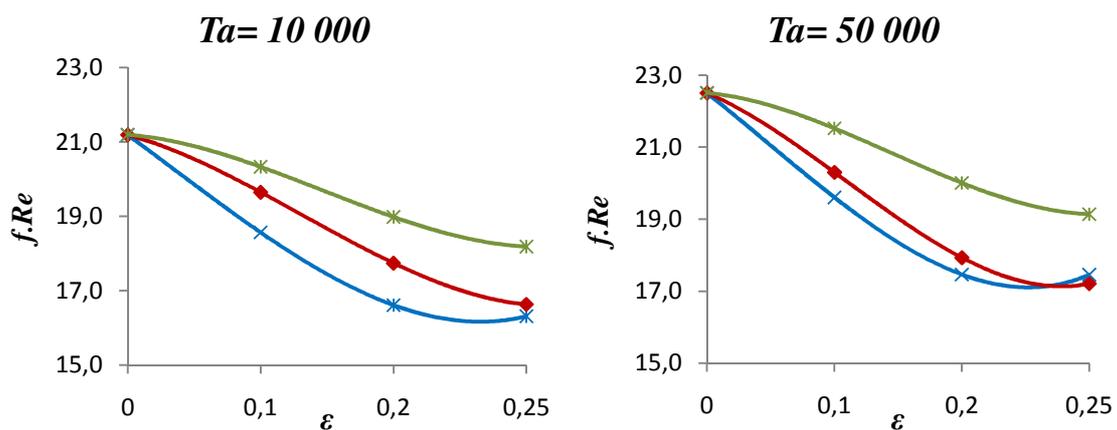


Figura 5.22: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de θ com $\zeta=0,7$ e $K=0,5$: \times $\theta=15^\circ$ \bullet $\theta=45^\circ$ \ast $\theta=75^\circ$

Estudo da evolução de $f.Re$ em função da excentricidade (ε) para os crescentes valores de ζ e diferentes valores de Ta

A variação da espessura do leito de apara, é um parâmetro que vem influenciar e muito os valores de $f.Re$, como devem imaginar. Fazendo variar este parâmetro, alteramos desde já a geometria por onde se processa o escoamento. Assim, incrementando ζ , estamos a diminuir o diâmetro hidráulico, a aumentar a velocidade do escoamento e consequentemente, estamos a provocar alterações no valor da perda de carga.

A seguir apresentamos alguns resultados dos cálculos efectuados, que exemplificam quais as consequências do aumento de ζ no valor de $f.Re$ para vários valores de ε e de Ta .

$f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ζ e para $Ta=1000$

Como podemos ver a partir da Figura 5.23, para uma velocidade de rotação baixa, temos curvas praticamente paralelas e lineares, com excepção para baixas excentricidade e para valores próximos dos valores de máxima excentricidade de cada curva. O que se sobressai e o que realmente motivou a fazer este tipo de estudo foi, verificar a diminuição do valor de $f.Re$ com o aumento de ζ para a mesma excentricidade. Mais uma vez, o aumento de ε diminui o valor de $f.Re$ independentemente da espessura do leito de apara.

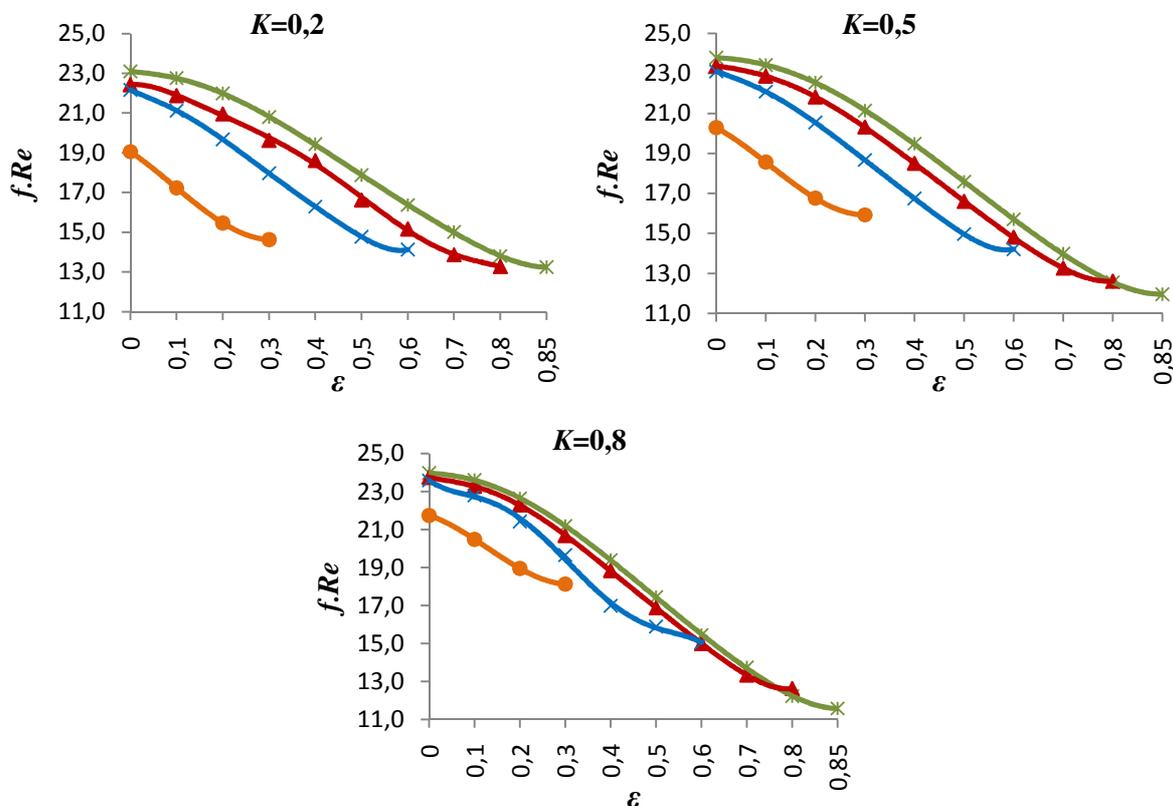


Figura 5.23: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ζ com $Ta= 1000$ e $\Theta=15^\circ$: $\zeta=0,1$ $\zeta=0,2$ $\zeta=0,4$ $\zeta=0,7$

Variação de $f.Re$ em função de ε para crescentes valores do número de ζ e para $Ta= 50000$

Para velocidade de rotação elevadas, as curvas já apresentam outras características. Podemos constatar que o valor de $f.Re$ permanece próximo do seu valor máximo até excentricidades próximas de 0,4.

Mas, quanto ao valor de $f.Re$ para cada excentricidade, normalmente tende a diminuir com o aumento de ζ , excepto para valores máximos de excentricidade de cada curva. Por norma, o aumento da espessura do leito de avara, traz uma diminuição da perda de carga mas, em contra corrente ao que tem sido constatado, existe aqui para ε entre 0 e 0,1 valores de $f.Re$ superiores para $\zeta=0,4$ quando comparados com os de $\zeta=0,1$ e $\zeta=0,2$, principalmente para $K=0,5$ e $K=0,8$.

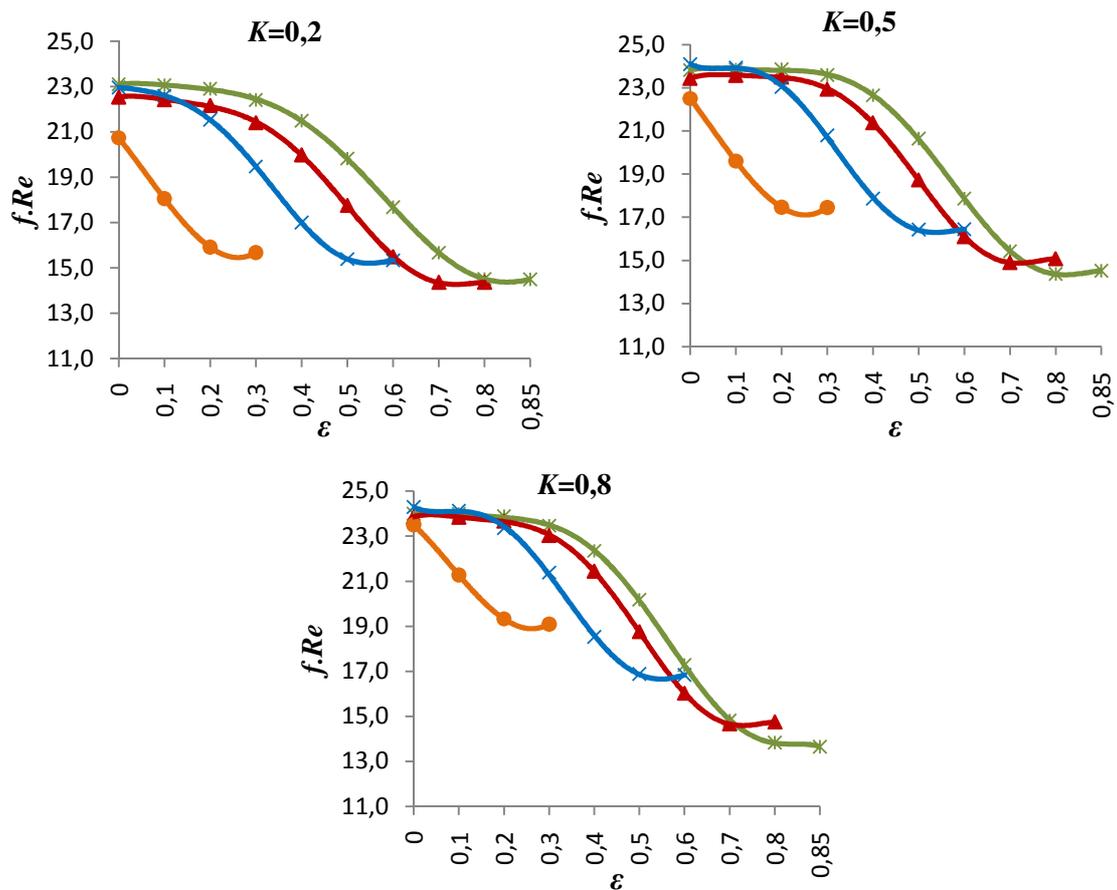


Figura 5.24: $f.Re$ em função de ε para crescentes valores de ζ com $Ta= 50000$ e $\Theta=15^\circ$: $\zeta=0,1$ $\zeta=0,2$ $\zeta=0,4$ $\zeta=0,7$

6-Conclusões

O estudo da velocidade axial e da variação da pressão de escoamentos em condutas anelares com leito de apara e rotação do mesmo foi feito ao longo do semestre, onde obtivemos resultados interessantes.

Relativamente ao estudo da velocidade axial, existem aspectos interessantes a registar. Por exemplo, a velocidade máxima ocorre sempre na zona mais ampla da conduta que aumenta com o aumento da excentricidade. Ainda relativamente há excentricidade, para elevados valores de ε , o cilindro interior aproxima-se muito da parede do poço e o sector C torna-se demasiado pequeno, de forma que o escoamento é quase inexistente. Ao aumentar o leito de apara, estamos a diminuir a área hidráulica, aumentando assim a velocidade axial. Em casos onde o leito de apara se aproxima em demasiado do cilindro interior, registam-se no sector C velocidades nulas em quanto no sector A regista-se a velocidade máxima. De forma conclusiva, podemos ver a partir dos resultados apresentados no capítulo anterior que todos os parâmetros que afectam a geometria da conduta, alteram o valor da velocidade axial. Assim, para uma conduta anelar com $\varepsilon=0,5$, $K=0,5$, $\Theta=45^\circ$ e Re constante, podemos ver que para $\zeta=0,1$ a velocidade axial (\bar{u}) máxima registada foi de 2,0844, enquanto que para $\zeta=0,4$ essa velocidade subiu para 2,1557. Aumentando o ângulo de rotação para $\Theta=75$ e com um leito de apara de $\zeta=0,2$ obtivemos uma velocidade de 2,0644 inferior há velocidade de 2,1224 registada para $\Theta=45^\circ$. Aumentando a velocidade de rotação, origina-se um escoamento secundário com velocidades tangenciais e radiais que influenciam as curvas de velocidade axial, tornando-as menos uniformes.

Quanto há pressão, esta, tem um comportamento semelhante. Sempre que existe alterações na geometria, alterações que alterem o diâmetro hidráulico, existe alteração da velocidade e conseqüentemente a perda de carga será também alterada, juntamente com a pressão. Nós fizemos cálculos para os valores de $f.Re$, alterando os parâmetros K , Ta , ε , ζ e Θ e chegamos a algumas conclusões. Assim, podemos dizer que normalmente o valor de $f.Re$ tende a diminuir com o aumento da excentricidade (ε). Para a mesma excentricidade, para a mesma espessura e rotação do leito de apara, para a mesma velocidade de rotação e aumentando razão de raios (K) a perda de carga aumenta. Mas obtivemos um efeito contrário quando, em vez de aumentar a razão de raios, aumentamos o leito de apara. Relativamente ao aumento de Θ , embora não altere o diâmetro hidráulico, aumenta a perda de carga desde que exista excentricidade.

Para trabalhos futuros sugiro que sejam realizados estudos semelhantes, mas agora para fluidos não Newtonianos, bem como o caso em que o leito de apara toca no cilindro interior.

7- Bibliografia

- Ballal, B.Y., Rivlin, R.S., 1976. *Flow of a Newtonian fluid between eccentric rotating cylinders: Inertial effects*. Arch. Rational Mech. Anal. 62, 237-294.
- Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, inc., 2002 , pág. 309, 351
- Escudier, M.P., Gouldson, I.W., 1997. *Effects of centrebody rotation on laminar flow through an eccentric annulus*. In: Adrian, R.J., Durao, D.F.G., Durst, F., Heitor, M.V., Maeda, M., Whitelaw, J.H., (Eds.), *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics*. Proc. Eighth Int. Symp., Lisbon, 1996. Springer, Berlin.
- Escudier, M.P., Gouldson, I.W., Oliveira, P.J., Pinho, F.T., (2000). *Effects of Inner Cylinder Rotation on Laminar Flow of a Newtonian Fluid Through an Eccentric Annulus*. International Journal of Heat and Fluid Flow. Vol. 21, No.1, p. 92-103.
- Ho Tung, J.N., Kleis, S.J., VanArsdale, W.E., 1993. *The effect of polymer on azimuthal velocity profiles in an eccentric cylinder apparatus*. In: *Developments in Non-Newtonian Flows*, vol. AMD-175, pp. 65-70.
- Joel H. Ferziger, 1998. *Numerical methods for engineering application*. John Wiley & Sons. 30- 32
- Kamal, M.M., 1966. *Separation in the flow between eccentric cylinders*. ASME J. Basic Eng., 717-724.
- Lockett, T.J., 1992. *Numerical simulation of inelastic non-Newtonian fluid flows in annuli*. Ph.D. Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Pearson JRA, 1988. *Rheological principles and measurements applied to the problems of drilling and completing oil wells*. In: Proc. Xth Int Cong Rheology, vol 1, Sydney, 14–19 August, p. 73–78
- San Andres, A., Szeri, A.Z., 1984. *Flow between eccentric rotating cylinders*. ASME J. Appl. Mech. 51, 869-878.
- Shah, R.K., London, A.L., 1978. *Laminar flow forced convection in ducts*. In: *Advances in Heat*. Academic Press, New York.
- Siginer, D.A., Bakhtiyarov, S.I., 1998. *Flow of drilling fluids in eccentric annuli*. J. Non-Newt. Fluid Mech. 78, 119-132.

Takeuchi, D.I., Jankowski, D.F., 1982. *A numerical and experimental investigation of the stability of spiral Poiseuille flow*. J. Fluid Mech. 102, 101-126.

The Australian Drilling Industry Training Committee, 1997. *Drilling: The manual of methods, applications, and management*.

Tiedt, W., 1966. *Berechnung des laminaren und turbulenten Reibungswiderstandes konzentrischer und exzentrischer Ringspalte*. Part I.. Chem-Ztg, Chem. Appar. 90, 813-821.

Tiedt, W., 1967. *Berechnung des laminaren und turbulenten Reibungswiderstandes konzentrischer und exzentrischer Ringspalte*. Part II. Chem-Ztg, Chem. Appar. 91, 17-25.

Rocha, N.EC. 2010. *Escoamento Laminar em condutas anelares com leito de aparas*. *Dissertação Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, FEUP*

Anexos

Anexo A

Tabelas das velocidades de escoamento axial, da rotação do cilindro interior e dos parâmetros necessários para o seu cálculo para cada uma das geometrias.

Tabelas dos diferentes razões de raios e $Ta=0$

$\kappa=0,2$									
ξ	h [m]	α [rad]	a [m]	b [m]	P [m]	A [m ²]	Dh [m]	U [m/s]	ω [rad/s]
0,1	0,004	0,4027	0,046	0,0196	0,3759	0,00743	0,0791	0,1264	0
0,2	0,008	0,5735	0,042	0,0271	0,3739	0,00725	0,0775	0,1290	0
0,3	0,012	0,7075	0,038	0,0325	0,3712	0,00701	0,0755	0,1325	0
0,4	0,016	0,8230	0,034	0,0367	0,3680	0,00673	0,0731	0,1367	0
0,5	0,020	0,9273	0,030	0,0400	0,3643	0,00642	0,0705	0,1418	0
0,6	0,024	1,0239	0,026	0,0427	0,3600	0,00609	0,0677	0,1478	0
0,7	0,028	1,1152	0,022	0,0449	0,3553	0,00574	0,0646	0,1548	0
0,8	0,032	1,2025	0,018	0,0466	0,3500	0,00537	0,0614	0,1629	0
0,9	0,036	1,2870	0,014	0,0480	0,3443	0,00499	0,0580	0,0069	0

$\kappa=0,5$									
ξ	h [m]	α [rad]	a [m]	b [m]	P [m]	A [m ²]	Dh [m]	U [m/s]	ω [rad/s]
0,1	0,0025	0,3176	0,0475	0,0156	0,4707	0,0058	0,0496	0,2016	0
0,2	0,0050	0,4510	0,0450	0,0218	0,4697	0,0057	0,0489	0,2044	0
0,3	0,0075	0,5548	0,0425	0,0263	0,4684	0,0056	0,0480	0,2083	0
0,4	0,0100	0,6435	0,0400	0,0300	0,4669	0,0055	0,0470	0,2129	0
0,5	0,0125	0,7227	0,0375	0,0331	0,4651	0,0053	0,0458	0,2184	0
0,6	0,0150	0,7954	0,0350	0,0357	0,4631	0,0052	0,0445	0,2247	0
0,7	0,0175	0,8632	0,0325	0,0380	0,4609	0,005	0,0431	0,2320	0
0,8	0,0200	0,9273	0,0300	0,0400	0,4585	0,0048	0,0416	0,2402	0
0,9	0,0225	0,9884	0,0275	0,0418	0,4559	0,0046	0,0401	0,2495	0

$\kappa=0,8$									
ξ	h [m]	α [rad]	a [m]	b [m]	P [m]	A [m ²]	Dh [m]	U [m/s]	ω [rad/s]
0,1	0,00	0,2003	0,049	0,0099	0,5654	0,0028	0,0199	0,5022	0
0,2	0,00	0,2838	0,048	0,0140	0,5651	0,0028	0,0197	0,5064	0
0,3	0,00	0,3482	0,047	0,0171	0,5648	0,0028	0,0195	0,5118	0
0,4	0,00	0,4027	0,046	0,0196	0,5644	0,0027	0,0193	0,5184	0
0,5	0,01	0,4510	0,045	0,0218	0,5640	0,0027	0,0190	0,5260	0
0,6	0,01	0,4949	0,044	0,0237	0,5635	0,0026	0,0187	0,5346	0
0,7	0,01	0,5355	0,043	0,0255	0,5630	0,0026	0,0184	0,5443	0
0,8	0,01	0,5735	0,042	0,0271	0,5624	0,0025	0,0180	0,5505	0
0,9	0,01	0,6094	0,041	0,0286	0,5618	0,0025	0,0176	0,5669	0

Alterando o número de Taylor, não existe alterações dos parâmetros atrás calculados, mas sim da velocidade de rotação.

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=100$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	1,2641	0,1	1,6125	0,1	5,0224
0,2	1,2901	0,2	1,6356	0,2	5,0638
0,3	1,3247	0,3	1,6662	0,3	5,1181
0,4	1,3673	0,4	1,7034	0,4	5,1836
0,5	1,4181	0,5	1,7473	0,5	5,2597
0,6	1,4778	0,6	1,7979	0,6	5,3461
0,7	1,5474	0,7	1,8558	0,7	5,4429
0,8	1,6286	0,8	1,9216	0,8	5,5505
0,9	1,7234	0,9	1,9962	0,9	5,6693

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=1\ 000$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	3,9974	0,1	5,0992	0,1	15,8823
0,2	4,0797	0,2	5,1723	0,2	16,0131
0,3	4,1891	0,3	5,2689	0,3	16,1848
0,4	4,3238	0,4	5,3867	0,4	16,3921
0,5	4,4845	0,5	5,5253	0,5	16,6327
0,6	4,6732	0,6	5,6854	0,6	16,9059
0,7	4,8935	0,7	5,8684	0,7	17,2121
0,8	5,1502	0,8	6,0765	0,8	17,5522
0,9	5,4499	0,9	6,3126	0,9	17,9279

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=2\ 500$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	6,3204	0,1	8,0626	0,1	25,1122
0,2	6,4506	0,2	8,1781	0,2	25,3189
0,3	6,6236	0,3	8,3309	0,3	25,5905
0,4	6,8366	0,4	8,5172	0,4	25,9182
0,5	7,0906	0,5	8,7363	0,5	26,2986
0,6	7,3890	0,6	8,9895	0,6	26,7306
0,7	7,7372	0,7	9,2788	0,7	27,2147
0,8	8,1431	0,8	9,6078	0,8	27,7525
0,9	8,6171	0,9	9,9811	0,9	28,3464

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=5\ 000$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	8,9384	0,1	11,4022	0,1	35,5139
0,2	9,1225	0,2	11,5656	0,2	35,8063
0,3	9,3671	0,3	11,7817	0,3	36,1904
0,4	9,6684	0,4	12,0451	0,4	36,6539
0,5	10,0276	0,5	12,3550	0,5	37,1919
0,6	10,4496	0,6	12,7130	0,6	37,8028
0,7	10,9421	0,7	13,1222	0,7	38,4874
0,8	11,5161	0,8	13,5875	0,8	39,2479
0,9	12,1864	0,9	14,1154	0,9	40,0879

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=10\ 000$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	12,6408	0,1	16,1252	0,1	50,2243
0,2	12,9011	0,2	16,3563	0,2	50,6378
0,3	13,2471	0,3	16,6618	0,3	51,1809
0,4	13,6731	0,4	17,0343	0,4	51,8365
0,5	14,1811	0,5	17,4727	0,5	52,5973
0,6	14,7780	0,6	17,9789	0,6	53,4613
0,7	15,4745	0,7	18,5576	0,7	54,4294
0,8	16,2862	0,8	19,2157	0,8	55,5049
0,9	17,2341	0,9	19,9622	0,9	56,6929

Velocidade de rotação do cilindro interior para $Ta=50\ 000$

$\kappa=0,2$		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,8$	
ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]	ξ	ω [rad/s]
0,1	28,2658	0,1	36,0570	0,1	112,3050
0,2	28,8477	0,2	36,5737	0,2	113,2295
0,3	29,6214	0,3	37,2569	0,3	114,4441
0,4	30,5740	0,4	38,0900	0,4	115,9098
0,5	31,7100	0,5	39,0701	0,5	117,6111
0,6	33,0445	0,6	40,2021	0,6	119,5431
0,7	34,6020	0,7	41,4961	0,7	121,7079
0,8	36,4171	0,8	42,9675	0,8	124,1128
0,9	38,5367	0,9	44,6368	0,9	126,7691

Anexo BTabelas de $f.Re$ calculados para as diferentes geometrias.Resultados de $f.Re$ para $\Theta=15^\circ$ e $K=0,2$

K=0,2		$\xi=0,1$									
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
100		22,995	22,639	21,854	20,632	19,269	17,725	16,266	14,946	13,736	13,157
1000		22,999	22,721	22,084	21,001	19,693	18,100	16,494	15,036	13,783	13,250
2500		23,003	22,799	22,313	21,394	20,180	18,551	16,791	15,161	13,858	13,393
5000		23,007	22,867	22,523	21,775	20,687	19,053	17,146	15,325	13,974	13,605
10000		23,013	22,955	22,801	22,299	21,423	19,820	17,728	15,665	14,287	14,110
50000		23,023	23,089	23,223	23,093	22,482	20,818	18,553	16,572	15,429	15,489

K=0,2		$\xi=0,2$								
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
100		22,913	22,324	21,348	19,970	18,457	16,960	15,487	14,167	13,536
1000		22,946	22,472	21,648	20,362	18,821	17,196	15,580	14,213	13,630
2500		21,258	21,966	21,318	20,692	18,688	16,987	15,252	13,877	13,375
5000		21,880	21,735	21,469	20,841	19,764	17,884	15,881	14,401	13,992
10000		22,388	22,253	21,989	21,236	19,886	18,718	16,923	13,987	13,890
50000		23,104	23,169	22,036	22,003	21,485	19,344	17,106	15,586	15,997

K=0,2		$\xi=0,3$							
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
100		22,555	21,781	20,509	19,006	17,447	15,891	14,472	13,796
1000		22,655	22,023	20,866	19,364	17,581	15,986	14,517	13,889
2500		22,748	22,267	21,263	19,801	18,010	16,121	14,587	14,032
5000		22,831	22,493	21,659	20,283	18,399	16,300	14,698	14,248
10000		22,944	22,796	22,217	21,008	19,045	16,662	14,999	14,773
50000		23,130	23,265	23,037	21,971	19,891	17,509	16,150	16,328

K=0,2		$\xi=0,4$						
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
100		22,048	20,985	19,526	17,859	16,224	14,711	14,056
1000		22,249	21,314	19,880	18,105	16,309	14,752	14,145
2500		22,444	21,670	20,310	18,434	16,450	14,818	14,285
5000		22,622	22,020	20,778	18,832	16,676	14,922	14,494
10000		22,865	22,508	21,481	19,492	17,278	15,208	15,012
50000		23,256	23,245	22,446	20,351	18,530	16,331	16,561

K=0,2		$\xi = 0,5$				
Ta \ ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
100	22,048	20,985	19,526	17,859	16,224	14,711
1000	22,249	21,314	19,880	18,105	16,309	14,752
2500	22,444	21,670	20,310	18,434	16,450	14,818
5000	22,622	22,020	20,778	18,832	16,676	14,922
10000	22,865	22,508	21,481	19,492	17,278	15,208
50000	23,256	23,245	22,446	20,351	18,530	16,331

K=0,2		$\xi = 0,6$			
Ta \ ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
100	20,261	18,634	16,905	15,214	14,409
1000	20,607	18,898	17,012	15,248	14,491
2500	21,008	19,248	17,168	15,303	14,618
5000	21,432	19,668	17,377	15,391	14,812
10000	22,057	20,363	17,793	15,639	15,298
50000	22,984	21,298	18,578	16,636	16,766

K=0,2		$\xi = 0,7$		
Ta \ ϵ	0	0,1	0,2	0,25
100	18,971	17,181	15,431	14,585
1000	19,246	17,209	15,420	14,603
2500	19,606	17,455	15,510	14,783
5000	20,031	17,673	15,589	14,967
10000	20,730	18,103	15,814	15,429
50000	21,696	18,871	16,727	16,818

K=0,2		$\xi = 0,8$	
Ta \ ϵ	0	0,1	0,15
100	17,469	15,626	14,754
1000	17,588	15,653	14,828
2500	17,761	15,696	14,943
5000	17,992	15,767	15,118
10000	18,446	15,970	15,556
50000	19,226	16,808	16,857

K=0,2		$\xi = 0,9$	
Ta \ ϵ	0	0,05	
100	15,835	14,918	
1000	15,860	14,989	
2500	15,900	15,101	
5000	15,965	15,268	
10000	16,151	15,683	
50000	16,913	16,892	

Resultados de $f \cdot Re$ para $\Theta=15^\circ$ e $K=0,5$

K=0,5		$\xi=0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
100		23,745	23,347	22,418	20,993	19,274	17,392	15,582	13,951	12,455	11,816
1000		23,758	23,526	22,932	21,820	20,195	18,121	15,968	14,107	12,724	12,292
2500		23,763	23,637	23,285	22,467	21,030	18,878	16,425	14,337	13,061	12,820
5000		23,770	23,715	23,540	22,971	21,749	19,612	16,949	14,667	13,481	13,416
10000		23,777	23,807	23,845	23,582	22,642	20,584	17,809	15,400	14,309	14,465
50000		23,790	23,956	24,331	24,525	23,838	21,726	19,127	17,101	16,199	16,605

K=0,5		$\xi=0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
100		23,680	23,111	21,937	20,597	18,617	16,751	14,938	13,389	12,684
1000		23,761	23,415	22,564	21,202	19,346	17,159	15,084	13,626	13,126
2500		23,346	23,148	22,564	21,463	19,557	17,282	14,992	13,647	13,428
5000		23,830	23,742	23,368	22,501	20,793	18,184	15,603	14,310	14,215
10000		23,413	23,444	23,314	22,743	21,136	18,616	15,940	14,752	14,939
50000		23,937	24,177	24,459	24,222	22,681	20,144	17,880	16,887	17,528

K=0,5		$\xi=0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
100		23,423	22,633	21,262	19,601	17,736	15,856	14,203	13,440
1000		23,650	23,115	21,973	20,291	18,139	15,988	14,405	13,836
2500		23,766	23,438	22,558	20,988	18,625	16,183	14,671	14,302
5000		23,852	23,677	23,030	21,630	19,161	16,460	15,016	14,854
10000		23,965	23,970	23,606	22,437	19,958	17,084	15,739	15,896
50000		24,152	24,454	24,477	23,381	20,968	18,554	17,548	18,217

K=0,5		$\xi=0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
100		22,980	21,934	20,364	18,592	16,720	14,929	14,138
1000		23,416	22,579	20,926	18,993	16,845	15,094	14,479
2500		23,664	23,067	21,661	19,478	17,147	15,228	14,893
5000		23,850	23,453	22,244	20,011	17,284	15,346	15,400
10000		24,093	23,934	22,982	20,795	17,854	15,590	16,396
50000		24,516	24,699	23,922	21,738	19,179	16,621	18,721

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

K=0,5		$\xi = 0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
100		22,268	20,997	19,268	17,417	15,631	14,746
1000		22,905	21,654	19,675	17,537	15,756	15,030
2500		23,331	22,258	20,162	17,710	15,930	15,391
5000		23,666	22,795	20,692	17,952	16,170	15,849
10000		24,099	23,482	21,467	18,477	16,722	16,788
50000		24,828	24,416	22,400	19,675	18,303	19,075

K=0,5		$\xi = 0,6$				
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
100		21,331	19,812	18,059	16,202	15,322
1000		22,026	20,247	18,184	16,294	15,552
2500		22,603	20,745	18,360	16,427	15,857
5000		23,102	21,276	18,599	16,617	16,260
10000		23,751	22,051	19,097	17,084	17,121
50000		24,702	22,999	20,130	18,516	19,264

K=0,5		$\xi = 0,7$			
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
100		20,194	18,512	16,744	15,854
1000		20,681	18,646	16,811	16,038
2500		21,203	19,504	17,629	16,296
5000		21,738	19,077	17,060	16,648
10000		22,501	19,573	17,438	17,420
50000		23,428	20,550	18,657	19,372

K=0,5		$\xi = 0,8$		
Ta	ϵ	0	0,1	0,15
100		18,832	16,557	16,246
1000		18,983	17,202	16,407
2500		19,186	17,286	16,637
5000		19,451	17,412	16,953
10000		19,968	17,742	17,651
50000		20,919	18,779	19,435

K=0,5		$\xi = 0,9$	
Ta	ϵ	0	0,05
100		17,398	16,558
1000		17,461	16,719
2500		17,551	16,940
5000		17,679	17,235
10000		17,972	17,865
50000		18,876	19,465

Resultados de $f.Re$ para $\Theta=15^\circ$ e $K=0,8$

K=0,8		$\xi=0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
100		23,928	23,532	22,519	21,023	19,226	17,308	15,423	13,679	12,142	11,461
1000		23,939	23,663	22,899	21,621	19,867	17,791	15,662	13,629	12,385	11,885
2500		23,944	23,767	23,234	22,209	20,572	18,378	15,985	13,952	12,672	12,342
5000		23,948	23,849	23,510	22,742	21,291	19,050	16,406	14,197	13,021	12,872
10000		23,955	23,943	23,839	23,418	22,296	20,130	17,237	14,774	13,706	13,845
50000		23,969	24,078	24,298	24,339	23,601	21,567	18,756	16,307	15,311	16,095

K=0,8		$\xi=0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
100		23,912	23,409	22,252	20,682	18,840	16,912	15,053	13,369	12,612
1000		23,977	23,615	22,685	21,260	19,357	17,200	15,152	13,567	12,994
2500		23,743	23,507	22,812	21,600	19,723	17,371	15,132	13,655	13,262
5000		24,027	23,892	23,409	22,425	20,613	18,040	15,532	14,124	13,918
10000		23,793	23,773	23,548	22,903	21,319	18,642	15,569	14,577	14,662
50000		24,106	24,245	24,392	24,148	22,732	20,555	17,482	16,307	16,987

K=0,8		$\xi=0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
100		23,756	23,116	21,884	20,227	18,346	16,434	14,637	13,780
1000		23,931	23,438	22,368	20,714	18,638	16,522	14,802	14,115
2500		24,011	23,673	22,819	21,256	19,012	16,655	15,014	14,505
5000		24,071	23,865	23,231	21,822	19,466	16,854	15,288	14,972
10000		24,148	24,100	23,756	22,625	20,238	17,329	15,863	15,871
50000		24,257	24,433	24,459	23,584	21,607	18,585	17,330	17,946

K=0,8		$\xi=0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
100		23,433	22,382	21,284	19,561	17,682	15,861	14,983
1000		23,767	22,858	21,743	19,851	17,764	15,989	15,259
2500		23,936	23,414	22,206	20,210	17,885	16,160	15,597
5000		24,069	23,057	22,577	20,634	18,062	16,389	16,013
10000		24,254	24,088	23,318	21,336	18,480	16,886	16,844
50000		24,585	24,673	23,716	22,265	19,560	18,225	18,822

K=0,8		$\xi = 0,5$					
Ta \ ε	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
100		23,040	22,078	20,617	18,865	17,027	16,092
1000		23,559	22,572	20,926	18,949	17,123	16,304
2500		23,854	22,989	21,278	19,066	17,261	16,577
5000		24,091	23,380	21,680	19,232	17,454	16,925
10000		24,415	23,925	22,331	19,607	17,892	17,644
50000		24,952	24,692	23,204	20,530	19,124	19,461

K=0,8		$\xi = 0,6$				
Ta \ ε	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,35
100		22,389	21,291	19,777	18,046	17,155
1000		22,987	21,650	19,872	18,106	17,308
2500		23,403	22,017	19,998	18,192	17,515
5000		23,757	22,407	20,167	18,315	17,792
10000		24,243	23,015	20,527	18,603	18,395
50000		24,990	23,867	21,322	19,528	20,024

K=0,8		$\xi = 0,7$			
Ta \ ε	ε	0	0,1	0,2	0,25
100		21,610	20,456	18,936	18,100
1000		22,066	20,569	18,968	18,182
2500		22,481	20,710	19,015	18,322
5000		22,882	20,888	19,088	18,525
10000		23,467	21,233	19,268	18,989
50000		24,298	21,884	19,895	20,360

K=0,8		$\xi = 0,8$		
Ta \ ε	ε	0	0,1	0,15
100		20,733	19,528	18,782
1000		20,873	19,546	18,874
2500		21,040	19,581	19,002
5000		21,239	19,639	19,182
10000		21,595	19,449	19,602
50000		22,238	20,202	20,855

K=0,8		$\xi = 0,9$	
Ta \ ε	ε	0	0,05
100		19,765	19,202
1000		19,824	19,319
2500		19,898	19,460
5000		19,989	19,600
10000		20,170	20,031
50000		20,683	21,196

Resultados de $f.Re$ para $\Theta=45^\circ$ e $K=0,2$

K=0,2		$\xi=0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
2500		23,003	22,816	22,346	22,247	20,353	18,838	17,186	15,555	14,089	13,504
5000		23,007	22,878	22,553	21,893	20,859	19,385	17,643	15,830	14,206	13,608
10000		22,973	22,959	22,814	22,396	21,583	20,199	18,357	16,310	14,486	13,894
50000		23,023	22,875	23,217	23,173	22,672	21,352	19,354	17,199	15,462	14,985

K=0,2		$\xi=0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
2500		22,325	22,017	21,415	20,508	19,085	17,557	15,895	14,381	13,848
5000		23,003	22,778	22,319	21,559	20,370	18,772	16,998	15,231	14,432
10000		22,633	22,268	22,008	21,489	20,492	18,951	17,095	15,174	14,310
50000		23,104	23,157	23,216	23,040	22,208	20,563	18,509	16,502	15,657

K=0,2		$\xi=0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
2500		22,748	22,374	21,592	20,387	18,944	17,286	15,600	14,840
5000		22,831	22,571	21,634	20,867	19,460	17,719	15,874	15,037
10000		22,944	22,835	22,430	21,548	20,218	18,383	16,333	15,402
50000		23,130	23,253	23,167	22,493	21,140	19,183	17,108	16,234

K=0,2		$\xi=0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
2500		22,444	21,865	20,784	19,388	17,672	15,977	15,226
5000		22,622	22,179	21,227	19,876	18,072	16,215	15,393
10000		22,865	22,612	21,857	20,601	18,701	16,638	15,730
50000		23,256	23,274	22,739	21,480	19,455	17,402	16,582

K=0,2		$\xi=0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
2500		21,910	21,027	20,810	17,969	16,208	15,447
5000		22,216	21,455	20,083	18,339	16,404	15,579
10000		22,643	22,072	20,789	18,950	16,782	15,877
50000		23,313	22,956	21,679	19,721	17,566	16,764

K=0,2		$\xi=0,6$				
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
2500		21,112	19,738	18,039	16,341	15,535
5000		21,431	20,187	18,368	16,498	15,637
10000		22,057	20,897	17,347	16,833	15,896
50000		22,984	21,832	19,733	17,647	16,742

K=0,2		$\xi=0,7$			
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
2500		19,606	18,009	16,292	15,558
5000		20,032	18,298	16,405	15,644
10000		20,730	18,833	16,672	15,881
50000		21,697	19,635	17,466	16,811

K=0,2		$\xi=0,8$		
Ta	ϵ	0	0,1	0,15
2500		17,761	16,166	15,446
5000		17,992	16,246	15,532
10000		18,446	16,456	15,776
50000		19,226	17,226	16,734

K=0,2		$\xi=0,9$	
Ta	ϵ	0	0,05
2500		15,900	15,280
5000		15,965	15,405
10000		16,151	15,729
50000		16,913	16,789

Resultados de $f.Re$ para $\Theta=45^\circ$ e $K=0,5$

K=0,5		$\xi=0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
2500		23,765	23,645	23,260	22,538	21,208	19,258	16,895	14,612	12,937	12,430
5000		23,770	23,718	23,483	23,028	21,928	20,056	17,549	15,036	13,277	12,833
10000		23,472	23,804	24,029	23,639	22,882	21,170	18,683	16,042	13,959	13,407
50000		23,791	23,949	24,151	24,577	24,120	22,442	19,928	17,489	15,169	15,431

K=0,5		$\xi=0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
2500		23,451	23,287	22,809	21,829	20,307	18,239	15,924	13,847	12,992
5000		23,816	23,753	23,469	22,727	21,374	19,285	16,759	14,456	13,535
10000		23,358	23,442	23,384	22,933	21,821	19,825	17,278	14,917	13,973
50000		23,712	24,162	24,505	24,467	23,485	21,434	19,000	16,877	16,010

K=0,5		$\xi=0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
2500		23,765	23,500	22,784	21,537	19,662	17,405	15,123	14,128
5000		23,851	23,712	23,277	22,167	20,375	18,016	15,544	14,479
10000		23,965	23,977	23,722	22,923	21,237	18,853	16,307	15,209
50000		24,152	24,437	24,567	23,940	22,195	19,907	17,713	16,788

K=0,5		$\xi=0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
2500		23,664	23,208	22,186	20,428	18,178	15,894	14,873
5000		23,850	23,554	22,730	21,073	18,732	16,253	15,167
10000		24,093	23,986	23,388	21,856	19,495	16,931	15,812
50000		24,515	24,702	24,281	23,045	20,694	18,227	17,318

K=0,5		$\xi=0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
2500		23,331	22,549	20,991	18,771	16,489	15,506
5000		23,665	23,049	21,585	19,252	16,762	15,733
10000		24,099	23,671	22,335	19,959	17,342	16,287
50000		24,828	24,539	23,132	20,830	18,622	17,779

K=0,5		$\xi=0,6$				
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
2500		22,601	21,216	19,212	17,053	16,138
5000		23,100	21,773	19,622	17,248	16,316
10000		23,750	22,527	20,282	17,714	16,781
50000		24,700	23,414	21,168	18,949	18,206

K=0,5		$\xi=0,7$			
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
2500		21,203	18,662	16,689	16,600
5000		21,738	19,671	17,540	16,757
10000		22,501	20,268	17,896	17,166
50000		23,428	21,198	19,038	18,501

K=0,5		$\xi = 0,8$		
Ta	ϵ	0	0,1	0,15
2500		19,186	17,610	16,940
5000		19,450	17,711	17,108
10000		19,968	17,985	17,522
50000		20,919	18,961	18,783

K=0,5		$\xi = 0,9$	
Ta	ϵ	0	0,05
2500		17,584	17,120
5000		17,679	17,298
10000		18,096	18,022
50000		18,876	19,198

Resultados de $f \cdot Re$ para $\Theta = 45^\circ$ e $K = 0,8$

K=0,8		$\xi = 0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
2500		23,943	23,774	23,253	22,258	20,677	18,589	16,182	14,043	12,513	12,014
5000		23,947	23,852	23,523	22,786	21,409	19,341	16,695	14,338	12,793	12,378
10000		23,953	23,943	23,845	23,452	22,418	20,512	17,653	15,011	13,389	13,076
50000		23,966	24,076	24,300	24,377	23,767	22,056	19,291	16,656	14,898	14,678

K=0,8		$\xi = 0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
2500		23,742	23,529	22,926	21,790	20,073	17,900	15,588	13,567	12,761
5000		24,027	23,905	23,506	22,590	21,042	18,793	16,230	13,966	13,163
10000		23,793	23,775	23,623	23,231	21,793	19,615	16,887	14,464	13,663
50000		24,106	24,242	24,449	24,322	23,279	21,254	18,626	16,237	15,296

K=0,8		$\xi = 0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
2500		24,010	23,721	22,976	21,646	19,719	17,415	15,155	14,169
5000		24,070	23,896	23,362	22,245	20,388	17,949	15,484	14,432
10000		24,147	24,111	23,847	23,036	21,349	18,836	16,169	14,834
50000		24,256	24,436	24,542	24,037	22,443	20,043	17,580	16,500

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

K=0,8		$\xi = 0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
2500		23,937	23,513	22,522	20,871	18,716	16,375	15,332
5000		24,070	23,779	22,572	20,377	17,692	16,666	15,553
10000		24,254	24,129	23,580	22,234	19,949	17,261	16,068
50000		24,586	24,690	24,301	23,114	20,892	18,442	17,338

K=0,8		$\xi = 0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
2500		23,853	23,184	21,807	19,782	17,577	16,503
5000		24,090	23,555	22,281	20,181	17,816	19,537
10000		24,414	24,056	22,952	20,829	18,314	17,033
50000		24,951	24,764	23,718	21,615	20,312	21,500

K=0,8		$\xi = 0,6$				
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
2500		23,403	22,336	20,564	18,504	17,555
5000		23,757	22,748	20,882	18,636	17,662
10000		24,243	23,346	21,424	18,946	17,938
50000		24,990	24,122	22,172	19,798	18,896

K=0,8		$\xi = 0,7$			
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
2500		22,480	21,063	19,318	18,494
5000		22,881	21,318	19,388	18,567
10000		23,466	21,763	19,564	18,759
50000		24,294	22,446	20,172	19,489

K=0,8		$\xi = 0,8$		
Ta	ϵ	0	0,1	0,15
2500		21,040	19,782	19,146
5000		21,238	19,826	19,224
10000		21,594	19,928	19,403
50000		22,238	20,346	20,062

K=0,8		$\xi = 0,9$	
Ta	ϵ	0	0,05
2500		19,898	19,543
5000		19,988	19,693
10000		20,170	20,011
50000		20,683	20,955

Resultados de $f \cdot Re$ para $\Theta=75^\circ$ e $K=0,2$

K=0,2		$\xi = 0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
10000		23,013	22,966	22,796	22,409	21,656	20,422	18,609	16,490	14,995	14,288
50000		23,023	23,073	23,161	23,137	22,717	21,594	19,623	17,375	220,883	16,309

K=0,2		$\xi = 0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
10000		22,388	22,325	22,117	21,676	20,882	19,603	17,205	15,810	14,892
50000		23,104	23,163	23,227	23,135	22,629	21,406	19,419	17,184	16,269

K=0,2		$\xi = 0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
10000		22,944	22,855	22,583	22,045	21,150	19,819	18,080	17,076
50000		23,130	23,183	23,171	22,927	22,250	20,970	19,091	18,002

K=0,2		$\xi = 0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
10000		22,865	22,750	22,360	21,666	20,593	19,211	18,399
50000		23,256	23,290	23,105	22,584	21,599	20,209	19,367

K=0,2		$\xi = 0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
10000		22,643	22,409	21,824	20,903	19,685	18,988
50000		23,313	23,179	22,666	21,749	20,486	19,767

K=0,2		$\xi = 0,6$				
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
10000		22,057	21,606	20,300	19,571	18,901
50000		22,984	22,513	21,572	20,303	19,602

K=0,2		$\xi = 0,7$			
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
10000		20,730	19,988	18,884	18,255
50000		21,696	20,846	19,654	19,010

K=0,2		H=0,8		
Ta	ϵ	0	0,1	0,15
10000		18,4445	17,5503	17,0849
50000		19,2240	18,2936	17,8537

K=0,2		$\xi=0,9$	
Ta	ϵ	0	0,05
10000		16,152	15,939
50000		16,913	16,801

Resultados de f.Re para $\Theta=75^\circ$ e K=0,5

K=0,5		$\xi=0,1$									
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,85
10000		23,777	23,801	23,808	23,616	22,890	21,247	18,680	15,965	14,148	13,792
50000		23,790	23,930	24,257	24,525	24,182	22,614	20,042	17,565	15,981	15,667

K=0,5		$\xi=0,2$								
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
10000		23,413	23,433	23,113	23,128	22,308	20,621	18,083	15,382	14,335
50000		23,937	24,111	24,433	24,612	24,125	22,480	19,880	17,311	16,384

K=0,5		$\xi=0,3$							
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
10000		23,965	23,975	23,868	23,440	22,422	20,599	18,050	16,676
50000		24,152	24,361	24,606	24,540	23,749	21,984	19,488	18,180

K=0,5		$\xi=0,4$						
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
10000		24,093	24,042	23,750	23,031	21,713	19,762	18,593
50000		24,516	24,665	24,620	24,068	22,825	20,970	19,885

K=0,5		$\xi=0,5$					
Ta	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
10000		24,099	23,877	23,247	22,133	20,461	19,477
50000		24,828	24,689	24,084	22,927	21,308	20,410

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

K=0,5		$\xi=0,6$				
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,35
10000		23,751	23,202	22,090	20,474	19,540
50000		24,702	24,050	22,819	21,217	20,365

K=0,5		$\xi=0,7$			
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,2	0,25
10000		22,501	21,521	20,005	19,134
50000		23,428	22,345	20,888	20,120

K=0,5		$\xi=0,8$		
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,15
10000		19,969	18,915	18,320
50000		20,919	19,859	19,352

K=0,5		$\xi=0,9$	
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,05
10000		17,972	17,840
50000		18,876	18,918

Resultados de f.Re para $\Theta=75^\circ$ e K=0,8

K=0,8		$\xi=0,1$									
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
10000		23,955	23,945	23,852	23,485	22,506	20,568	17,785	15,075	13,436	13,147
50000		23,969	24,069	24,289	24,390	23,864	22,157	19,441	16,716	14,963	14,787

K=0,8		$\xi=0,2$								
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
10000		23,793	23,777	23,654	23,225	22,175	20,199	17,427	14,728	13,734
50000		24,106	24,222	24,435	24,476	23,854	22,084	19,339	16,554	15,469

K=0,8		$\xi=0,3$							
Ta \ ϵ	ϵ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
10000		24,147	24,122	23,940	23,395	22,199	20,127	18,018	15,923
50000		24,257	24,406	24,575	24,442	23,572	21,689	19,366	17,602

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

K=0,8		$\xi = 0,4$						
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
10000		24,254	24,179	23,855	23,085	21,660	19,499	18,199
50000		24,585	24,685	24,637	24,119	22,866	20,868	19,665

K=0,8		$\xi = 0,5$					
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45
10000		24,415	24,225	23,640	22,509	20,764	19,689
50000		24,952	24,868	24,394	23,313	21,642	20,650

K=0,8		$\xi = 0,6$				
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,3	0,35
10000		24,243	23,808	22,814	21,228	20,253
50000		24,990	24,516	23,458	21,866	20,947

K=0,8		$\xi = 0,7$			
Ta	ε	0	0,1	0,2	0,25
10000		23,465	22,661	21,213	20,294
50000		24,293	23,370	21,852	20,983

K=0,8		$\xi = 0,8$		
Ta	ε	0	0,1	0,15
10000		21,595	20,677	20,017
50000		22,239	21,260	20,620

K=0,8		$\xi = 0,9$	
Ta	ε	0	0,05
10000		19,812	19,607
50000		20,683	20,680

Anexo C

Código de programação em Fortran do programa de geração de malha funcional para escoamentos que ocorrem em condutas de secção anelar com ou sem leito de aparas para diferentes posições angulares e com ou sem excentricidade.

```
C234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234
56789012
```

```
PROGRAM ANNUMESH2
```

```
C 1/4/1998
```

```
C This program generates the mesh3d.dat file required for the generation
```

```
C of meshes in annular ducts (both concentric and eccentric)
```

```
C Limited to a maximum of 10 radial blocks
```

```
C It differs from ANNUMESH.F in that here the blocks and cells are
```

```
C orthogonal in relation to the inner cylinder
```

```
PARAMETER(PI=3.141592654)
```

```
COMMON /VAR/
```

```
RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,DBETA5,FRAD(10),HLAP
```

```
SMALL=1.E-15
```

```
WRITE(*,*) 'CO-ORDINATE SYSTEM CENTERED IN INNER
CYLINDER'
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,*) 'GIVE RADIUS OF INNER CYLINDER [mm]'
```

```
READ(*,*) RINNER
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,*) 'GIVE RADIUS OF OUTER CYLINDER [mm]'
```

```
READ(*,*) ROUTER1
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'GIVE LENGTH OF DUCT [mm]'
READ(*,*) AXLENGTH1
WRITE (*,*)
WRITE (*,*) 'GIVE THE ANGLE [α]'
READ (*,*) SIGMAA
1 WRITE(*,*)
WRITE(*,*) 'GIVE ECCENTRICITY [%]'
READ(*,*) PERC_ECCEN
DELTA=ROUTER1-RINNER
ECCEN=PERC_ECCEN*DELTA/100.
IF (ECCEN .GE. ROUTER1-RINNER) THEN
    WRITE(*,*) 'ERROR: ECCENTRICITY CAN NOT EXCEED
',ROUTER-RINNER
    GOTO 1
END IF
2 WRITE(*,*) 'GIVE HLAP [%]'
READ(*,*) PERC_HLAP
HLAP=PERC_HLAP*DELTA/100.
IF (HLAP .GE. ROUTER1-RINNER-ECCEN) THEN
    WRITE(*,*) 'ERROR: H CAN NOT EXCEED ',ROUTER1-RINNER-
ECCEN
    GOTO 2
END IF
WRITE(*,*)
NBLRAD=1
WRITE(*,*)
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
WRITE(*,*) 'FOR CONCENTRIC, OUTER CYLINDER RADIUS IS AT  
,ROUTER1
```

```
WRITE(*,*) 'AND INNER CYLINDER RADIUS IS AT ',RINNER
```

```
C*****END OF GEOMETRIC DATA  
INPUT*****
```

```
C***** CONVERTING TO [m]
```

```
RINNER=RINNER/1000.
```

```
ROUTER=ROUTER1/1000.
```

```
ECCEN=ECCEN/1000.
```

```
HLAP=HLAP/1000.
```

```
AXLENGTH=AXLENGTH1/1000.
```

```
S=SIGMAA*PI/180.
```

```
DO I=0,NBLRAD
```

```
RCYL(I)=RCYL(I)/1000.
```

```
END DO
```

```
C***** GENERALIZING INNER AND OUTER CYLINDERS
```

```
RCYL(0)=RINNER
```

```
RCYL(NBLRAD)=ROUTER
```

```
C*****CALCULATING ECCENTRICITIES OF EACH  
CIRCLE****
```

```
DO I=0,NBLRAD
```

```
EXC(I)=ECCEN*(RCYL(I)-RINNER)/(ROUTER-RINNER)
```

```
END DO
```

```
C*****
```

```
C*****END OF  
CONVERSIONS*****
```

```
C*****INPUT OF INFORMATION PERTAINING TO THE  
GRID*****
```

```
WRITE(*,*)  
  
WRITE(*,*) 'GIVE NUMBER OF BLOCKS IN TANGENTIAL  
DIRECTION'  
  
WRITE(*,*) 'PER QUADRANT'  
  
READ(*,*) NBLTAN  
  
WRITE(*,*)  
  
WRITE(*,*) 'GIVE NUMBER OF CELLS IN EACH BLOCK'  
  
WRITE(*,*) 'TANGENTIAL, RADIAL AND AXIAL VALUES'  
  
READ(*,*) NCETAN,NCERAD,NCEAX  
  
WRITE(*,*)  
  
WRITE(*,*) 'GRID COMPRESSIBILITY FACTORS IN RADIAL  
DIRECTION'  
  
WRITE(*,*)  
  
DO I=1,NBLRAD  
  
WRITE(*,*) 'GIVE FACTOR OF SET OF RADIAL BLOCK No.',I  
  
READ(*,*) FRAD(I)  
  
END DO  
  
EPS=1.E-6  
  
WRITE(*,*) 'PRECISION IS ',EPS  
  
WRITE(*,*) 'TO CHANGE IT PRESS Y'  
  
READ(*,99) ICHOI  
  
IF (ICHOI.EQ. Y) READ(*,*) EPS  
  
NBLOCK=NBLRAD*NBLTAN*4  
  
C*****END OF INPUT*****
```

```
C*****OTHER VARIABLES *****  
  
  IPLOT=0  
  
  INEWDT=0  
  
  IARRAY=1  
  
  DBETA5=PI/(2*NBLTAN)  
  
  W=ACOS((ROUTER-HLAP)/ROUTER)  
  
C   TITLE  
  
C*****LIMITES*****  
  
  SIGMAR=W-S  
  
  AF=(ROUTER*(-COS(SIGMAR))+ECCEN)  
  
  AG=ROUTER*SIN(SIGMAR)  
  
  AL=ROUTER*(-(COS(SIGMAR-2*W)))+ECCEN  
  
  AM=ROUTER*SIN(-S-W)  
  
  C1=SQRT(AF*AF+AG*AG)  
  
  C2=SQRT(AL*AL+AM*AM)  
  
  ALFA1=ASIN(AG/C1)  
  
  ALFA2=ACOS(-AL/C2)  
  
  AX1=AF  
  
  AX2=AL  
  
  AY1=AG  
  
  AY2=AM  
  
  AY3=AY2-AX2*(AY2-AY1)/(AX2-AX1)  
  
  BETA2=ALFA2+ALFA1  
  
  BETA1=2*PI-BETA2  
  
  AUX1=(BETA1)*4*NBLTAN/(PI*2)  
  
  NBLOCK1=ANINT(AUX1)
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

NBLOCK2=4*NBLTAN-NBLOCK1

DBETA1=BETA1/NBLOCK1

DBETA2=BETA2/NBLOCK2

AK=((AY2-AY1)/(AX2-AX1))

AK5=ROUTER-HLAP-ECCEN

DTETA1=((PI/2)/NBLTAN)/NCETAN

NCEL1=DBETA1/DTETA1

NCEL2=DBETA2/DTETA1

C*****CALCULATIONS*****

OPEN(5,FILE='mesh3d.dat')

REWIND(5)

WRITE(5,98)IPL0T,IN0WDT,IARRAY

WRITE(5,97)

WRITE(5,96)NBLOCK,EPS

DO IBTAN=1,4*NBLTAN

 IBRAD=1

 IF (HLAP .LT. SMALL)THEN

 WRITE(5,95)NCETAN,NCERAD,NCEAX,FRAD(IBRAD)

 WRITE(5,91)

 CALL CALCBLOCK_A(IBRAD,IBTAN)

 ELSE IF (IBTAN.GT.0.AND.IBTAN.LE.NBLOCK1)THEN

 WRITE(5,95)NCEL1,NCERAD,NCEAX,FRAD(IBRAD)

 WRITE(5,91)

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
CALL CALCBLOCK_C(IBRAD,IBTAN,DBETA1,ALFA1)
```

```
ELSE IF (IBTAN.GT.NBLOCK_1.AND.IBTAN.LE.4*NBLTAN)THEN
```

```
WRITE(5,95)NCEL2,NCERAD,NCEAX,FRAD(IBRAD)
```

```
WRITE(5,91)
```

```
IF(SIGMAA.GT.SMALL)THEN
```

```
CALL
```

```
CALCBLOCK_B(IBRAD,IBTAN,DBETA2,NBLOCK1,PI,ALFA2,AK,AY3)
```

```
ELSE IF (SIGMAA.LE.SMALL) THEN
```

```
CALL
```

```
CALCBLOCK_D(IBRAD,IBTAN,DBETA2,NBLOCK1,ALFA2,AK5,ROUTER)
```

```
END IF
```

```
END IF
```

```
END DO
```

```
CLOSE(5)
```

```
STOP
```

```
C*****FORMATING*****
```

```
*
```

```
91 FORMAT('1,2,4,4,1,2 (6 FACES) 1-INLET,2-OUTLET,3-SYMP.,4-  
WALL')
```

```
92 FORMAT('1,2,1,2,1,2 (6 FACES) 1-INLET,2-OUTLET,3-SYMP.,4-  
WALL')
```

```
93 FORMAT('1,2,1,4,1,2 (6 FACES) 1-INLET,2-OUTLET,3-SYMP.,4-  
WALL')
```

```
94 FORMAT('1,2,4,2,1,2 (6 FACES) 1-INLET,2-OUTLET,3-SYMP.,4-  
WALL')
```

```
95 FORMAT(I2,',',I2,',',I2,',',I2,',',F5.3,',1.')
```

```

96 FORMAT(I3,',',E8.3,'      NBLOCK,EPS')
97 FORMAT('CONCENTRIC ANNULUS in 3-D')
98 FORMAT(I1,',',I1,',',I1,'    IPLOT (1-TO PLOT;3-TO PLOT ONLY)
      1 , INEWDT (=1 WRITE TO NEWD AT) IARRAY(1-CALL ARRAY)')
99 FORMAT(A)

      END

C
*****

C
*****

      SUBROUTINE CALCBLOCK_A(IRAD,ITAN)

      COMMON /VAR/
RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,DBETA5,FRAD(10)

      DIMENSION XNO(10),YNO(10)

      TETA=(ITAN-1)*DBETA5

      INO=1

      CALL CIRCLE(TETA,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)

      XNO(INO)=XX

      YNO(INO)=YY

C   XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA)-EXC(IRAD-1))
C   YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA)

      ZNODE=0.

      WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 2 OF BLOCK

      INO=2

      CALL CIRCLE(TETA+DBETA5/2.,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)

      XNO(INO)=XX

      YNO(INO)=YY

```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA/2.))-EXC(IRAD-1))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA/2.)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 3 OF BLOCK
```

```
INO=3
```

```
CALL CIRCLE(TETA+DBETA5,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)
```

```
XNO(INO)=XX
```

```
YNO(INO)=YY
```

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA))-EXC(IRAD-1))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 5 OF BLOCK
```

```
INO=5
```

```
CALL CIRCLE(TETA+DBETA5,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)
```

```
XNO(INO)=XX
```

```
YNO(INO)=YY
```

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA+DTETA))-EXC(IRAD))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA+DTETA)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 6 OF BLOCK
```

```
INO=6
```

```
CALL CIRCLE(TETA+DBETA5/2.,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)
```

```
XNO(INO)=XX
```

```
YNO(INO)=YY
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA+DTETA/2.)-EXC(IRAD))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA+DTETA/2.)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 7 OF BLOCK
```

```
INO=7
```

```
CALL CIRCLE(TETA,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)
```

```
XNO(INO)=XX
```

```
YNO(INO)=YY
```

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA)-EXC(IRAD))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 9 OF BLOCK
```

```
INO=9
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 10 OF BLOCK
```

```
INO=10
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 11 OF BLOCK
```

```
INO=11
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 13 OF BLOCK
```

INO=13

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 14 OF BLOCK

INO=14

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 15 OF BLOCK

INO=15

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

89 FORMAT(I2,',',F8.6,',',F8.6,',',F8.6)

RETURN

END

C

C

SUBROUTINE

CALCBLOCK_B(IRAD,ITAN,DBETA2,NBLOCK1,PI,ALFA2,AK,AY3)

COMMON /VAR/ RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,FRAD(10)

DIMENSION XNO(10),YNO(10)

AK=AK

AY3=AY3

TETA_B=((ITAN-1)-NBLOCK1)*(DBETA2)-ALFA2

C****CALCULATION OF NODE 1 OF BLOCK

```
INO=1

CALL CIRCLE(TETA_B,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)

XNO(INO)=XX

    YNO(INO)=YY

C   XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA)-EXC(IRAD-1))
C   YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA)

    ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 2 OF BLOCK

INO=2

CALL CIRCLE(TETA_B+DBETA2/2.,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)

XNO(INO)=XX

    YNO(INO)=YY

C   XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA/2.)-EXC(IRAD-1))
C   YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA/2.)

    ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 3 OF BLOCK

INO=3

CALL CIRCLE(TETA_B+DBETA2,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)

XNO(INO)=XX

    YNO(INO)=YY

C   XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA)-EXC(IRAD-1))
C   YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA)

    ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

C****CALCULATION OF NODE 5 OF BLOCK

INO=5

CALL RECTA(TETA_B+DBETA2,AY3,AK,XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 6 OF BLOCK

INO=6

CALL RECTA((TETA_B+(DBETA2/2)),AY3,AK,XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 7 OF BLOCK

INO=7

CALL RECTA(TETA_B,AY3,AK,XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 9 OF BLOCK

INO=9

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 10 OF BLOCK

INO=10

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 11 OF BLOCK

INO=11

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 13 OF BLOCK

INO=13

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 14 OF BLOCK

INO=14

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 15 OF BLOCK

INO=15

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

89 FORMAT(I2,',',F8.6,',',F8.6,',',F8.6)

RETURN

END

C

```

SUBROUTINE CALCBLOCK_C(IRAD,ITAN,DBETA1,ALFA1)
COMMON /VAR/ RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,FRAD(10)
DIMENSION XNO(10),YNO(10)

```

```

TETA_C=(ITAN-1)*(DBETA1)+ALFA1

```

```

! B=ROUTER-HLAP

```

```

! DELTAX=C-B

```

```

C****CALCULATION OF NODE 1 OF BLOCK

```

```

INO=1

```

```

CALL CIRCLE(TETA_C,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)

```

```

XNO(INO)=XX

```

```

YNO(INO)=YY

```

```

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA)-EXC(IRAD-1))

```

```

C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA)

```

```

ZNODE=0.

```

```

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

```

```

C****CALCULATION OF NODE 2 OF BLOCK

```

```

INO=2

```

```

CALL CIRCLE(TETA_C+DBETA1/2.,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)

```

```

XNO(INO)=XX

```

```

YNO(INO)=YY

```

```

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA/2.)-EXC(IRAD-1))

```

```

C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA/2.)

```

```

ZNODE=0.

```

```

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

```

C****CALCULATION OF NODE 3 OF BLOCK

INO=3

CALL CIRCLE(TETA_C+DBETA1,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA)-EXC(IRAD-1))

C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA)

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 5 OF BLOCK

INO=5

CALL CIRCLE(TETA_C+DBETA1,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA+DTETA)-EXC(IRAD))

C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA+DTETA)

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 6 OF BLOCK

INO=6

CALL
CIRCLE(TETA_C+DBETA1/2.,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA+DTETA/2.)-EXC(IRAD))

C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA+DTETA/2.)

ZNODE=0.

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 7 OF BLOCK
```

```
INO=7
```

```
CALL CIRCLE(TETA_C,EXC(IRAD),RCYL(IRAD),XX,YY)
```

```
XNO(INO)=XX
```

```
YNO(INO)=YY
```

```
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD)*COS(TETA)-EXC(IRAD))
```

```
C YNO(INO)=RCYL(IRAD)*SIN(TETA)
```

```
ZNODE=0.
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 9 OF BLOCK
```

```
INO=9
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 10 OF BLOCK
```

```
INO=10
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 11 OF BLOCK
```

```
INO=11
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 13 OF BLOCK
```

```
INO=13
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

C****CALCULATION OF NODE 14 OF BLOCK

INO=14

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 15 OF BLOCK

INO=15

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

89 FORMAT(I2,',',F8.6,',',F8.6,',',F8.6)

RETURN

END

SUBROUTINE

CALCBLOCK_D(IRAD,ITAN,DBETA2,NBLOCK1,ALFA2,AK5,ROUTER)

COMMON /VAR/ RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,FRAD(10)

DIMENSION XNO(10),YNO(10)

AK5=AK5

ROUTER=ROUTER

TETA_B=((ITAN-1)-NBLOCK1)*(DBETA2)-ALFA2

C****CALCULATION OF NODE 1 OF BLOCK

INO=1

CALL CIRCLE(TETA_B,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-1),XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA)-EXC(IRAD-1))

C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA)

ZNODE=0.

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
C****CALCULATION OF NODE 2 OF BLOCK
INO=2
CALL CIRCLE(TETA_B+DBETA2/2.,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)
XNO(INO)=XX
YNO(INO)=YY
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA/2.)-EXC(IRAD-1))
C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA/2.)
ZNODE=0.
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
C****CALCULATION OF NODE 3 OF BLOCK
INO=3
CALL CIRCLE(TETA_B+DBETA2,EXC(IRAD-1),RCYL(IRAD-
1),XX,YY)
XNO(INO)=XX
YNO(INO)=YY
C XNO(INO)=- (RCYL(IRAD-1)*COS(TETA+DTETA)-EXC(IRAD-1))
C YNO(INO)=RCYL(IRAD-1)*SIN(TETA+DTETA)
ZNODE=0.
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
C****CALCULATION OF NODE 5 OF BLOCK
INO=5
CALL RECTA2(TETA_B+DBETA2,AK5,ROUTER,XX,YY)
XNO(INO)=XX
YNO(INO)=YY
ZNODE=0.
WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE
```

C****CALCULATION OF NODE 6 OF BLOCK

INO=6

CALL RECTA2((TETA_B+(DBETA2/2)),AK5,ROUTER,XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 7 OF BLOCK

INO=7

CALL RECTA2(TETA_B,AK5,ROUTER,XX,YY)

XNO(INO)=XX

YNO(INO)=YY

ZNODE=0.

WRITE(5,89)INO,XNO(INO),YNO(INO),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 9 OF BLOCK

INO=9

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 10 OF BLOCK

INO=10

ZNODE=AXLENGTH

WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE

C****CALCULATION OF NODE 11 OF BLOCK

INO=11

ZNODE=AXLENGTH

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 13 OF BLOCK
```

```
INO=13
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 14 OF BLOCK
```

```
INO=14
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
C****CALCULATION OF NODE 15 OF BLOCK
```

```
INO=15
```

```
ZNODE=AXLENGTH
```

```
WRITE(5,89)INO,XNO(INO-8),YNO(INO-8),ZNODE
```

```
89 FORMAT(I2,',',F8.6,',',F8.6,',',F8.6)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
C
```

```
*****
```

```
SUBROUTINE CIRCLE(ATETA,EI,RI,XX,YY)
```

```
COMMON /VAR/
```

```
RCYL(0:10),EXC(0:10),AXLENGTH,DTETA,FRAD(10)
```

```
SMALL=1E-30
```

```
TGTETA=TAN(ATETA)
```

```
IF (COS(ATETA) .GT. SMALL) THEN
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
      XX=(EI-SQRT(RESOL(RI,TGTETA,EI)))/(1+TGTETA*TGTETA)
      YY=-TGTETA*XX
ELSE IF(COS(ATETA) .LT. -SMALL) THEN
      XX=(EI+SQRT(RESOL(RI,TGTETA,EI)))/(1+TGTETA*TGTETA)
      YY=-TGTETA*XX
ELSE IF(ABS(COS(ATETA)) .LE. SMALL .AND. SIN(ATETA) .GT. 0.)
THEN
      XX=0.
      YY=SQRT(RI*RI-EI*EI)
ELSE IF(ABS(COS(ATETA)) .LE. SMALL .AND. SIN(ATETA) .LT. 0.)
THEN
      XX=0.
      YY=-SQRT(RI*RI-EI*EI)
END IF
      RETURN
      END

REAL FUNCTION RESOL(RI,TGTETA,EI)
      RESOL=RI*RI*(1+TGTETA*TGTETA)-EI*EI*TGTETA*TGTETA
      RETURN
      END

SUBROUTINE RECTA(TETA,AY3,AK,XX,YY)
      XX=AY3/((-TAN(TETA))*(-1-AK*(1/(-TAN(TETA))))))
      YY=AY3/(1-(1/(-TAN(TETA))))*AK
      RETURN
      END
```

Escoamento laminar em condutas anelares com rotação interior e leito de aparas

```
SUBROUTINE RECTA2(TETA,AK5,ROUTER,XX,YY)
```

```
XX=-AK5
```

```
YY=TAN(TETA)*AK5
```

```
RETURN
```

```
END
```