

DESENVOLVIMENTO DA ZONA DE TRANSIÇÃO EM
DUTOS USADOS NA DECANTAÇÃO DE ALTA TAXA

Luiz Di Bernardo (*)

Harry E. Schulz (**)

CURRÍCULO

- (*) Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- (**) Professor Assistente Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

RESUMO

A teoria normalmente utilizada no projeto de decantadores de alta taxa tem sido aquela proposta por Yao no final da década de sessenta, que permite determinar o comprimento dos sedimentadores das mais variadas formas, quando o regime de escoamento é laminar. Entretanto, desde a entrada dos sedimentadores, onde se assume que o escoamento ocorre com velocidade uniforme, até uma distância em que o perfil de velocidade encontra-se totalmente desenvolvido, é possível que, sob certas circunstâncias, aquela partícula que se deseja remover, já tenha sedimentado ou está numa posição diferente daquela normalmente considerada, que é na parte superior do sedimentador.

Em geral, na prática, tem-se decantadores de alta taxa com sedimentadores constituídos de dutos de seção quadrada, retangular ou de placas planas paralelas, para os quais tem sido utilizada a equação de Langhaar, desenvolvida para dutos de seção circular, e que pode conduzir a erros apreciáveis. Assim, foi realizado o presente trabalho, com o objetivo de apresentar um modelo matemático para a determinação do comprimento da zona de transição de sedimentadores de seção quadrada e retangular, a partir de dados experimentais existentes na literatura.

ENDEREÇO: ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS/USP
Campus de São Carlos
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
13560 SÃO CARLOS - SP

0818815

SYSNO	0818815
PROD	002325
ACERVO EESC	

1 - INTRODUÇÃO

Com a publicação do trabalho teórico de Yao (8), em 1970, sobre a sedimentação laminar, o uso da decantação de alta taxa passou a ganhar muitos adeptos, pois dados experimentais sobre o uso de tubos introduzidos em decantadores convencionais, mostravam que era possível aumentar consideravelmente a vazão com eficiências maiores de remoção de partículas suspensas.

Em seu trabalho, Yao (8) apresenta os fundamentos teóricos da sedimentação em dutos com seção circular e em placas planas paralelas, com o escoamento laminar completamente estabelecido (ver figura 1), porém, a respeito da zona de transição, que existe a partir da entrada do sedimentador, onde o escoamento é uniforme, até aquela condição assumida por Yao, muito pouco foi apresentado. De acordo com esse pesquisador, a remoção de uma determinada partícula seria muito pouco influenciada pois, no escoamento uniforme, o parâmetro Sc seria igual à unidade, como o é no regime laminar. Segundo Yao, o parâmetro Sc caracteriza o tipo de sedimentador e representa, de certo modo, a diferença no desempenho de dois sedimentadores diferentes, quando os demais fatores são iguais, tendo seu conceito, recentemente, aplicado por Di Bernardo e colaboradores (3) para dutos de seção quadrada e retangular.

Usualmente, tem sido empregada a equação de Langhaar (citado em 4), válida para um duto de seção circular, obtendo-se um comprimento relativo L' , que deve, segundo Yao, ser acrescido ao comprimento relativo necessário para a sedimentação da partícula considerada, L , de forma que o comprimento total relativo, L_t , resulte igual à soma $L + L'$, se $L' \leq L$, e $L_t = 2L$, se $L' \geq L$. O comprimento relativo, na zona de transição de um duto de seção circular é dado por :

$$L' = 0,06 \frac{V_o \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

em que :

V_o : velocidade média de escoamento (m/s)

D : diâmetro do duto circular (m)

ν : viscosidade cinemática da água (m^2/s)

$L' = l' / D$

Yao (8), em 1973, publicou outro trabalho a respeito da sedimentação em dutos e placas, em que comparou as características hidráulicas dos sedimentadores com escoamento ascendente e descendente, porém, nada acrescentou de concreto sobre a zona de transição, de forma que a equação 1 tem sido usada indiscriminadamente para a determinação do comprimento daquela parte do sedimentador, independentemente da forma do mesmo. Adicionalmente, é possível que

muitas partículas suspensas tenham sido removidas na zona de transição ou que estejam numa posição inferior àquela admitida por Yao, que é no ponto B' ao entrar na zona de sedimentação (ver figura 1), cujo comprimento relativo, L , é determinado segundo a teoria proposta por esse pesquisador. Há pouco tempo, Di Bernardo e Cunha (1), verificaram que esse comprimento L pouco diferia em dutos retangulares com diversas geometrias, para a obtenção de uma mesma eficiência de remoção de partículas flocculentas, o que, de certo modo, indica que estaria ocorrendo sedimentação daquelas partículas na zona de transição dos sedimentadores estudados.

Recentemente, Fadel e Baumann (4), propuzeram um modelo matemático para verificar a trajetória percorrida por uma determinada partícula na zona de transição de dutos de seção circular, que entra na posição superior desta. Esses pesquisadores observaram que a partícula atingia o fundo do sedimentador antes do final da zona de transição, determinada pela equação 1 (2,7 m), para as seguintes condições: $D = 75$ mm ; $V_0 = 45$ cm / min ; $\theta = 5^\circ$; $V_{sc} = 3$ cm / min e $t = 32^\circ\text{C}$.

Considerando a grande importância da decantação de alta taxa, foi desenvolvido o presente trabalho, com o objetivo de propor um modelo matemático para a determinação do comprimento da zona de transição em dutos de seção quadrada e retangular, a partir de dados experimentais e da teoria existentes na literatura.

2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A evolução do perfil de velocidade, a partir da entrada em um duto, ocorre para qualquer geometria, desde um perfil de velocidade uniforme até aquele característico do regime permanente, denominado de perfil desenvolvido. Ao longo da zona de transição, pode-se dividir o escoamento em duas regiões : i) de escoamento central acelerado ; ii) de camada limite. Essas duas regiões são mostradas na figura 2, para dutos de seção retangular e circular.

Quando o escoamento é laminar, o perfil desenvolvido é parabólico em dutos de seção circular e entre placas planas paralelas, porém, para outras formas, como a retangular mostrada na figura 2, as equações dos perfis de velocidade são muito complexas. A determinação analítica do comprimento da zona de transição requer o uso das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, com condições de contorno convenientemente escolhidas, o que induziria ao pensamento de que, para cada forma, devesse existir uma expressão que quantificasse o comprimento da quela zona. Com base em informações encontradas na literatura, há indicações de que, para os casos

práticos normalmente encontrados na decantação de alta taxa, pode ser usada uma expressão geral, do seguinte tipo :

$$\frac{l'}{De} = C \cdot Re \quad (2)$$

Nesta equação, l' representa o comprimento da zona de transição, De uma dimensão característica para o escoamento e Re, o número de Reynolds obtido a partir de De e da velocidade média do escoamento, V_0 , sendo, portanto, $Re = V_0 \cdot De / \nu$. Essa dimensão característica é usualmente escolhida como :

$$De = \frac{4 \cdot \text{área da seção molhada}}{\text{perímetro molhado}} \quad (3)$$

É interessante observar, portanto, que o efeito das diferentes geometrias aparece explicitamente na equação 2, apenas no valor da constante C. Para um duto de seção circular, segundo a equação de Langhaar, a constante C é da ordem de 0,06 e, como neste caso, De coincide com o diâmetro D, tem-se :

$$\frac{l'}{D} = 0,06 \cdot \left(\frac{V_0 \cdot D}{\nu} \right) \quad (4)$$

Para dutos de seção quadrada, Goldstein e Kreid (5), citam o trabalho teórico de Han, em que a constante C é igual a 0,075, porém, esses autores, após realizarem uma investigação experimental, utilizando anemometria a laser, obtiveram perfis reais de velocidade, conforme se vê nas figuras 3 e 4, para duas seções transversais distintas, central e diagonal, respectivamente, em que se observa, claramente, a evolução da região central acelerada e a de camada limite. Esses pesquisadores concluíram que a constante C, para aquela forma, deve ser da ordem de 0,08, e, portanto, a equação 2 transforma-se em :

$$\frac{l'}{a} = 0,08 \cdot \left(\frac{V_0 \cdot a}{\nu} \right) \quad (5)$$

em que :

a : lado do quadrado (m)

Por outro lado, Sparrow e colaboradores (6), efetuaram medidas para o perfil de velocidade em dutos de seção retangular, com relações entre os lados de 2 : 1 e 5 : 1, podendo-se observar, nas figuras 5ab e 6ab, os resultados obtidos para esses dutos, respectivamente. Uma vez mais, percebe-se a evolução da região central acelerada e a de

canada limite. Esses pesquisadores chegaram à conclusão que a constante C, para as duas seções retangulares estudadas, o valor da constante C deveria ser maior ou igual a 0,08. Portanto, sendo a o lado menor e b, o maior do duto, e assumindo-se C igual a 0,08, tem-se:

$$\frac{l^*}{\left(\frac{2ab}{a+b}\right)} = 0,08 \cdot \left[\frac{2Vo \cdot a \cdot b}{\nu(a+b)} \right] \quad (6)$$

Fazendo-se $H = a/b$, de modo que $H \leq 1$, a equação 6 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{l^*}{a} = 0,08 \frac{4}{(1+H)^2} \left(\frac{Vo \cdot a}{\nu} \right) \quad (7)$$

Fazendo-se $Re_a = Vo \cdot a / \nu$, a equação 7 muda para:

$$\frac{l^*}{a} = \frac{0,36}{(1+H)^2} Re_a \quad (8)$$

A equação 8 é decorrente de resultados experimentais de diferentes fontes, arranjados de forma conveniente. Nota-se que a constante C aparece, agora, como dependente do parâmetro H, o qual, para os dados originais, deve estar compreendido entre 0,2 e 1. É muito difícil extrapolar a validade da equação 8 para valores de H menores que 0,2, como por exemplo, o caso em que H tende a zero, configurando um sedimentador de placas planas paralelas. Acontece que, no número de Reynolds para este último sedimentador, a dimensão característica é a distância a entre as placas, não sendo possível o uso da equação 3, pois quando H tende a zero, De resultaria igual a 2a. Entretanto, é de se esperar que a constante C seja maior que 0,08, pois, no caso dos dutos de seção quadrada e retangular, há influência dos perfis de velocidade dos dois planos, enquanto que, para o de placas planas paralelas, tem-se somente o perfil em desenvolvimento na direção longitudinal.

3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equação 8 pode ser usada de forma bastante segura para a determinação do comprimento da zona de transição em dutos de seção quadrada e retangular ($a \leq 5b$). Através do uso de dados da literatura, como os apresentados por Goldstein e Kreid (5) e Sparrow e colaboradores (6), como os mostrados nas figuras 8 e 9, em que se tem, em ordenadas, a relação u/Vo , sendo u a velocidade no centro da região acelerada, e em abscissas, a relação $(x/De.Re)$, seria

possível realizar estudos teóricos e experimentais a respeito da trajetória percorrida pelas partículas suspensas na zona de transição de dutos com seção quadrada e retangular.

Para que se tenha uma idéia do comprimento da zona de transição, considere-se os sedimentadores de seção quadrada ($a = 5$ cm), de seção retangular ($a = 5$ cm e $b = 10$ cm ou 25 cm) e de seção circular ($D = 5$ cm), para as seguintes condições : $V_0 = 20$ cm / min ; temperatura = 20 °C .

a) duto de seção quadrada

Da equação 8, com $H = 1$, tem-se :

$$\frac{l'}{0,05} = \frac{0,36}{(1+1)^2} \left(\frac{0,2 \cdot 0,05}{60 \cdot 10^{-6}} \right) \longrightarrow l' = 0,75 \text{ m}$$

b) duto de seção retangular com $b = 2a$

$$\frac{l'}{0,05} = \frac{0,36}{(1 + 0,5)^2} \left(\frac{0,2 \cdot 0,05}{60 \cdot 10^{-6}} \right) \longrightarrow l' = 1,33 \text{ m}$$

c) duto de seção retangular com $b = 5a$

$$\frac{l'}{0,05} = \frac{0,36}{(1 + 0,2)^2} \left(\frac{0,2 \cdot 0,05}{60 \cdot 10^{-6}} \right) \longrightarrow l' = 2,08 \text{ m}$$

d) duto de seção circular com $D = 5$ cm

Da equação 4, tem-se :

$$\frac{l'}{0,05} = 0,06 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 0,05}{60 \cdot 10^{-6}} \right) \longrightarrow l' = 0,50 \text{ m}$$

Com base nesses resultados, conclui-se que os sedimentadores com forma quadrada ou circular são mais convenientes que os de seção retangular e de placas planas paralelas. Entretanto, ao se considerar a seção central, no sentido longitudinal do sedimentador, Yao (6) e Di Bernardo e colaboradores (3) mostraram que o comprimento necessário para que uma determinada partícula seja removida em um sedimentador de placas planas paralelas, é cerca de 1,4 vezes menor que aquele requerido nos circulares ou quadrados. Adicionalmente, não se está considerando a variedade de tamanhos das partículas suspensas que comumente ocorre nas águas floculadas e, tampouco, a possível sedimentação de parte delas na zona de transição, conforme observado por Di Bernardo e Cunha (1).

Ao que tudo indica, somente após a realização de estudos que levem em conta todos os fatores relacionados com o escoamento e a sedimentabilidade das partículas suspensas, é que será possível decidir-se por uma ou outra forma dos sedimentadores usualmente empregados na decantação de alta taxa.

4 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - DI BERNARDO, L. & CUNHA, F. N. R. Investigaçã Experimental Sobre o Uso de Dutos com Seção Retangular na Decantação de Alta Taxa 10^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL Goiânia, Setembro de 1991.
- 2 - DI BERNARDO, L., ROMA, V. N. L. & SHULLE, H. E. Características Hidráulicas dos Sedimentadores Laminares 10^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL Goiânia - GO , setembro de 1991
- 3 - CUNHA, F. N. R. & DI BERNARDO, L. Teoria Hidráulica e Eficiência dos Decantadores de Alta Taxa IV SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL Belo Horizonte, MG , dez.1990
- 4 - FADEL, A. A. & BAUMANN, E. R. Tube Settler Modeling JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING - AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS Vol. 116 (1) : 107 - 124 , Jan/Feb. 1990
- 5 - GOLDSTEIN, R. J. & KREID, D. K. Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter JOURNAL OF APPLIED MECHANICS - TRANSACTIONS OF THE ASME p : 813 - 818 , Dec. 1967
- 6 - SPARROW, E. M. , NIXON, C. W. & SHAVIT, G. Experiments on Laminar Flow Development in Rectangular Ducts JOURNAL OF APPLIED MECHANICS - TRANSACTIONS OF THE ASME p : 116 - 124, March , 1967
- 7 - ROUSE, H. Advanced Mechanics of Fluids Chap. V - Laminar Motion p : 200 - 280 JOHN WILEY & SONS N. Y.-USA , 1959
- 8 - YAO, K. M. Theoretical Study of High-Rate Sedimentation JOURNAL OF WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION vol. 42 (2) : 218, 1970
- 9 - YAO, K. M. Design of High-Rate Settlers JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING DIVISION- PROC. ASCE vol. 99 (EE5) p : 621 , 1973

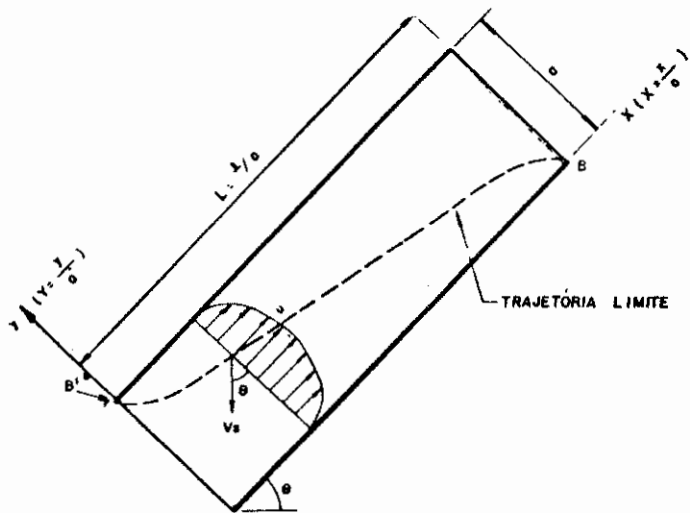


FIGURA 1 - ESQUEMA DO MODELO TEÓRICO ADMITIDO POR YAO

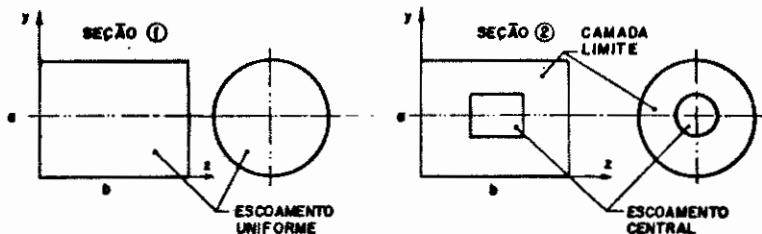
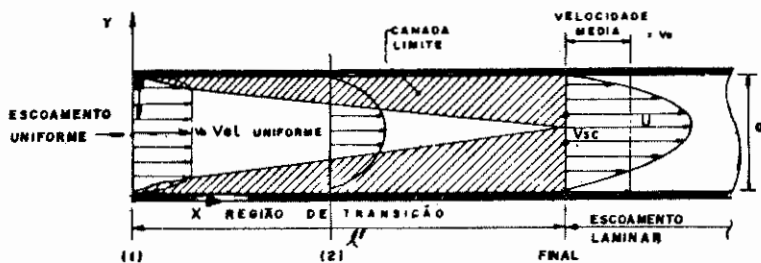


FIGURA 2 : REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REGIÃO DE TRANSIÇÃO EM DUTOS RETANGULARES E CIRCULARES

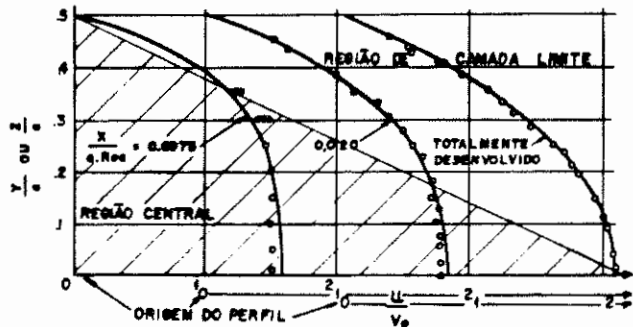


FIGURA 3 - DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE EM DUTO DE SEÇÃO QUADRADA - PLANO CENTRAL (5)

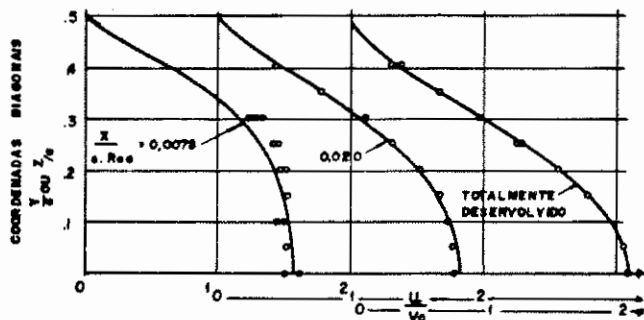
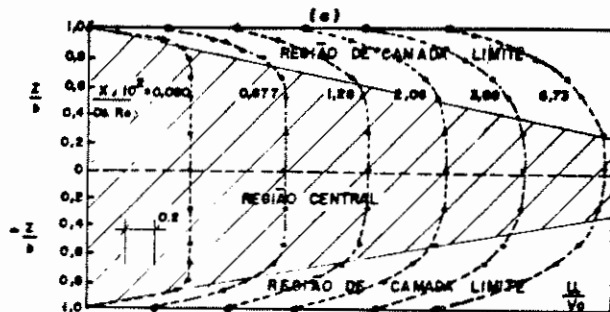


FIGURA 4 - DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE EM DUTO DE SEÇÃO QUADRADA - PLANO DIAGONAL (5)



ORIGEM DO PERFIL CORRESPONDENTE

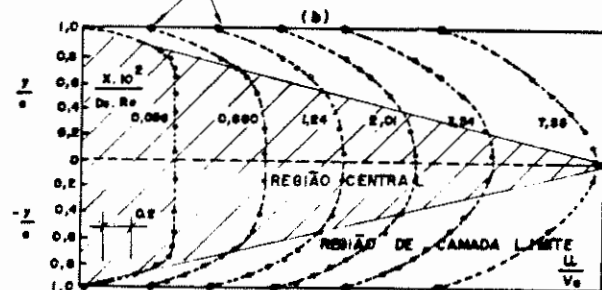
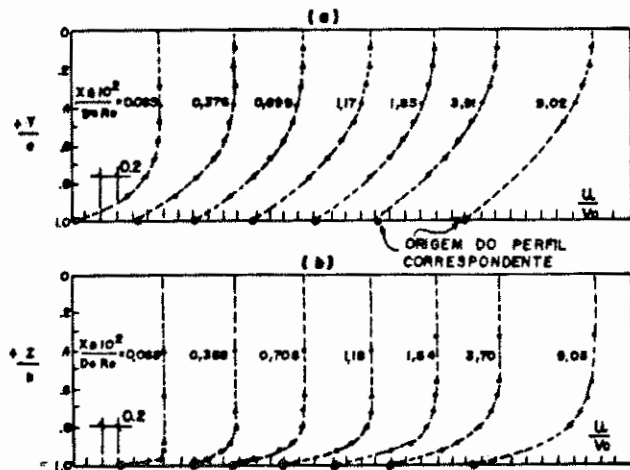


FIGURA 5 - DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE EM DUTO DE SEÇÃO RETANGULAR : $b \geq 2a$ (6)



FIGURAS 5 - DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE EM DUTO DE SEÇÃO RETANGULAR $b = 5a$ (6)

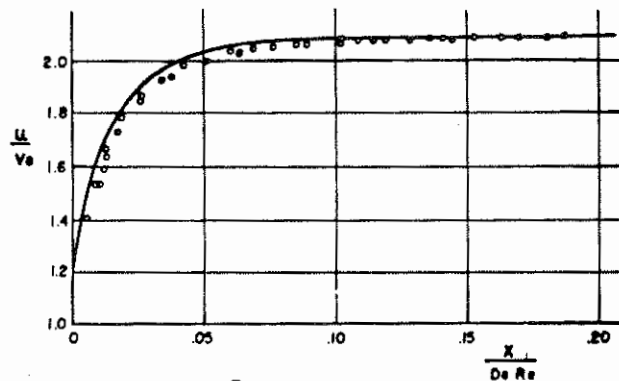


FIGURA 7 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NO CENTRO DO DUTO DE SEÇÃO QUADRADA (5)

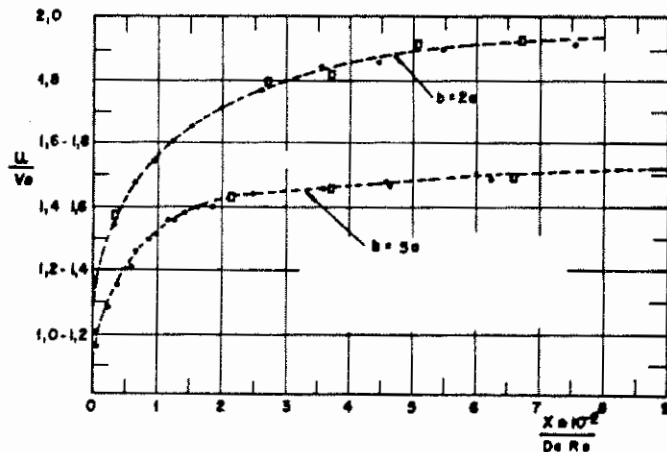


FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NO CENTRO DO DUTO DE SEÇÃO RETANGULAR (6)