

Limiar de Início de Movimento de Fragmentos de Conchas sob Ação de Ondas

Elisa Mitsue Yokemura¹, Eduardo Puhl² & Cristiano Fick³

Resumo: Este trabalho buscou preencher uma lacuna do conhecimento relativo ao início de movimento de fragmentos de conchas sob ação de fluxos oscilatórios a partir de experimentos em laboratório. Foram utilizados para isso, fragmentos de conchas de diversas espécies, principalmente de *Anomalocardia brasiliiana* e *Tellina sp.*, de 4 faixas granulométricas distintas. Através dos experimentos, obteve-se o perfil de velocidades próximo ao fundo da onda que iniciou o movimento dos sedimentos. A partir do perfil, foi possível obter parâmetros adimensionais como Shields (θ), Reynolds do grão (Re^*) e número de mobilidade (M_n) e comparar os resultados com outros autores que utilizaram tanto sedimentos de origem biológica (conchas) quanto siliciclásticos (quartzo). Quando comparados apenas em termos de θ e Re^* , os resultados deste trabalho ficam dentro da região prevista para sedimentos siliciclásticos do limiar de movimento, entretanto, possuem divergência acentuada quando comparados com outros autores que utilizaram sedimentos de conchas. Entretanto, ao relacionar M_n e Re^* , os resultados deste trabalho convergem com os resultados de outros autores que utilizaram sedimentos de conchas, com o M_n tendendo a aumentar a medida que o Re^* aumenta. Como o M_n incorpora o efeito de forma do grão, pois relaciona a velocidade de início de movimento com a velocidade de queda, o resultado vai de encontro com a observação de outros autores. No caso de sedimentos de origem biológica, outras características do grão, como a forma e a estrutura, possuem importante influência nos parâmetros de início de movimento, exigindo assim que outros parâmetros sejam analisados.

Abstract: This study aimed to fill a knowledge gap regarding the initiation of motion of shell fragments under oscillatory flows through laboratory experiments. To this end, shell fragments from various species were used, mainly *Anomalocardia brasiliiana* and *Tellina sp.*, across four distinct grain-size ranges. From the experiments, near-bed velocity profiles associated with the onset of sediment motion were obtained. Based on these profiles, it was possible to derive dimensionless parameters such as the Shields parameter (θ), grain Reynolds number (Re^*), and mobility number (M_n), and to compare the results with those of other authors who used both biogenic (shell) and siliciclastic (quartz) sediments. When compared only in terms of θ and Re^* , the results of this study fall within the predicted region for the threshold of motion of siliciclastic sediments; however, they show significant divergence when compared with studies that used shell sediments. On the other hand, when relating M_n and Re^* , the results of this study converge with those of other authors who used shell sediments, with M_n tending to increase as Re^* increases. Since M_n incorporates the effect of grain shape—by relating the velocity at the onset of motion to the settling velocity—this result is consistent with observations reported by other authors. In the case of biogenic sediments, other grain characteristics, such as shape and structure, play an important role in the parameters governing the initiation of motion, thus requiring that additional parameters be considered.

Palavras-Chave: Início de Movimento, fragmentos de conchas, ondas, modelagem física.

Keywords: Threshold of motion, shell fragments, waves, physical model.

1) Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – IPH/UFRGS. elisayokemura@gmail.com

2) Departamento de Hidromecânica e Hidrologia – IPH/UFRGS. eduardo.puhl@ufrgs.br

3) Núcleo de Estudos de Correntes de Densidades – IPH/UFRGS. cristiano.fick@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Entender o desempenho hidrodinâmico dos sedimentos é importante para refinar as interpretações do seu ambiente deposicional. Além disso, contribui para o aprimoramento de predições numéricas da evolução de um ambiente costeiro e de águas rasas, por exemplo. Um passo fundamental nesse processo é identificar as condições críticas de escoamento que desencadeiam o início do movimento dos grãos por meio de experimentos controlados em laboratório.

Após Shields (1936), que investigou o início do movimento de partículas de quartzo em escoamento unidirecional, diversos estudos deram continuidade ao assunto (Inman, 1949; Paphitis, 2001), mas poucos consideraram sedimentos de origem biológica — compostos predominantemente por fragmentos de organismos vivos — e ainda menos abordaram o papel do escoamento oscilatório (ondas). Fick et al. (2019) estudaram o início de movimento de sedimentos de conchas sob escoamentos induzidos por ondas, preenchendo uma importante lacuna de conhecimento, já que o transporte de conchas de moluscos é fortemente influenciado por escoamentos oscilatórios em ambientes costeiros dominados por ondas. No entanto, eles utilizaram apenas conchas de moluscos não fragmentadas. Outros autores, ainda, como Paphitis (2002), Rieux et al. (2019) e Duperron et al. (2025) estudaram o início de movimento de fragmentos de conchas (bioclastos) em fluxos unidirecionais de espécies diferentes.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo estabelecer as condições de início de movimento de fragmentos de conchas submetidos a escoamento oscilatório em um canal de ondas, complementando o trabalho de Fick et al. (2019). Quatro classes granulométricas dentro da faixa de areia, de acordo com a escala de Wentworth (1922), foram testadas no canal de ondas. Com base nos dados hidrodinâmicos foi possível caracterizar o início do movimento dos fragmentos, e assim, comparar com outros estudos da literatura que também investigaram o início do movimento de partículas com e sem origem biológica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Fragmentos de concha

Os fragmentos de conchas que foram utilizados são provindos da região de Jaguaruna, SC. Dentre as espécies de conchas encontradas na região as mais abundantes são a *Anomalocardia brasiliiana* e *Tellina sp* (Fornari et al., 2012). A faixa granulométrica de fragmentos escolhidos para os ensaios foi a de areia segundo a escala de Wentworth (1922), com o tamanho mínimo de 0,7 mm e máximo de 1,7 mm. Essa faixa foi dividida por peneiramento em 4 outras faixas granulométricas conforme Figura 1, para ensaios individuais.



Figura 1 – Faixas granulométricas utilizadas nos ensaios.

Início de movimento

Para investigar o início do movimento, foram conduzidos experimentos em um canal de ondas bidimensional com 40 m de comprimento e 1 m de largura (Figura 2a). O canal é equipado com uma pá conectada a um braço articulado que gera ondas por meio de movimento circular (gerador de ondas). Os parâmetros ajustáveis entre os ensaios incluem a profundidade da água no canal, o comprimento do braço do gerador de ondas (S) e a frequência de rotação do braço da pá (F_m). Na extremidade jusante do canal, foi construída uma praia artificial composta por cascalho e tijolos para dissipar a energia das ondas. Além disso, uma parede lateral de vidro permite a observação visual dos experimentos.

Para simular a rugosidade do leito e, assim, obter condições de energia de onda mais próximas da realidade, foi utilizada uma placa de acrílico de 1 m $\times$ 1 m, sobre a qual fragmentos de conchas na faixa de 0,6–2 mm foram colados. Os fragmentos cobriam toda a placa, exceto por uma abertura central de 10 cm $\times$ 10 cm, onde o sedimento a ser testado quanto ao início do movimento era colocado.

A velocidade das ondas foi medida utilizando um velocímetro acústico por efeito Doppler (ADVP) da Nortek a 100Hz, que mede a velocidade nos três eixos (x , y e z) em 28 pontos dentro de um volume de medição com 3 cm de altura e seção transversal circular, localizado a 4 cm abaixo do transmissor. De acordo com recomendações da Nortek, medições correspondentes aos primeiros 1–1,5 cm do volume amostrado devem ser descartadas, sendo o ponto ideal de amostragem localizado no centro do volume de medição, conhecido como *sweet spot*. Devido à existência do *sweet spot* e seguindo o procedimento adotado por Rieux et al. (2019), as medições de velocidade foram

realizadas em três diferentes distâncias em relação ao leito: 6 cm, 7 cm e 8 cm (Figura 2b). Essa abordagem resultou em perfis de velocidade sobrepostos, permitindo a remoção das medições nas extremidades do volume amostral.

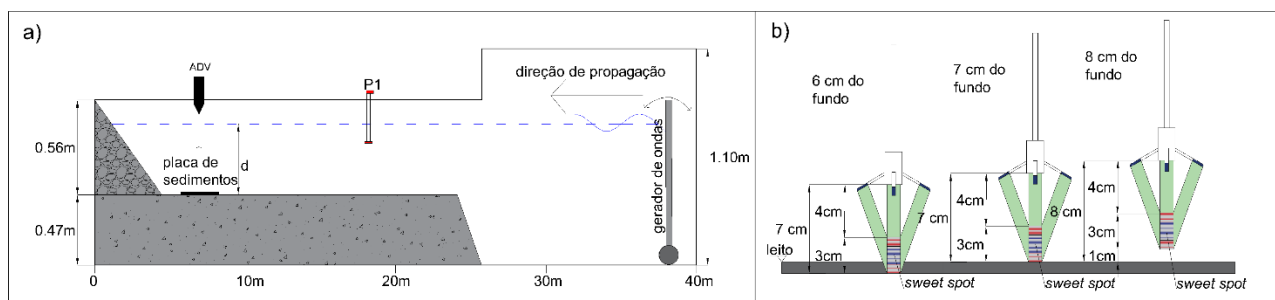


Figura 2 – (a) Esquema do canal de ondas utilizado nos ensaios e (b) posição de medição do ADV.

Para medir a variação do nível da água e, assim, obter a altura e o período das ondas, foi utilizada uma sonda capacitiva (P1, Figura 2a) fabricadas pela DHI, modelo 202.

Para avaliar a influência da altura da coluna d'água no início de movimento, cada fração granulométrica foi testada em três diferentes profundidades: 0,25 m, 0,30 m e 0,40 m, totalizando 12 condições experimentais distintas (Tabela 1). Em cada ensaio, os sedimentos foram posicionados sobre a placa de modo a cobrir toda a abertura central de 10×10 cm, sendo distribuídos uniformemente na mesma altura do sedimento fixo. Em seguida, o gerador de ondas foi acionado com a menor frequência (F_m) e com um valor fixo de S igual a 0,4 m, gerando uma condição específica de onda. Caso a amostra não atingisse o início do movimento, o gerador era desligado e aguardava-se um tempo mínimo de 10 min para eliminação das ondas residuais no canal. Posteriormente, o procedimento foi repetido com pequenos incrementos de F_m até que o movimento das conchas fosse estabelecido.

Nome do ensaio	Profundidade (m)	Amplitude do Braço batedor de ondas - S (m)
0,750mm 25cm	0,25	0,4
0,750mm 30cm	0,3	
0,750mm 40cm	0,4	
0,850mm 25cm	0,25	
0,850mm 30cm	0,3	
0,850mm 40cm	0,4	
1,10mm 25cm	0,25	
1,10mm 30cm	0,3	
1,10mm 40cm	0,4	
1,40mm 25cm	0,25	
1,40mm 30cm	0,3	
1,40mm 40cm	0,4	

Tabela 1: Nome do ensaio de acordo com a faixa granulométrica, a profundidade e braço do batedor utilizados.

Como definição de início do movimento, foi adotado o conceito descrito por Kramer (1935) e também utilizado por Rieux et al. (2019). Nessa abordagem, considera-se que o início do movimento ocorre quando o número de partículas em movimento excede o que pode ser contado visualmente, mas ainda é insuficiente para gerar qualquer modificação mensurável no leito.

A Lei da Parede, incorporada ao efeito da rugosidade conforme Yaglom (1979), permite que a velocidade média do escoamento (u) a uma altura z_m seja expressa conforme a solução logarítmica da equação 3. Onde z_0 é a altura da rugosidade, k é a constante de von Kármán e $u_* = \kappa/tg\theta$. Assim, para determinar a tensão de cisalhamento do fundo através de $\tau = \rho u_*^2$, a velocidade de cisalhamento (u^*) foi obtida graficamente através da regressão linear do perfil da média dos picos da velocidade orbital horizontal próximo ao fundo medido com o ADVP (Figura 3).

$$u(z_m) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z_m}{z_0} \quad (3)$$

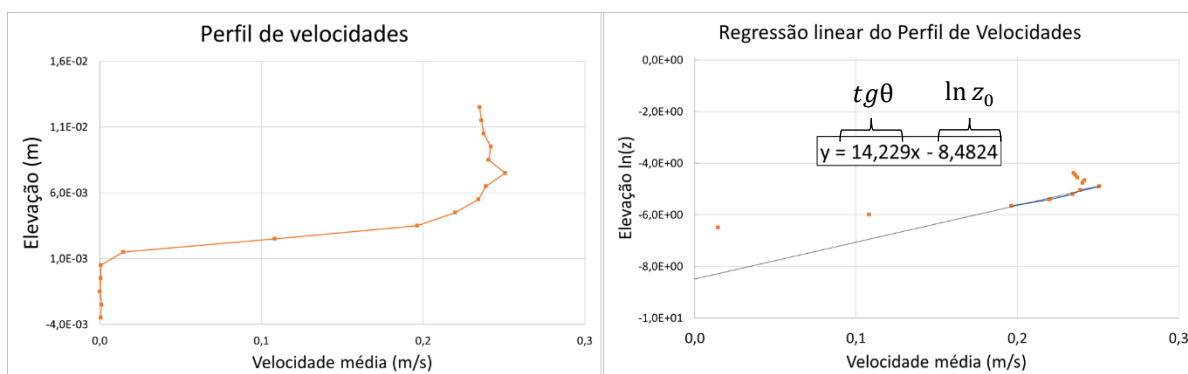


Figura 3 – Regressão linear do perfil de velocidades próximo ao fundo para encontrar graficamente u^* .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a medição das velocidades, foi possível gerar o perfil de velocidades conforme exemplo (Figura 4) para todas as condições de onda de início de movimento identificadas nos ensaios, onde as velocidades ditas “negativas” são as de sentido oposto à direção da onda. Com a parte do perfil mais próxima ao fundo e a velocidade no sentido da onda, foi possível obter a velocidade de cisalhamento u^* através da regressão linear deste perfil.

A Tabela 2 mostra os resultados dos cálculos dos parâmetros através da velocidade de cisalhamento obtida pelo perfil de velocidades lido na condição de ondas que iniciou o movimento de cada fração granulométrica. Onde o Mn corresponde ao número de mobilidade calculado como $Mn = u^*/w$, sendo w a velocidade de queda dos fragmentos que foi determinada através de ensaios em um tubo de queda.

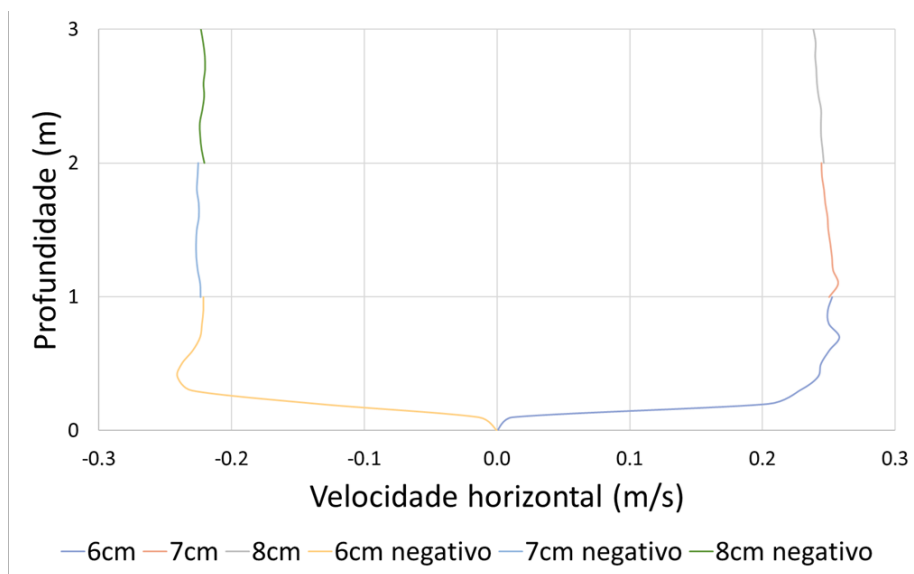


Figura 4: Exemplo de perfil médio dos picos da velocidade orbital horizontal integrado por 3 medições em diferentes distâncias do leito, com velocidades para o lado positivo (na direção da onda) e negativo (na direção contrária à onda).

Nome do ensaio	$u^*(\text{m/s})$	$Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$	$\tau \text{ (N/m}^2\text{)}$	$\theta = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gD}$	Mn
0.750mm 25cm	0.026	19.94	0.66	0.05	0.26
0.750mm 30cm	0.021	16.07	0.43	0.03	0.21
0.750mm 40cm	0.026	20.59	0.70	0.06	0.27
0.850mm 25cm	0.022	21.48	0.49	0.03	0.21
0.850mm 30cm	0.028	27.41	0.79	0.05	0.27
0.850mm 40cm	0.025	24.80	0.65	0.04	0.24
1.10mm 25cm	0.032	40.51	1.05	0.05	0.26
1.10mm 30cm	0.033	40.75	1.06	0.05	0.26
1.10mm 40cm	0.025	31.80	0.65	0.03	0.20
1.40mm 25cm	0.040	62.25	1.61	0.06	0.31
1.40mm 30cm	0.037	57.42	1.37	0.06	0.28
1.40mm 40cm	0.028	43.13	0.77	0.03	0.21

Tabela 2: Resultados dos parâmetros calculados para cada ensaio.

Paphitis (2001) fez um compilado de dados de diversos autores que estudaram início de movimento em fluxos unidirecionais a fim de ampliar o estudo de Shields (1936). Com isso, criou 3 curvas representativas do início de movimento, gerando uma região maior de abrangência. Na Figura 5, os resultados deste trabalho são comparados com as curvas de Paphitis (2001) assim como outros autores como Paphitis (2002), Rieux et al. (2019) e Duperron et al. (2025) que estudaram início de movimento de fragmentos de conchas em fluxos unidirecionais de espécies diferentes e por fim, Fick et al. (2019) que utilizou fluxo oscilatório porém apenas conchas inteiras.

Os resultados mostram-se dentro dos limites definidos por Paphitis (2001) e seguindo a mesma tendência das curvas (Figura 5a). Comparando com os demais autores, os valores ficam acima dos resultados de Fick et al. (2019) e Rieux et al. (2019) e abaixo dos valores de Duperron et al. (2025) para valores similares de Re^* . Um dos fatores que podem influenciar em tal resultado, é que tanto Shields (θ) quanto Re^* falham em incorporar os efeitos da forma, densidade e estrutura dos fragmentos nos resultados. Rieux et al. (2019) evidenciou como esses 3 fatores, além da composição da concha que a classifica como folhada ou compacta, influenciam na velocidade de queda e velocidade de início de movimento dos fragmentos. Duperron et al. (2025) acrescenta que o formato achatado e os ângulos acentuados das partículas também contribuem para uma maior força de atrito necessária para o início de movimento.

Uma tentativa de incorporar os efeitos de forma dos grãos no limiar de início de movimento foi feita por Rieux et al. (2019) e Duperron et al. (2025) que consiste em utilizar o Número de Mobilidade (M_n), ao invés de Shields (θ). Isso porque o M_n inclui a velocidade de queda dos fragmentos. Ao comparar os resultados com este trabalho (Figura 5b), os valores ficam menos dispersos e seguem a mesma linha de tendência, porém, se afastam das curvas propostas por Paphitis (2001). Isto pode ser justificado pela diferença entre os sedimentos, enquanto Paphitis (2001) compilou trabalhos que utilizaram majoritariamente grãos de quartzo, os outros 3 utilizam fragmentos de conchas.

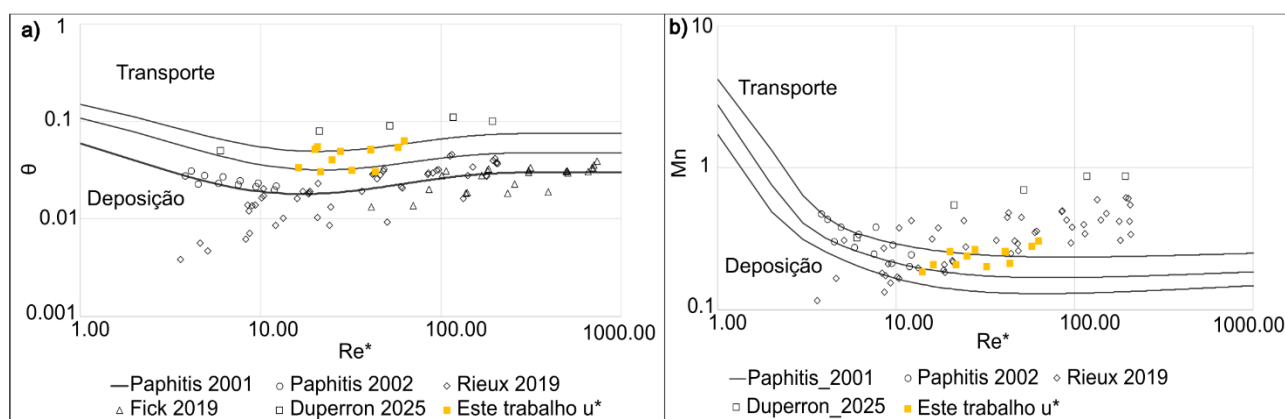


Figura 5: Resultados deste trabalho comparados com outros autores que também utilizaram sedimentos de conchas.

CONCLUSÃO

Os sedimentos de origem biológica possuem características variáveis entre as diferentes espécies, tornando-os complexos objetos de estudo. Os fragmentos utilizados neste estudo mostram-se com comportamento convergente aos outros sedimentos de origem biológica encontrados na literatura, porém, com algumas diferenças. Quando comparados conforme o número de Shields (θ),

os resultados encontram-se dentro das curvas para sedimentos siliciclásticos previstas por Paphitis (2001), entretanto, possuem uma grande variabilidade em relação a outros sedimentos de origem biológica. Quando estes mesmos resultados são comparados através no Número de Mobilidade (M_n), que incorpora os efeitos de forma através da velocidade de queda, há uma menor variabilidade e a tendência de aumentar o M_n a medida que o Re^* aumenta, é a mesma para todos os autores. Esse resultado vai de encontro com os demais autores, de que para o caso de sedimentos de origem biológica, outros fatores como a estrutura e a forma do grão, possuem grande influência no limiar do início de movimento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao NECOD (UFRGS) pelo suporte técnico e disponibilização das instalações e equipamentos e ao LAGESED (UFRJ), à CAPES e ao CNPQ pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- DUPERRON, M. MOUAZÉ, D., WEILL, P., TESSIER B., SCASSO, R.A. (2025) “*Hydrodynamic behaviour of organo-phosphatic bioclastic sediments: An experimental study on linguliform brachiopod shell fragments*”. *Sedimentology*, vol. 72, Issue 4, pp. 1343-1368.
- FICK, C.; PUHL, E.; TOLDO, E.E. (2019) “*Threshold of motion of bivalve and gastropod shells under oscillatory flow in flume experiments.*” *Sedimentology*, v. 67, n. 1, p. 627–648.
- FORNARI, M. GIANNINI, P.C.F., NASCIMENTO JUNIOR, D.R. (2012). “*Facies associations and controls on the evolution from a coastal bay to a lagoon system, Santa Catarina Coast, Brazil.*” *Marine Geology V. 323-325*, pp. 56-68.
- INMAN, D.L. (1949). “*Sorting of sediments in the light of fluid mechanics*”. *Journal of Sedimentary Research*, V. 19 No.2, pp. 51-70.
- PAPHITIS, D. (2001) “*Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves*”. *Coastal Engineering*, v. 43, n. 3, pp. 227–245, 2001.
- PAPHITIS, D, VELEGRAKIS, A.F., COLLINS, M.B., MUIRHEAD, A. (2002) “*Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands (shell fragments) under unidirectional flow*”. *Sedimentology* 48, pp. 645-659.
- RIEUX, Alissia et al. (2019) “*Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition*”. *Sedimentology*, [s. l.], v. 66, n. 3, p. 895–916, 2019.
- SHIELDS, A. (1936) “*Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.*” *Hydrodynamics Laboratory, California Institute of technology*, No. 167.
- WENTWORTH, C.K. (1922), “*A Scale of grade terms for clastic sediments.*” *The Journal of Geology*, V.30, No. 5.
- YAGLOM, A. M (1979) “*Similarity laws for constant-pressure and pressure-gradient turbulent wall flows.*” *Ann. Rev. Fluid Mech.* 11, 505–540.