

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DA TAXA DE EROSIÃO DE SOLOS ATRAVÉS DE UM APARATO DO TIPO PISTÃO

An experimental approach to obtain the erosion rate of soils through a piston-type apparatus

Gabriel Baldanza Mantovanelli*

Patrício José Moreira Pires**

Aloysio Portugal Maia Saliba***

Carlos Barreira Martinez****

RESUMO – Dentre as muitas obras de engenharia civil, especificamente para a geotecnia, o conhecimento do comportamento erosivo dos solos é muito importante para o bom desempenho das obras de infraestrutura, como, por exemplo, as obras de fundações de pontes e barragens com maciço em solo. Desta sorte, este trabalho propõe um aparato capaz de medir a erodibilidade do solo exposto a um escoamento para diferentes velocidades de fluxo. Ademais, apresentam-se os resultados de um solo sedimentar, classificado pelo sistema unificado de classificação de solos (SUCS), como uma areia argilosa com alto percentual de finos e moderada plasticidade. Através destes resultados, fora possível concluir sobre a classe erosiva do material, utilizando a proposição de Briaud *et al.* (2001) e Arneson *et al.* (2012), calcular as taxas erosivas para cada uma das cinco velocidades de escoamento adotadas e identificar a velocidade crítica com que se inicia o processo erosivo.

SYNOPSIS – Among the many civil engineering projects, specifically for geotechnics, knowledge of erosive behavior of the soil is very important to the performance of infrastructure works, such as the works of foundations of bridges and dams. Hence, this paper proposes an apparatus able to measure the erodibility of soil exposed to a flow with different flow velocities. In addition, this study presents the results for a sedimentary soil, classified by the unified soil classification system as clayey sand with a high percentage of fine material and moderate plasticity. Through the experiments using the proposed apparatus, it was possible to evaluate the soil erosive class, using the proposition of Briaud *et al.* (2001) and Arneson *et al.* (2012), seeking the median erosive rate for each of the five flow velocities and identifying the critical flow velocity which the erosive process began.

Palavras-chave: erodibilidade; taxa de erosão; aparato do tipo pistão.

Keywords: erodibility; erosion rate; piston-type apparatus.

1 INTRODUÇÃO

Para as muitas obras de infraestrutura executadas pelo homem, especificamente as obras de pontes e barragens, é importante o domínio pleno de diversas áreas de conhecimento, especialmente as engenharias estrutural e geotécnica. Ao longo dos últimos anos muitas barragens foram construídas no Brasil com diferentes funções, indo desde o abastecimento até à contenção de rejeitos. No estado de Minas Gerais (Brasil) existem mais de 700 barragens cadastradas, sendo em sua

* Engenheiro Civil, M.Sc. E-mail: gabrielbaldanza@gmail.com

** Professor D.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: patricio.pires@gmail.com

*** Professor D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: asaliba@ehr.ufmg.br

**** Professor D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: martinez@cce.ufmg.br

maioria barragens de rejeito de mineração. Saliba (2009) afirma que nos últimos anos, acidentes e rupturas de barragens de usos diversos têm sido observadas em território nacional. Ora, os brasileiros ainda estão fragilizados diante da tragédia assistida em Mariana, cidade mineira, donde houve 19 (dezenove) óbitos, 8 (oito) desaparecidos e mais de 600 (seiscentos) desabrigados ou desalojados devido a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão. Ainda, o rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história da humanidade. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura que, independentemente de fatores externos, entra em colapso em razão de erro humano. Ademais, Saliba (2009) define que a probabilidade de ruptura de um maciço por galgamento é composta pelo produto entre a probabilidade de galgamento e a probabilidade deste galgamento provocar o desenvolvimento de um processo erosivo no talude de jusante. Diante destes fatores, estudos avançados de erosão devem ser realizados para avaliar o comportamento erosivo dos solos utilizados na construção de barragens com maciços homogêneos em solo, especialmente quanto ao seu comportamento em casos extremos, como ocorre durante o galgamento e consequentemente as altas velocidades alcançadas no talude de jusante.

Destaca-se que, após a tragédia do furacão Katrina em Nova Orleans (EUA), observou-se que algumas das barragens galgadas erodiram em sua totalidade, já outras resistiram muito bem a esse processo. Briaud *et al.* (2007) estudou o comportamento erosivo de 11 (onze) barragens nos arredores de Nova Orleans através de um aparato desenvolvido em laboratório. Ele foi capaz de medir a taxa de erosão dos solos ao longo do tempo para diferentes velocidades de escoamento. Apoiado na teoria do transporte de sedimentos e no conceito da erodibilidade tem-se uma excelente ferramenta para mensurar o comportamento erosivo dos solos sujeitos as altas velocidades de escoamento. Através de experimentos laboratoriais é possível concluir sobre os riscos existentes para as estruturas com maciços em solo acometidas a um cenário crítico, como é o caso do galgamento de barragem e/ou a formação de sulcos erosivos nos solos de fundação de pilares de pontes.

Shields (1936) realizou uma série de experimentos que consistiram num canal aberto com colchões de diferentes tipos de areias sujeitas a um escoamento livre. Ele propôs uma importantíssima proporcionalidade entre o diâmetro mediano dos grãos e a tensão cisalhante crítica empregada pelo fluxo. Já Ting *et al.* (2001) estudou o comportamento erosivo dos solos de fundação ao redor de pilares de pontes. Mais recentemente, Briaud *et al.* (2011) desenvolveu um software chamado Sricos-EFA Method capaz de calcular a profundidade dos sulcos erosivos ao redor de pilares de pontes sujeitos a um histórico de escoamentos críticos. Briaud *et al.* (2001) afirma que, nos Estados Unidos, cerca de 1000 (mil) pontes colapsaram nos últimos 30 (trinta) anos. Dentre elas, 60% colapsaram devido à erosão do solo de fundação. Saliba (2009) estudou o processo erosivo de um material decorrente da passagem de um escoamento sobre o talude de jusante num cenário de galgamento de barragem. Ainda, avaliou a influência do grau de compactação, através de um aparato de teste desenvolvido em laboratório capaz de medir o volume de solo erodido ao longo do tempo para diferentes velocidades de fluxo. É evidente que o domínio pleno do conhecimento sobre o comportamento erosivo dos solos é muito importante para a engenharia geotécnica, não apenas para minorar problemas econômicos, mas principalmente sociais e ambientais.

A resolução 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH-Brasil) em atendimento a lei n.º12.334/2010 disserta sobre os critérios gerais quanto à classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e volume de reservatório. Para a matriz de classificação quanto à categoria de risco para barragens de resíduos e rejeitos, diversos itens são avaliados, como a altura da barragem, o comprimento de crista, a vazão de projeto, a confiabilidade das estruturas extravasoras, a percolação, a deformação e recalques e a deterioração dos taludes devido a erosões superficiais ou depressões acentuadas com sulcos profundos de erosão, originando uma abertura no maciço chamada de brecha. Destaca-se que na literatura internacional existem diversas pesquisas experimentais que se apoiam no conceito da erodibilidade para estudar o

comportamento erosivo dos solos. Entretanto, uma lacuna de conhecimento pode ser identificada no cenário nacional. Desta sorte, este trabalho busca desenvolver um aparato capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos, para diferentes velocidades de escoamento, baseado em trabalhos semelhantes da literatura. Ainda, a metodologia deste trabalho servirá como um roteiro para obtenção de variáveis de interesse, como é o caso das altas velocidades de escoamento alcançadas durante o fenômeno do galgamento de barragens e sua atuação ao longo do talude de jusante, através das correlações obtidas em laboratório entre a velocidade média de escoamento e a taxa de erosão do solo. Ou seja, as amostras poderão ser coletadas em campo na forma indeformada, levadas ao laboratório e, a partir dos resultados ensaiados no aparato de teste, será possível concluir a respeito da classe erosiva do material e até mesmo propor correlações para o cálculo da taxa de erosão do material de forma algébrica, em função da velocidade média de escoamento.

2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E EROSÃO

O transporte de sedimentos é um termo genérico usado para o transporte de materiais – argilas, siltes, areias e pedregulhos – em um canal com leito móvel. Os materiais transportados são chamados de sedimentos de carga. Os grãos com os maiores diâmetros serão transportados através do leito do canal pelos mecanismos de rolamento, deslizamento e arrancamento. Já os grãos com menores diâmetros se encontrarão em suspensão e serão transportados através da turbulência do escoamento. Nas mais práticas situações de transporte de sedimentos para canais com leitos móveis, o escoamento distorcerá o leito em diferentes formas. Em geral, os sedimentos são encontrados nos leitos dos rios e possuem um comportamento semelhante aos dos materiais não coesivos, como as areias e os pedregulhos. Para pequenas velocidades de escoamento não haverá a movimentação do leito. Com o incremento das velocidades, a eminência do movimento das partículas será alcançada e os sedimentos começarão a se deslocar na direção do escoamento.

2.1 Tensão de cisalhamento e velocidade cisalhante

Segundo Chanson (2004) o transporte de sedimentos em um canal com leito móvel ocorre sempre que a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento nas paredes excede um valor limite. A tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento ao leito em condições de regime permanente é:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_m \cdot V^2 \quad (1)$$

em que C_d é o coeficiente de arrasto (adimensional); ρ_m é a massa específica do fluido (kg/m^3); V é a velocidade média de escoamento (m/s) e τ_0 é a tensão cisalhante de fronteira (N/m^2).

Ainda, sabe-se que:

$$f = 4 \cdot C_d \quad (2)$$

em que f é o fator de atrito de Darcy (obtido do ábaco de Moody).

Substituindo a equação (2) em (1), tem-se:

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \cdot f \cdot \rho_m \cdot V^2 \quad (3)$$

A velocidade cisalhante é uma medida dependente da tensão de cisalhamento e do gradiente de velocidade nas regiões de fronteira. Ela funcionará como um indicativo para concluir sobre essas grandezas. Uma grande velocidade cisalhante implica numa grande tensão de cisalhamento e num alto gradiente de velocidade. A velocidade cisalhante V_* é definida por (Julien, 1998):

$$V_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_m} \quad (4)$$

2.2 Tensão de cisalhamento crítica

A eminência do movimento de um material granular exposto a um escoamento será função de diversos fatores, tanto próprios como do meio. Ademais, a eminência do movimento de um sedimento que compõe o leito móvel de um canal não poderá ser definida de forma absoluta. Entretanto, através de uma série de experimentos, bons resultados foram observados com alto grau de confiabilidade. Ainda, observações experimentais indicam que o limite para o início do movimento é fundamentalmente função da turbulência do escoamento. Os parâmetros relevantes para a análise da eminência do movimento e conseqüentemente do transporte dos sedimentos são apresentados na equação seguinte, como a tensão cisalhante τ_0 , a densidade do sedimento ρ_s , a densidade do fluido ρ_m , o diâmetro dos grãos d_s , a aceleração da gravidade g e a viscosidade dinâmica do fluido μ .

$$F\left(\frac{V_*}{\sqrt{gd_s}}; \frac{\rho_s}{\rho_m}; \rho_m \frac{d_s V_*}{\mu}\right) = 0 \quad (5)$$

O primeiro termo da função é uma forma do número de Froud em termos da velocidade cisalhante V_* e do diâmetro dos grãos. O segundo termo é definido pela densidade relativa do grão, G_s . E o terceiro termo é definido pelo número de Reynolds em termos do diâmetro representativo do grão d_s e da velocidade cisalhante V_* . Ademais, o último termo da equação é comumente chamado de número de Reynolds cisalhante do grão, definido por:

$$Re_* = \rho_m \frac{V_* d_s}{\mu} = \frac{V_* d_s}{\nu} \quad (6)$$

em que ν é a viscosidade cinética do fluido (para água a 20°C, tem-se $\nu = 10^{-6}$ m²/s).

Através de observações experimentais foi observado que o movimento da partícula se inicia quando os momentos atuantes impostos pelas forças desestabilizadoras são maiores do que os momentos atuantes pelas forças estabilizadoras. Negligenciando as forças de arraste e admitindo que o leito seja constituído de um material com partículas esféricas, o transporte (movimento) se inicia assim que as forças cisalhantes decorrentes do escoamento excedam um percentual do peso próprio da partícula do material (Chanson, 2004 *apud* Saliba, 2009, pg. 27). Introduzindo o parâmetro de estabilidade τ_* , conhecido também como o parâmetro de Shields em termos da tensão cisalhante de fronteira imposta pelo escoamento, τ_0 (Chanson, 2004):

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\rho_m (G_s - 1) g d_s} \quad (7)$$

em que G_s é a densidade relativa do grão ($G_s = \rho_s / \rho_m$) e τ_* é o parâmetro de estabilidade, também conhecido como parâmetro de Shields.

O gráfico da variação do parâmetro de Shields e do número de Reynolds cisalhante do grão define o conhecido diagrama de Shields. A Figura 1 apresenta este diagrama, destacando as três regiões do gráfico que descrevem o estado do grão, de acordo com as características do material e do escoamento, identificando se será observada a erosão do material.

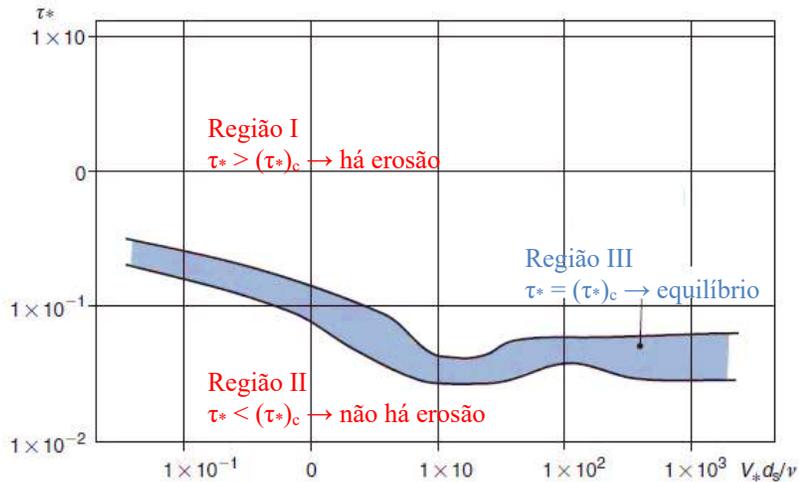


Fig. 1 – Diagrama de Shields (Adaptado de Chanson *et al.*, 2004).

Portanto, conhecendo o número de Reynolds cisalhante do grão e o parâmetro de Shields e através da Figura 1, pode-se concluir sobre a condição de movimento da partícula. Entenda-se que o diagrama de Shields apresentado na Figura 1 só será válido para materiais não coesivos. Van Rijn (1993, *apud* Chanson, 2004, p.180), identificou que para leitos com material composto por argilas e siltes, as forças coesivas entre as partículas serão muito importantes, colaborando com o aumento do momento das forças resistentes à erosão e interferindo substancialmente na erodibilidade.

Para escoamentos turbulentos e para areias e pedregulhos o parâmetro crítico de Shields (τ^*)_c será aproximadamente constante. Briaud *et al.* (2001) afirma que a tensão cisalhante de fronteira crítica (τ_0)_c será linearmente proporcional ao diâmetro mediano dos grãos:

$$(\tau_0)_c \propto d_{50} \quad (8)$$

em que d_{50} é o diâmetro mediano dos grãos, diâmetro equivalente a abertura da malha da peneira em que 50% do material peneirado fica retido.

A correlação apresentada pela equação (8) é muito importante pois, através da obtenção de uma simples grandeza, é possível mensurar o valor da tensão cisalhante crítica e, conseqüentemente, o valor da velocidade média de escoamento crítica para um material. Entretanto, a presença de material coesivo irá interferir diretamente nessa linearidade, pois as características relevantes para o processo erosivo de solos coesivos não será uma composição entre o diâmetro mediano dos grãos e as forças eletromagnéticas existentes entre as partículas.

Shields (1936 *apud* Briaud, 2001, p. 106) realizou uma série de experimentos com diferentes tipos de areias. Briaud *et al.* (2001) e Briaud *et al.* (2008) complementaram este estudo, utilizando um aparato de teste chamado *Erosion Function Apparatus* (EFA). Através destes resultados, apresentou correlações entre o diâmetro mediano dos grãos e as tensões cisalhantes críticas tanto para solos coesivos e não coesivos, de acordo com a Figura 2.

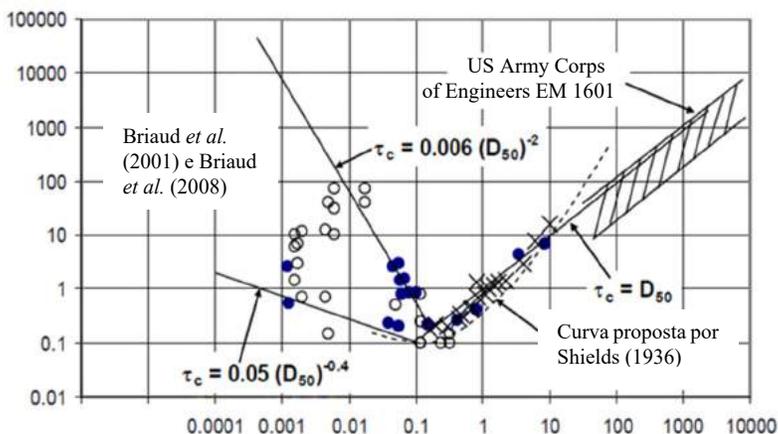


Fig. 2 – Relação entre a tensão cisalhante crítica e o diâmetro mediano dos grãos (Adaptado de Arneson *et al.*, 2012).

2.3 Erodibilidade

Erodibilidade é um termo moderno utilizado em estudos experimentais de erosão. A erodibilidade pode ser definida pela relação entre a taxa de erosão \dot{Z} e a velocidade de escoamento V imposta pelo fluido numa zona de fronteira. Saliba (2009) descreve a erodibilidade como sendo a taxa de erosão vertical a que o material está sujeito quando exposto a uma velocidade de fluxo. Já Pruski (2009) define que a erodibilidade consiste na taxa de desprendimento e arraste das partículas do solo, ocasionado pela ação da água. Entretanto, as definições supracitadas não são completamente satisfatórias, pois a velocidade varia de direção e intensidade ao longo do escoamento. De fato, ao longo do campo de velocidades a velocidade será igual a zero nas regiões de fronteira (interface água e solo). Briaud *et al.* (2008) propõem que a erodibilidade pode ser definida pela relação entre a taxa de erosão \dot{Z} e a tensão de cisalhamento τ_0 imposta pela partícula do solo presente nas regiões de fronteira:

$$\frac{\dot{Z}}{V} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\tau - \tau_c}{\rho_m \cdot V^2} \right)^{\delta_1} + \lambda_2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau}{\rho_m \cdot V^2} \right)^{\delta_2} + \lambda_3 \cdot \left(\frac{\Delta \sigma}{\rho_m \cdot V^2} \right)^{\delta_3} \quad (9)$$

em que \dot{Z} é a erodibilidade do material; V é a velocidade média de escoamento; λ_1 , λ_2 e λ_3 são os coeficientes da função erodibilidade; δ_1 , δ_2 e δ_3 são os expoentes da função erodibilidade; ρ_m é a massa específica do fluido; $\Delta \tau$ e $\Delta \sigma$ são as flutuações das tensões cisalhante e normal impostas pelo fluido e τ e τ_c são as tensões cisalhante e cisalhante crítica, respectivamente; onde $\tau_c = (\tau_0)_c$.

Ainda, Briaud *et al.* (2008) destacam que a equação (9) pode ser reescrita desprezando os efeitos da turbulência do escoamento, pois não é prático a obtenção dos três coeficientes e dos três expoentes da função erodibilidade durante uma modelagem experimental:

$$\frac{\dot{Z}}{V} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\tau - \tau_c}{\rho_m \cdot V^2} \right)^{\delta_1} \quad (10)$$

Saliba (2009) afirma que a equação (10) se assemelha à forma das equações de transporte de sedimentos. A diferença de abordagem entre a teoria do transporte de sedimentos e a erodibilidade reside no fato de que o conceito da erodibilidade deixa livre para o usuário adaptar a forma e o tipo da função de acordo com os dados disponíveis.

2.3.1 Erodibilidade em solos coesivos

Para os solos coesivos a erosão será de grãos, mas podendo ser também de blocos de grãos, diferentemente do que ocorre para solos não coesivos, donde prevalece mecanismo de erosão de grão. Os blocos de grãos são formados naturalmente na matriz do solo, devido às microfissuras resultantes de diferentes tipos de fenômenos, como a compressão ou expansão do material. A resistência à erosão de solos coesivos é influenciada pela combinação do peso próprio da partícula e também pelas forças eletrostáticas e eletromagnéticas que existem entre as partículas do solo. O Quadro 1 apresenta alguns dos fatores identificados pela literatura como influentes nos valores da erodibilidade em solos coesivos. Atentar que as correlações que descrevem as relações das grandezas geotécnicas e hidráulicas com a taxa de erosão do material (apresentadas no Quadro 1) possuem pequenos coeficientes de determinação, apesar da crença existente quanto a influência destes fatores no comportamento erosivo do material.

Quadro 1 – Fatores influentes na erodibilidade de solos coesivos (Arneson *et al.*, 2012).

Quando esse parâmetro aumenta...	O valor da erodibilidade...
Peso específico	Diminui
Resistência não drenada	Aumenta
Índice de plasticidade	Diminui
Índice de vazios	Aumenta
Percentual que passa #200	Diminui
Temperatura do solo	Aumenta
Temperatura da água	Aumenta

A diferença experimental entre os resultados obtidos para os solos coesivos e não coesivos será perceptível para as taxas de erosão acima da tensão de cisalhamento crítica. Para os solos coesivos, a taxa de erosão aumenta lentamente, medindo poucos milímetros por hora, diferentemente do que ocorre para os solos não coesivos, na qual a taxa de erosão chega à ordem de milhares de milímetros por hora. Ademais, o uso das equações clássicas da teoria do transporte de sedimentos não será válido nos casos em que existir uma alta coesão entre as partículas de solo.

Desta forma, uma abordagem experimental através de um aparato similar ao desenvolvido por Briaud *et al.* (2001) foi desenvolvido por esta pesquisa, a fim de determinar a taxa de erosão do material para diferentes velocidades de escoamento, para um solo arenoso com um alto percentual de finos e moderada plasticidade.

2.4 Caracterização geotécnica e ensaio de erosão

O material utilizado foi escolhido considerando as características argilo-arenosas por meio da análise tátil visual. Foram coletadas amostras na forma indeformada e amolgada, de acordo com as necessidades e exigências dos ensaios. O solo foi coletado no bairro de Laranjeiras, da cidade de Serra, Espírito Santo. O solo na condição amolgada foi coletado por meio de pá e transportado para a Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, onde foi armazenado em sacolas plásticas no interior do Laboratório de Geotecnia. Já o solo para o ensaio de erosão foi coletado na forma indeformada, por meio do sistema de extração *Slide Hammer System*, produzido pela empresa americana *Geoprobe*[®], utilizando amostradores ambientais do tipo *Liner* com diâmetro de 44,0mm, produzidos pela empresa HS Hidrosuprimentos[®].

2.4.1 Ensaios de caracterização

A etapa de caracterização compreendeu os ensaios de massa específica dos grãos, limites de Atterberg e granulometria completa. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia – UFES. A amostra amolgada foi quarteadada obtendo-se duas partes. Para cada uma das partes repetiu-se o processo, obtendo-se quatro amostras. Estas por sua vez foram divididas em três subgrupos, totalizando doze amostras com cerca de 6 kg cada. Para o ensaio da determinação da massa específica dos grãos o valor da massa específica foi medido quatro vezes. O valor final foi determinado pela média dos valores medidos, resultando em massa específica de $2.697 \text{ kg/m}^3 \pm 2 \text{ kg/m}^3$. Para os limites de Atterberg, os ensaios foram realizados com seis pontos para uma amostra dos subgrupos e ensaios rápidos (com dois pontos) para todas as outras amostras restantes. No total, foram realizadas doze determinações. O valor do limite de liquidez médio (LL) encontrado foi igual a $43,7\% \pm 2,4\%$. O valor do limite de plasticidade médio (LP) encontrado foi igual a $20,9\% \pm 0,9\%$. Através destes resultados, foi determinado o valor do Índice de Plasticidade médio (IP), sendo igual a $22,9\% \pm 2,8\%$. A análise granulométrica do material adotado foi realizada três vezes. A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas obtidas.

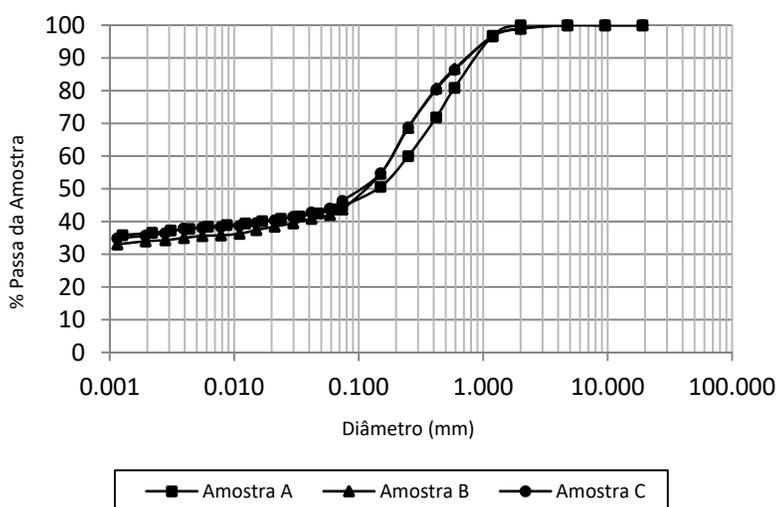


Fig. 3 – Curvas granulométricas do material adotado.

Utilizando o sistema unificado de classificação de solo (SUCS), o material foi classificado como uma areia argilosa SC, solo sedimentar – sendo a fração argilosa superior a 34% em todos os casos. Foi calculado o índice de atividade das argilas, obtendo-se um valor médio igual a $0,7 \pm 0,1$. O valor médio do diâmetro mediano dos grãos, d_{50} , é igual a 0,12mm. O Quadro 2 apresenta os valores percentuais das faixas granulométricas de acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS) e a norma ASTM D-2487 do material adotado.

Quadro 2 – Sistema unificado de classificação de solos (SUCS), (detalhamento).

Pedregulho (60 – 4,75)mm	Areia Grossa (4,75 – 2,0)mm	Areia Média (2,0 – 0,425)mm	Areia Fina (0,425 – 0,075)mm	Finos (0,075 <)mm
0,0% ± 0,0%	0,7% ± 0,6%	21,6% ± 5,6%	32,7% ± 0,9%	44,9% ± 1,3%

As amostras para o ensaio de cisalhamento direto foram diretamente moldadas nos anéis de cisalhamento em campo, seguindo as recomendações da norma ASTM D-3080M. Durante a realização do ensaio de cisalhamento direto foram registrados os valores do deslocamento horizontal, da tensão normal e da tensão cisalhante. Foram utilizados quatro corpos de prova, submetidos ao ensaio de cisalhamento direto com tensões totais no laboratório de Geotecnia; as tensões normais no início de cada ensaio foram de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto são apresentados na Figura 4. Os resultados apresentados pela Figura 5 indicaram tensões cisalhantes de ruptura correspondentes a 43 kPa, 74 kPa, 143 kPa e 219 kPa. Aos resultados, ajustou-se a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. A partir desta envoltória, foram obtidos os parâmetros de resistência do solo com os valores de coesão e ângulo de atrito iguais a 0,6 kPa e 33,9°, respectivamente.

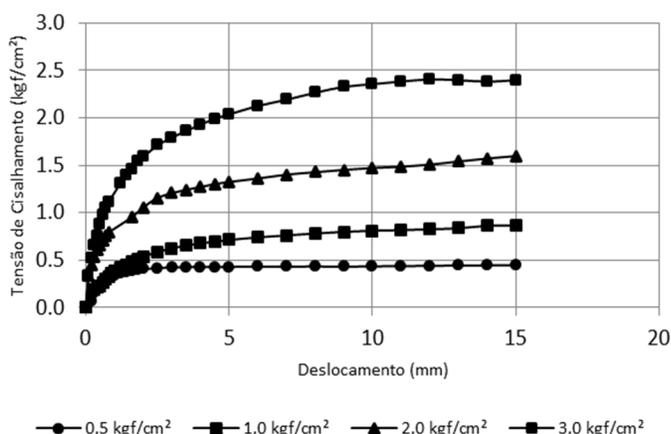


Fig. 4 – Tensão de cisalhamento e deslocamento.

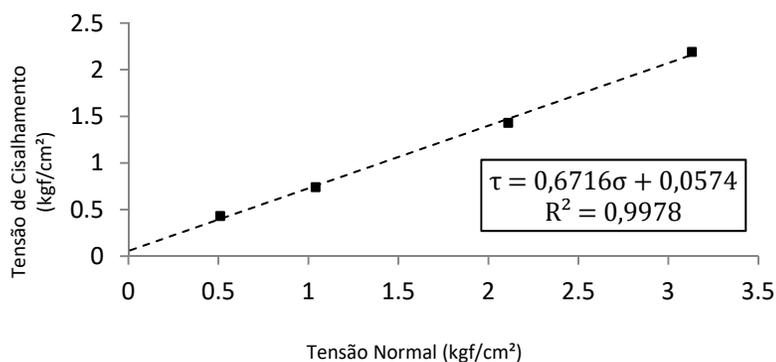


Fig. 5 – Envoltória de ruptura do solo.

2.4.2 Aparato de teste de erodibilidade

Numa parceria entre a UFES, UFMG e o escritório TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, foi desenvolvido no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH/UFMG), um aparato capaz de determinar a erodibilidade de um solo. Um primeiro aparato de teste foi desenvolvido com seção transversal retangular, constituído em aço e acrílico. Entretanto, devido às pequenas velocidades de fluxo

apresentadas, optou-se por desenvolver um segundo aparato com maior seção transversal e maiores velocidades de fluxo. O segundo e definitivo aparato de teste foi confeccionado em aço, com caixa de inspeção em acrílico. Consiste de um conjunto de moto-bomba, com capacidade máxima de até 78 m³/h, conectado por meio de mangote a um reservatório de fibra de vidro com capacidade de 500 litros, como apresentado na Figura 6.

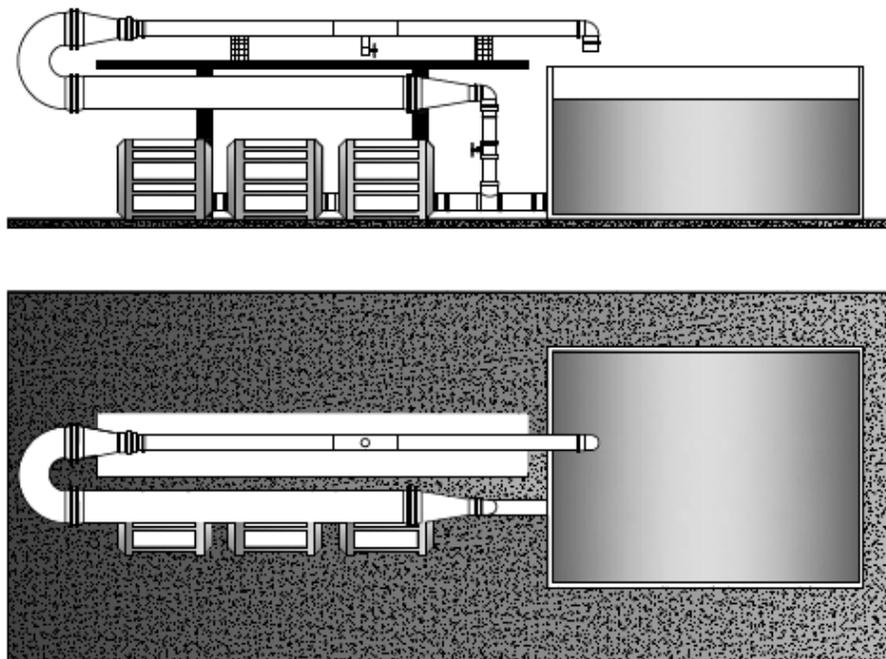


Fig. 6 – Vista lateral e em planta do aparato de teste.

A saída do mangote é conectada a um tubo com 101,6mm de diâmetro que foi ajustado de forma a efetuar a transição entre a seção tubular a uma seção retangular com 96mm de largura por 74mm de altura. A tubulação de transição tem 960mm de extensão, onde foram instaladas placas paralelas para provocar o alinhamento do fluxo previamente à zona de teste. A Figura 7 apresenta o detalhe da seção de teste. Ao longo da tubulação retangular, foi confeccionada uma caixa de inspeção com paredes em acrílico para facilitar a inspeção visual – suas dimensões são iguais as da tubulação retangular. A caixa de inspeção possui uma tampa superior móvel para facilitar a limpeza da área de ensaio. No centro da caixa de acrílico, foi aberta uma passagem com 45mm de diâmetro e instalada uma tubulação de PVC como guia para a amostra de solo. O ajuste entre o *liner* (amostra) e a tubulação guia se faz através do atrito lateral ao longo das suas áreas superficiais. A estanqueidade do contato entre o tubo guia e o *liner* será garantido por dois *o-rings* instalados ao longo do comprimento da tubulação guia. A fim de evitar a perda de água através da amostra de solo, dois *o-rings* foram instalados no pistão. O sistema de ascensão da amostra foi realizado através de um pistão com parafuso infinito, controlado através de uma manivela manual. A estrutura de sustentação do pistão foi fixada a um pórtico soldado às vigas metálicas da bancada. O sistema primeiramente contava com apenas uma bomba de alimentação, resultando numa vazão $Q_{0(máx)} = 35,7 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma velocidade média de escoamento $V_{0(máx)} = 1,24 \text{ m/s}$. Esta vazão máxima alcançada não fora suficiente para atender as velocidades de fluxo adotadas. Portanto, foi necessária a instalação de mais duas bombas no sistema. Desta sorte, com três bombas em série, obteve-se a vazão máxima igual $Q_{f(máx)} = 78,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e a velocidade média de escoamento máxima igual $V_{f(máx)} = 3,0 \text{ m/s}$.

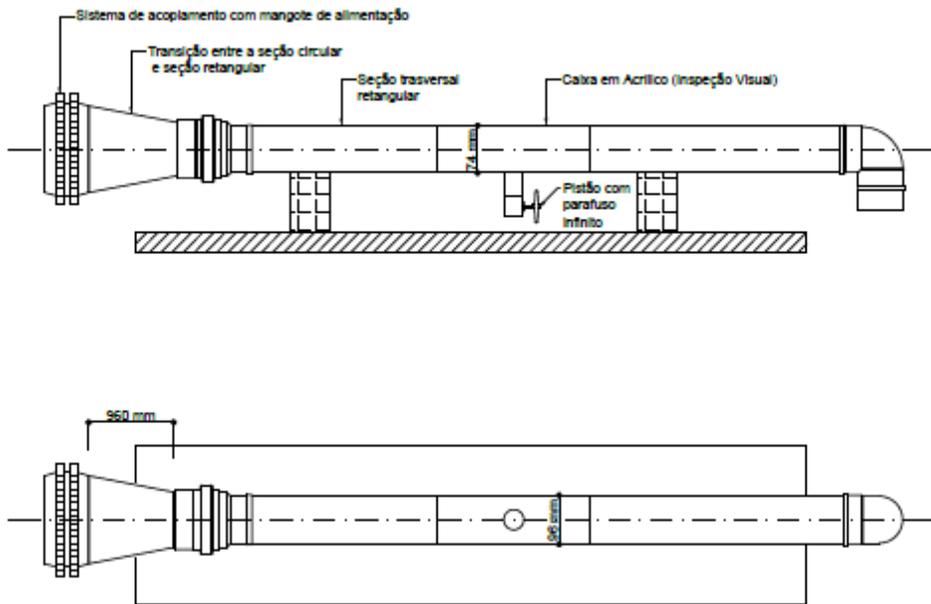


Fig. 7 – Detalhe da seção de teste do aparato.

2.4.3 Preparação das amostras para o ensaio de erosão

Foram coletados 10 *lineres*, com aproximadamente 60 cm de comprimento cada, utilizando o *Slide Hammer System*. Em laboratório, as amostras foram cortadas com serra flexível, totalizando 40 amostras com 15 cm de comprimento cada. Ainda, foram identificadas com índices de I a IV, representando o sentido da cravação dos amostradores no solo, sendo que I representa o topo, IV representa o fundo e II e III representam as profundidades intermediárias. Para cada velocidade de fluxo adotada $V = 0,3; 0,7; 1,2; 1,7$ e $2,2$ m/s foram separadas aleatoriamente oito amostras com 15 cm de comprimento para a realização do ensaio de erosão no aparato de teste desenvolvido.

2.4.4 Metodologia do ensaio de erosão

Os testes foram realizados conforme os passos a seguir:

1. Retifica-se e acopla-se a amostra de solo no aparato de teste;
2. Eleva-se a amostra com auxílio do pistão à referência de 1,0mm de altura pré-estabelecida com trena, manualmente;
3. Ajusta-se a vazão necessária à obtenção da velocidade média de escoamento desejada, ajustando-se também as rotações das bombas por meio de inversores de frequência;
4. Através da inspeção visual, anota-se o tempo necessário para se erodir a amostra em sua totalidade, com $t < 60$ min. Para $t = 60$ min, paralisa-se o ensaio de erosão para a velocidade de teste adotada e retira-se a amostra de ensaio do aparato de teste.

O Quadro 3 apresenta as velocidades adotadas para os ensaios de erosão e suas respectivas vazões observadas utilizando o medidor de vazões *Incontrol*[®].

Quadro 3 – Velocidades de escoamento adotadas e suas respectivas vazões.

Q (m³/h)	V (m/s)
8,91	0,3
17,28	0,7
30,10	1,2
43,20	1,7
57,60	2,2

2.4.5 Determinação da taxa de erosão, tensão de cisalhamento e características do escoamento

Anota-se o tempo necessário para que se eroda a altura da amostra de solo exposta a um fluxo com velocidade conhecida. A taxa de erosão será calculada através da razão entre a altura da amostra (constante, igual a 1,0mm) pelo tempo t observado ao longo do ensaio de erosão.

$$\dot{Z} = \frac{h}{t} \quad (11)$$

em que \dot{Z} é a taxa de erosão do solo (mm/h); h é a altura da amostra (constante $h=1,0\text{mm}$) e t é o tempo necessário para que ocorra a erosão total da amostra de solo (h).

A determinação da tensão de cisalhamento será feita através da equação (3). O Quadro 4 apresenta os valores das velocidades médias de escoamento adotadas, suas tensões cisalhantes calculadas, o número de Reynolds calculado, com seção transversal de altura $a = 74\text{mm}$ e largura $b = 96\text{mm}$. O fator de atrito f presente na equação (3) foi obtido de forma gráfica através do ábaco de Moody, com rugosidade relativa calculada utilizando a equação:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,5 \cdot d_{50}}{D_H} = \frac{d_{50} \cdot (a+b)}{4ab} \quad (12)$$

em que ε/D é a rugosidade relativa; D_H é o diâmetro hidráulico e a e b são a altura e largura da seção transversal do aparato de teste, respectivamente.

Quadro 4 – Características do escoamento para as velocidades adotadas.

V (m/s)	R_e	f	τ (N/m²)
0,3	$2,51 \times 10^4$	0,0265	0,30
0,7	$5,85 \times 10^4$	0,0225	1,38
1,2	$1,00 \times 10^5$	0,0210	3,78
1,7	$1,42 \times 10^5$	0,0205	7,41
2,2	$1,84 \times 10^5$	0,0200	12,10

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os Quadros 5 e 6 apresentam os resultados obtidos dos ensaios de erosão, agrupados segundo as velocidades de teste, identificando os tempos necessários para o término do ensaio:

Quadro 5 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste.

Velocidade (m/s)	0,3			0,7			1,2		
Teste	t (min)	t (h)	\dot{Z} (mm/h)	t (min)	t (h)	\dot{Z} (mm/h)	t (min)	t (h)	\dot{Z} (mm/h)
1	>60	>1	-	49	0,82	1,22	39	0,65	1,54
2	>60	>1	-	54	0,90	1,11	24	0,40	2,50
3	>60	>1	-	47	0,78	1,28	35	0,58	1,71
4	>60	>1	-	55	0,92	1,09	29	0,48	2,07
5	>60	>1	-	53	0,88	1,13	34	0,57	1,76
6	>60	>1	-	52	0,87	1,15	33	0,55	1,82
7	>60	>1	-	53	0,88	1,13	30	0,50	2,00
8	>60	>1	-	58	0,97	1,03	27	0,45	2,22

(continua)

Quadro 6 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste (continuação).

Velocidade (m/s)	1,7			2,2		
Teste	t (min)	t (h)	\dot{Z} (mm/h)	t (min)	t (h)	\dot{Z} (mm/h)
1	15	0,25	4,00	6	0,10	10,00
2	17	0,28	3,53	4	0,07	15,00
3	12	0,20	5,00	7	0,12	8,57
4	11	0,18	5,45	11	0,18	5,45
5	14	0,23	4,29	7	0,12	8,57
6	15	0,25	4,00	6	0,10	10,00
7	12	0,20	5,00	4	0,07	15,00
8	13	0,22	4,62	9	0,15	6,67

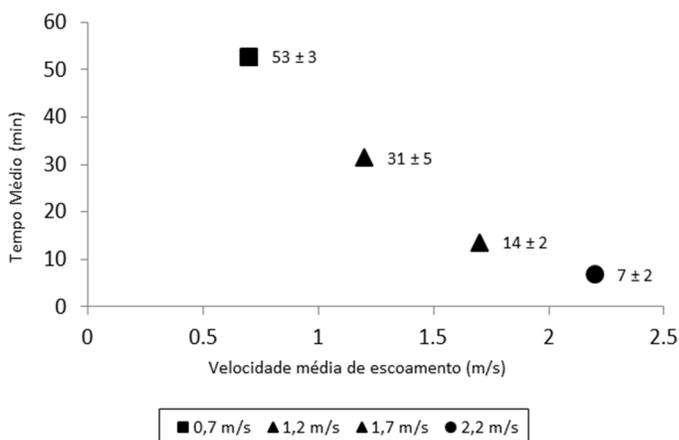


Fig. 8 – Tempo médio observado para as velocidades médias de escoamento adotadas.

Na Figura 8, apresenta-se o gráfico com os tempos necessários para se finalizar os ensaios de erosão, identificando suas respectivas dispersões observadas.

As maiores dispersões ocorreram para as menores velocidades de escoamento, $V = 0,7$ e $1,2$ m/s– fato que se confirmou após o estudo estatístico. Notar que não serão apresentados os gráficos para a velocidade $V = 0,3$ m/s, pois em todos os oito testes realizados as amostras não erodiram em

sua totalidade para $t \leq 60$ min; entretanto observou-se o surgimento de trincas decorrentes da saturação do material ao longo do ensaio, ocasionando a erosão de blocos de grãos. Uma vez obtidos os tempos t do ensaio, a taxa de erosão \dot{Z} será calculada através da equação (11) com o tempo t em horas. A Figura 9 apresenta os valores das taxas de erosão calculadas para os tempos obtidos durante os ensaios, identificando suas dispersões observadas para uma mesma velocidade de teste.

A maior dispersão ocorreu para a maior velocidade média de escoamento adotada. O desvio padrão calculado para a velocidade $V = 2,2$ m/s é igual a 3,5 mm/h, correspondendo a 35% do valor da média. Ora, se trata de um valor bastante elevado! Ainda, a variabilidade dos resultados pode estar associada às características geotécnicas do solo, ou a aleatoriedade do próprio processo erosivo, ou do equipamento utilizado, ou das características do fluido como sua temperatura, ou até mesmo devido a algum erro operacional durante a realização do ensaio. O Quadro 7 apresenta os valores das taxas de erosão médias calculadas, seus desvios padrão, os tempos médios de ensaio, as vazões do sistema, as velocidades médias de escoamento e suas respectivas tensões cisalhantes. Aos resultados apresentados pelos Quadros 5 e 6 ajustou-se uma equação do tipo potência (Figuras 10 e 11), motivada pela forma da função erodibilidade apresentada pela equação (10), para o cálculo da taxa de erosão em função da velocidade média de escoamento e função da tensão de cisalhamento empregada pelo escoamento, respectivamente.

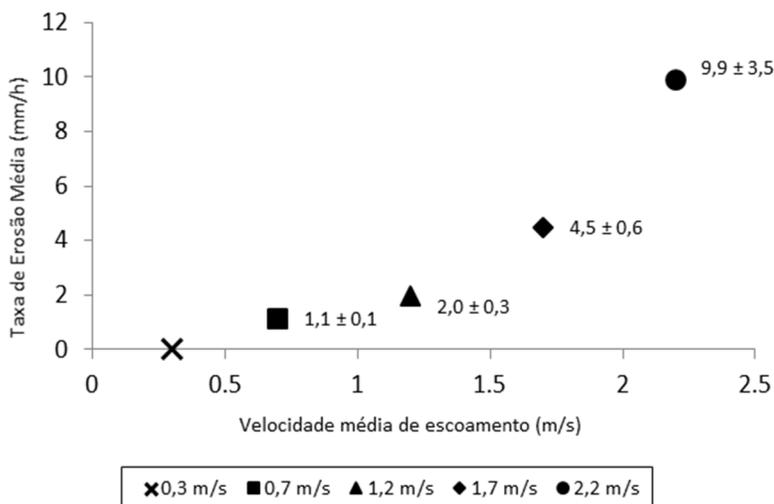


Fig. 9 – Taxa de erosão média para as velocidades médias de escoamento adotadas.

Quadro 7 – Taxa de erosão média calculada e características do ensaio.

Q (m³/h)	V (m/s)	τ (N/m²)	t (min)	\dot{Z} (mm/h)
8,91	0,3	0,30	>60	-
17,28	0,7	1,38	53 ± 3	1,1 ± 0,1
30,10	1,2	3,78	31 ± 5	2,0 ± 0,3
43,20	1,7	7,41	14 ± 2	4,5 ± 0,6
57,60	2,2	12,10	7 ± 2	9,9 ± 3,5

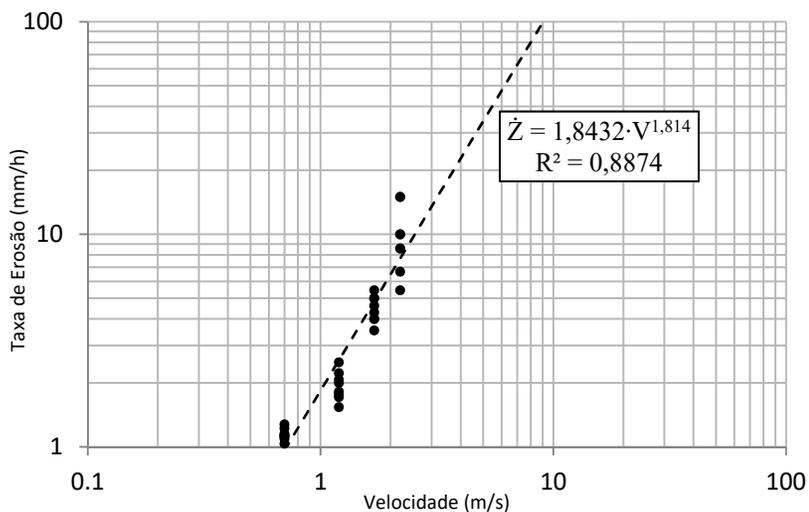


Fig. 10 – Correlação dos resultados entre a taxa de erosão e a velocidade média de escoamento.

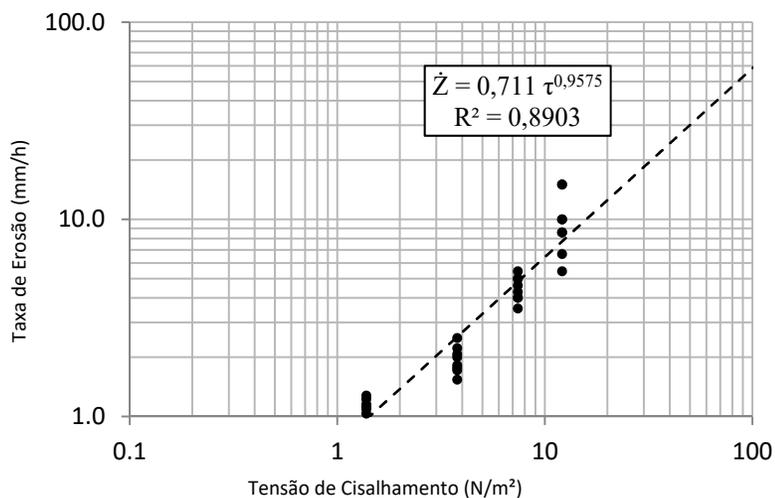


Fig. 11 – Correlação dos resultados entre a taxa de erosão e a tensão cisalhante.

Quadro 8 – Taxa de erosão calculada através da equação (10) dos resultados das modelagens.

V (m/s)	τ (N/m ²)	$\dot{Z} = h/t$ (mm/h)	$\dot{Z} = 1,8432 \cdot V^{1,814}$ (mm/h)	$\dot{Z} = 0,711 \cdot \tau^{0,9577}$ (mm/h)
0,7	1,38	1,1	0,97	0,97
1,2	3,78	2,0	2,57	2,54
1,7	7,41	4,5	4,83	4,84
2,2	12,10	9,9	7,70	7,74

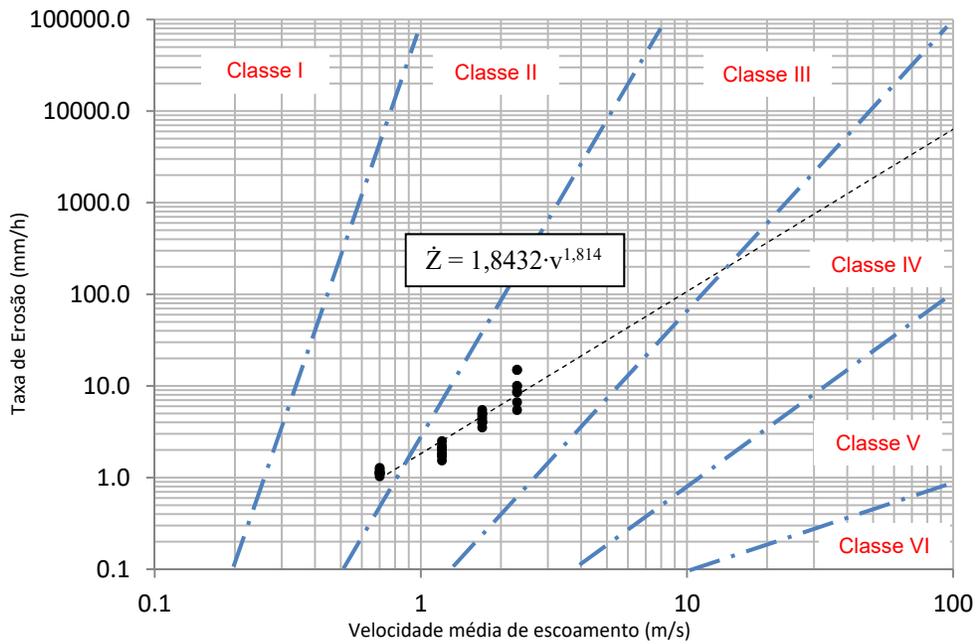


Fig. 12 – Classificação da erodibilidade do solo segundo Arneson (2012, *apud* Briaud, 2011, p.4.11) e Briaud *et al.* (2008), em função da velocidade de escoamento.

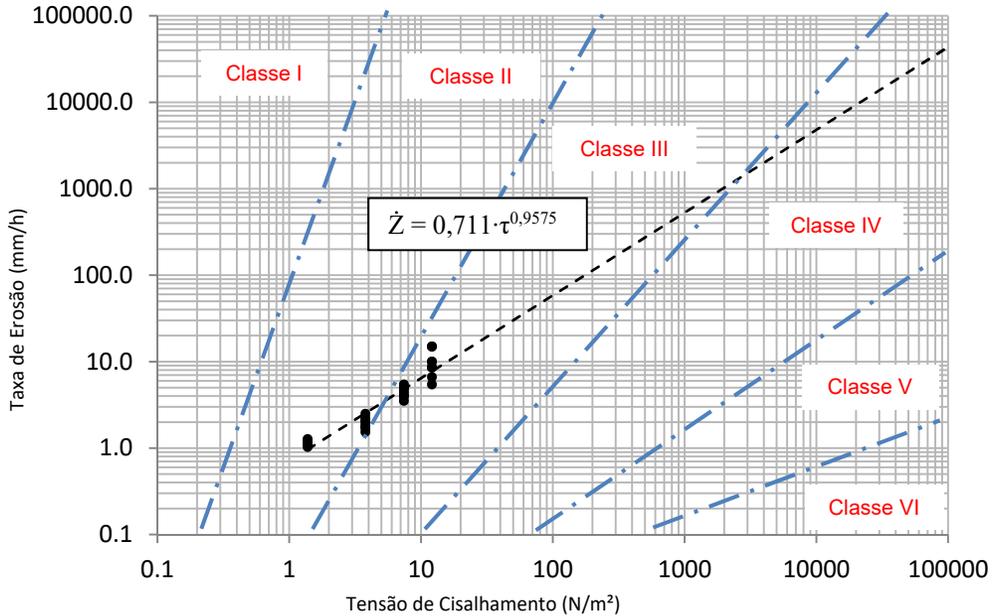


Fig. 13 – Classificação da erodibilidade segundo Arneson (2012, *apud* Briaud, 2011, p.4.11) e Briaud *et al.* (2008), em função da tensão cisalhante.

Para ambas as modelagens obtiveram-se erros médios iguais a 17%. Atentar que as equações propostas para o cálculo da taxa de erosão só serão válidas para $V > V_{crit}$ e $\tau > \tau_{crit}$. O Quadro 8 apresenta os valores calculados da taxa de erosão utilizando as equações propostas pelas Figuras 10 e 11, juntamente com os valores obtidos da equação (11).

A classificação erosiva do solo é realizada utilizando a metodologia proposta por Arneson (2012, *apud* Briaud, 2011, p.4.11), a qual correlaciona a taxa de erosão do solo com a velocidade média do escoamento. A Figura 12 apresenta a classificação erosiva em função da velocidade média de escoamento. Já a Figura 13 apresenta a classificação da erodibilidade de forma gráfica, em função da tensão de cisalhamento empregada pelo fluxo, calculada em função da velocidade média de escoamento e utilizando a equação (3).

Da Figura 12 observa-se que para nenhum resultado obtido do ensaio de erosão utilizando o aparato desenvolvido, o material pertenceu à Classe I – muito alta erodibilidade –, como era esperado para as areias médias e finas. Além disso, os resultados obtidos para a velocidade média de escoamento $V = 0,7$ m/s encontram-se pertencentes à Classe II – alta erodibilidade –, com o restante dos resultados pertencentes à Classe III – média erodibilidade. Da Figura 13 observa-se que, para as tensões de cisalhamento correspondentes as velocidades $V = 0,7$ e $1,2$ m/s, os resultados encontram-se pertencentes à Classe II – alta erodibilidade. Já os resultados obtidos para as tensões de cisalhamento correspondentes as velocidades $V = 1,7$ e $2,2$ m/s encontram-se pertencentes à classe III – média erodibilidade.

Portanto, com ambas as classificações em mãos, realizadas em função da velocidade média e da tensão cisalhante, pode-se concluir que o material estudado possuiu um comportamento erosivo entre as Classes II e III. Ainda, conhecidas as concentrações dos materiais que compõem o solo estudado e sabendo que a concentração de finos é superior a 20% (quantidade de argila maior do que 34% em todos os ensaios de granulometria), conclui-se que, para critérios de erosão o solo utilizado se comportou como uma argila pouco plástica (com $IP = 22,9\% \pm 2,8\%$; Classe II e III), apesar da sua classificação SUCS. Não obstante, a obtenção da velocidade crítica através da inspeção visual durante os ensaios de erosão não foi satisfatória. Para a velocidade de escoamento $V = 0,3$ m/s, só fora possível identificar a erosão do material quando as amostras erodiram por blocos de grãos, decorrentes do trincamento da amostra por saturação e expansão do material (não erodindo em sua totalidade para $t \leq 60$ min). Desta sorte, através das equações apresentadas pela Figura 14, em funções do diâmetro mediano dos grãos, foi possível obter, de maneira empírica, a velocidade crítica aproximada. O Quadro 9 apresenta os resultados utilizando $d_{50} = 0,12$ mm.

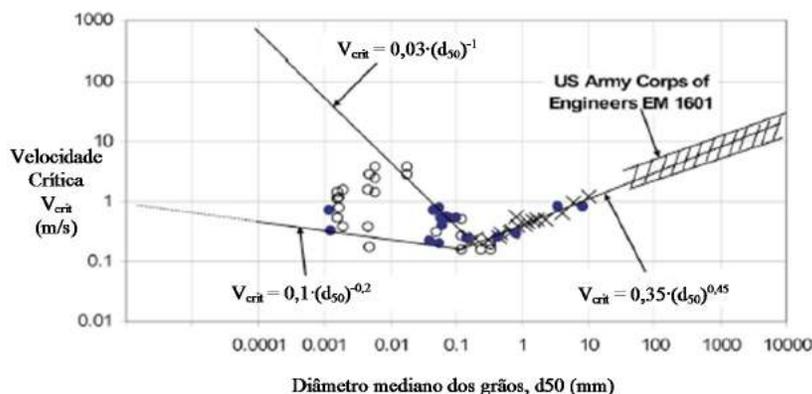


Fig. 14 – Relação entre a velocidade crítica e o diâmetro mediano dos grãos (adaptado de Briaud *et al.*, 2008).

Quadro 9 – Cálculo da V_{crit} utilizando as equações apresentadas por Briaud (2008).

Equação	V_{crit} (m/s)
$V_{crit} = 0,1 \cdot (d_{50})^{-0,2}$	0,15
$V_{crit} = 0,03 \cdot (d_{50})^{-1}$	0,25
$V_{crit} = 0,35 \cdot (d_{50})^{0,45}$	0,13

A média aritmética simples das velocidades críticas é igual a 0,18 m/s. Utilizando a equação proposta pela Figura 10, para uma velocidade crítica igual a 0,25 m/s – maior valor observado, utilizando a correlação entre a velocidade crítica e o diâmetro mediano dos grãos para areias finas e argilas –, segundo Briaud (2006, *apud* Briaud, 2008, p. 1429), tem-se uma taxa de erosão igual a 0,15 mm/h, valor muito pequeno para ser observado ao olho nu, justificando assim, a dificuldade de observar a erosão do material num tempo $t \leq 60$ min.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho sugere assim, uma metodologia para o estudo do comportamento erosivo de um solo através de um aparato de mesa do tipo pistão, capaz de medir a taxa de erosão do solo para diferentes velocidades de escoamento e desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em parceria com a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e com o escritório de engenharia TEC3 Recursos Hídricos.

Os ensaios realizados em laboratório permitiram visualizar e quantificar um conjunto de parâmetros hidráulicos e geotécnicos que forneceram dados necessários para a análise da erodibilidade do material estudado, como sua taxa de erosão em mm/h, sendo possível realizar sua classificação erosiva. A análise da erodibilidade do material foi realizada utilizando-se um solo classificado como areia argilosa segundo o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), sendo que a fração argilosa é superior a 34%. O resultado da classificação erosiva do solo estudado foi diferente do que o esperado. De acordo com a literatura, para solos arenosos, era previsto um resultado Classe I – muito alta erodibilidade. Não obstante, o solo foi classificado entre as Classes II e III. Acredita-se que a alta concentração de finos (maior do que 20%), aumentou a resistência ao cisalhamento empregado pelo fluxo, justificando seu comportamento não usual. As velocidades de fluxo adotadas seguiram trabalhos similares encontrados na literatura. Foi previsto um maior número de velocidades de teste, inclusive, com velocidades superiores a $V = 2,2$ m/s. Entretanto, devido ao problema da sucção, teve-se que limitar o escopo do trabalho a essa velocidade.

Finalmente, buscou-se ajustar uma equação para o cálculo da taxa de erosão do solo estudado – em função da velocidade média de escoamento –, através dos resultados obtidos do aparato de teste desenvolvido por esta pesquisa. Ademais, fora também proposta uma equação para o cálculo da taxa de erosão do solo estudado – em função da tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento, calculada através da equação (3).

Os resultados obtidos por esta pesquisa permitem concluir que:

- A taxa de erosão do solo aumentou de acordo com o aumento da velocidade de escoamento. Para incrementos iguais a 0,5 m/s na velocidade média de escoamento, observou-se um aumento em 100% da erosão do material, aproximadamente;
- Os resultados obtidos apresentaram uma grande dispersão, demonstrando a complexidade do comportamento erosivo do solo e uma aleatoriedade presente no processo. Para a velocidade média de escoamento $V = 2,2$ m/s, a dispersão da taxa de erosão calculada foi de 35% do valor de sua média, um valor bastante elevado;
- O aparato se mostrou eficiente para a obtenção dos tempos necessários para a erosão total da amostra, com diferentes velocidades de escoamento. Entretanto, não foi possível realizar o ensaio para velocidades maiores que 2,2 m/s, pois ocorreu a perda da amostra devido à sucção do material;
- A obtenção da velocidade crítica através da inspeção visual não se mostrou eficiente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arneson, L. A.; Zevenbergen, L. W.; Lagasse, P. F.; Clopper, P.E. (2012). *Hydraulic engineering circular no. 18: evaluating scour at bridges*. 5th ed. FHWA. Washington. Federal Highway Administration. 340p.
- ASTM D-2487 (2006). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. West Conshohocken, Pennsylvania, EUA.
- ASTM D-3080M (2011). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. West Conshohocken, Pennsylvania, EUA.
- Briaud, J-L.; Ting, F. C. K.; Chen, H. C.; Cao, Y.; Han, S. W.; Kwak, K. W. (2001). *Erosion function apparatus for scour rate predictions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v. 127, n.2, pp.105 -113.
- Briaud, J-L.; Chen, H. C.; Govindasamy, A. V.; Storesund, R. (2007). *Erosion tests on samples from the New Orleans levees*. Proceedings of Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics, ASCE, pp. 1-16.
- Briaud, J-L.; Chen, H. C.; Govindasamy, A. V.; Storesund, R. (2008). *Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v. 134, n. 5, pp. 618- 632.
- Briaud, J-L.; Chen, H. C.; Chang, K. A.; OH, S. J.; Chen., S.; Wang, J.; Li, Y.; Kwak, K.; Nartjaho, P.; Gudaralli, R.; Wei, W.; Pergu, S.; Cao, Y.W.; Ting, F.C.K. (2011). *The Sricos-EFA Method*. Texas A&M University (summary report). 106 p.
- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An introduction*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, Butterworth e Heinemann. 585 p.
- Julien, P.Y. (1998). *Erosion and Sedimentation*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press. 280 p.
- Pruski, F.F. (2009). *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2^a ed. Viçosa: Editora UFV. 279 p.
- Saliba, A.P.M. (2009). *Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aenlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung*. *Mittleilungen der preussischen versuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau*. Ott, W. P.; Uchelen J. C. Van, [tradutores], California Institute of Technology, Pasadena, EUA.
- Ting, F. C. K.; Briaud, J-L.; Chen, H.C.; Gudavalli, R.; Perugu, S.; Wei, G. (2001). *Flume tests for scour in clay at circular piers*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 11, pp. 969-978.