

Avaliação da Influência do Nível de Incerteza Existente nos Parâmetros Geotécnicos no Risco de Falha em Barragens de Terra Utilizando Operações com Números *Fuzzy*

Silvrano Adonias Dantas Neto

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, silvrano@ufc.br

Amanda Vieira e Silva

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, engenheirista@yahoo.com.br

Francisco de Assis de Souza Filho

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, assis@ufc.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é avaliar o risco de ruptura em taludes de barragens de terra devido às incertezas relativas aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados nas análises de estabilidade de taludes (AET) empregando-se operações com números *fuzzy*. A metodologia desenvolvida apresenta-se como uma alternativa aos métodos determinísticos e probabilísticos normalmente utilizados nas AET. A metodologia consistiu no levantamento de informações sobre o projeto e a execução da Barragem Olho d'Água, localizada no Município de Várzea Alegre, Estado do Ceará, e na realização de AET, utilizando metodologias determinística e probabilística, considerando-se os métodos de Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955). As variáveis coesão e ângulo de atrito foram fuzzificadas, e utilizadas como dados de entrada dos modelos analíticos de cálculo do fator de segurança, de acordo com as regras de operações com números *fuzzy*. Os resultados mostraram que é possível a avaliação do risco de falhas em AET de barragens de terra através da metodologia *fuzzy* desenvolvida, e que a mesma foi capaz de representar, de forma satisfatória, a influência das incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos nos resultados das análises de estabilidade de taludes, de forma mais simples e com menor tempo computacional, quando comparado às metodologias probabilísticas. Observou-se, ainda, que os valores do risco de falha obtidos com a aplicação da metodologia *fuzzy* proposta foram superiores aos valores de probabilidade de ruptura resultantes da aplicação de metodologia probabilística, o que expressa forte coerência com o comportamento *in loco* da Barragem Olho d'Água, insatisfatório desde o início de sua operação, tendo em vista o conjunto de patologias apresentado pela mesma, tanto no maciço quanto em áreas a jusante.

PALAVRAS-CHAVE: Taludes, Incertezas, *Fuzzy*, Barragem.

1 INTRODUÇÃO

Análises de estabilidade de taludes podem ser realizadas com base no equilíbrio limite ou no comportamento tensão-deformação de uma massa de solo. Estas metodologias são, em geral, aplicadas à avaliação da estabilidade de taludes de modo determinístico, onde os parâmetros de entrada (*inputs*) dos modelos são valores únicos (*crisp*), à semelhança do fator de

segurança à ruptura (FS) que delas resulta.

No entanto, este valor determinístico único para o FS não é capaz de expressar todas as incertezas e a variabilidade que são inerentes aos parâmetros geotécnicos empregados – nem mesmo quando a abordagem é do tipo probabilística –, indicando segurança apenas no que se refere ao equilíbrio da massa de solo.

Em razão desta variabilidade intrínseca, os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos

solos, coesão e ângulo de atrito efetivos (c' e ϕ'), podem ser assumidos como variáveis *fuzzy*, em razão da vasta gama de incertezas relacionadas à sua obtenção e definição, podendo, assim, ser representadas por funções de pertinência, oportunizando o emprego das operações com números *fuzzy* em análises de estabilidade de taludes.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma ferramenta de avaliação do risco de ruptura de taludes de terra, como alternativa aos métodos probabilísticos, que possa ser utilizada na prática cotidiana de Geotecnia, nos casos em que o profissional disponha de poucos dados de campo (ou de laboratório), em especial quando estes trazem consigo um razoável grau de incertezas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Incertezas

Toda obra de Engenharia apresenta riscos, e em seu projeto e construção, estão embutidas inúmeras incertezas, de forma que se torna impossível prever, com toda a certeza, se seu desempenho será positivo ou se apresentará falhas (Vieira, 2005).

Devido à frequência de ocorrência e da seriedade dos danos decorrentes de desastres envolvendo estruturas de terra, surge a necessidade de se conceber modelos que representem, de modo congruente, o desempenho de campo das obras geotécnicas.

Na implementação destes modelos, é necessário realizar a correta estimativa dos parâmetros de interesse, reconhecendo-se as incertezas inerentes a eles, e que a somatória delas ao longo do processo de definição dos parâmetros (e da modelagem propriamente dita) resultará na adoção de valores aproximados, que devem ser encarados apenas como estimativas, e não como valores reais, como se poderia almejar (Velloso e Lopes, 2011; Silva, 2015).

Ademais, cotidianamente o Geotécnico se depara com investigações insuficientes, em termos quantitativos e qualitativos, tornando quase impossível a definição apropriada dos

parâmetros requeridos. Lambe e Whitman (1969) afirmam que o engenheiro necessita de experiência prévia e de uma dose razoável de intuição e julgamento interpretativo para realizar a seleção adequada e coerente de valores para os parâmetros de interesse.

Em Geotecnia, os métodos mais amplamente utilizados em AET são os determinísticos com base no equilíbrio limite. Neles, as incertezas são consideradas de modo implícito e indireto (Dodagoudar e Venkatachalam, 2000), e um valor único (em geral, a média) é assumido, sem levar em conta a variabilidade intrínseca dos parâmetros.

Gomes (2011) aponta, como uma das alternativas ao uso de métodos determinísticos, a Teoria das Probabilidades, que trata da variabilidade dos parâmetros em termos de média e desvio padrão, e assume as incertezas como sendo randômicas, mas que depende de um histórico de dados robusto e consistente, o que nem sempre é possível na prática geotécnica.

O fato de os métodos probabilísticos exigirem uma ampla coleção de dados, somado à dificuldade em se definir o tipo de função de densidade de probabilidade mais adequado a cada variável geotécnica, tornam seu uso um tanto inconveniente (Dodagoudar e Venkatachalam, 2000).

A segunda opção apontada por Gomes (2011) é a Teoria *Fuzzy*, que não exige um banco de dados tão amplo quanto a abordagem probabilística (Ganoulis, 1994), e que se caracteriza como uma excelente ferramenta para a análise de cenários complexos e com um alto grau de incertezas envolvidas, em especial, quando não se tem um bom conhecimento de seus mecanismos e condições de contorno (Silva, 2015).

2.2 Lógica *Fuzzy*

A principal característica da lógica *fuzzy* é a representação de uma ideia vaga sobre um determinado valor atribuído a uma variável. Na abordagem *fuzzy*, ao invés de se atribuir um valor pontual (determinístico) à variável, atribui-se um conjunto de valores que podem ser representativos da mesma, dentro de um

dado nível de pertinência.

Os conceitos abordados no desenvolvimento da lógica *fuzzy* se iniciaram com Lukasiewicz e seus seguidores, na década de 1920, que conceberam as lógicas trivalorada e multivalorada, que vieram a ser o embrião da lógica *fuzzy* (Dubois *et al.*, 2007; Kosko, 1995).

Mas só em 1965, a ideia dos conjuntos *fuzzy* foi formalmente introduzida por Lotfi Asker Zadeh, com a publicação do artigo “Fuzzy Sets”, onde ele, motivado por dificuldades na classificação de padrões e no processamento da informação (Dubois *et al.*, 2007), tratava sobre como capturar graus de imprecisão (incertezas) na representação da informação, aplicando a lógica multivalorada de Lukasiewicz a conjuntos ou grupos de objetos (Vieira, 2005; Silva, 2015).

Desde que Zadeh (1965) formalizou a lógica *fuzzy*, vários estudos já vêm utilizando esta ferramenta na avaliação de incertezas e riscos, em diferentes ramos da Engenharia: Silva (2015), Hosseini and Gholinejad (2014), Sales *et al.* (2014), Mattos e Barreto (2013), Gomes (2011), Hamidi *et al.* (2010), Silva (2008), Topçu and Saridemir (2008), Meidani *et al.* (2004), Fontenelle e Vieira (2001), Doudagoudar e Venkatachalam (2000) e Juang *et al.* (1992), dentre outros.

2.3 Definição e Representação de Números Fuzzy

De acordo com Zadeh (1965), um conjunto *fuzzy* é definido como sendo um grupo de objetos, caracterizado por uma função de pertinência, que atribui, a cada objeto pertencente ao universo de discurso U , um grau de pertinência que varia no intervalo contínuo $[0,1]$, podendo ser expresso como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (1)$$

Na Equação (1), x é o valor atribuído a qualquer elemento pertencente ao universo de discurso U , e $\mu_A(x)$ é o *grau de pertinência* do valor x do universo U ao conjunto A , ou seja: o quanto x se adequa ao conjunto A . A função característica de um conjunto *fuzzy* é denominada *função de pertinência*, e associa, a cada

elemento no universo U , um número real no intervalo $[0,1]$, conforme a Equação (2):

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

Um número *fuzzy* é definido de forma muito semelhante a um conjunto *fuzzy*, e é perfeitamente possível representar variáveis geotécnicas (coesão, ângulo de atrito, etc.) na forma de números *fuzzy*, desde que as mesmas atendam aos critérios especificados por Ganoulis (1994).

Considere um universo U contendo todos os números reais possíveis para a coesão de um dado tipo de solo. O número *fuzzy* que representa a coesão deste solo pode ser definido, por exemplo, a partir dos resultados de três ensaios de cisalhamento direto, nos quais tenham sido obtidos os valores de 18 kPa, 22 kPa e 23 kPa. A Eq. (3) mostra a representação matemática do número *fuzzy* $\tilde{C}$ para a situação descrita, cuja função de pertinência é mostrada na Figura 1.

$$\tilde{C} = \{(0, 0); (18, 1); (22, 1); (23, 1); (30, 0)\} \quad (3)$$

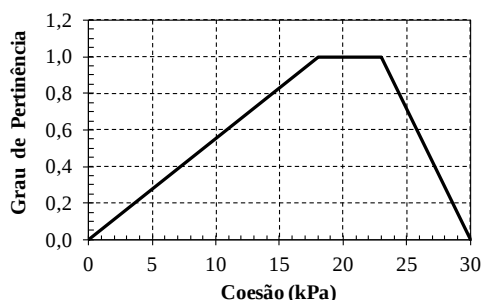


Figura 1. Representação do número *fuzzy* $\tilde{C}$.

De acordo com a Eq. (3) e a Figura 1, é possível perceber que, aos valores 18 kPa, 22 kPa e 23 kPa, foram atribuídos graus de pertinência iguais a 1, e aos valores 0 e 30 kPa foram atribuídos graus de pertinência 0, em razão de não terem figurado entre os resultados dos ensaios realizados. Estes limites 0 e 30 kPa foram, na realidade, arbitrados segundo a experiência de um especialista em Geotecnia, como sendo os valores mínimo e máximo de coesão para aquele dado tipo de solo.

Assim, aos valores entre 0 kPa e 18 kPa (e entre 23 kPa e 30 kPa) foram automaticamente atribuídos um grau de pertinência entre 0 e 1,

pois que os mesmos têm apenas *possibilidade* de figurar entre os resultados de ensaios de cisalhamento realizados para aquele tipo específico de solo, e, portanto, de fazer parte do conjunto que define o número *fuzzy* $\tilde{C}$.

Este número *fuzzy* $\tilde{C}$ também pode ser representado por meio de um intervalo para cada grau de pertinência h , na forma $[c_i(h), c_f(h)]$, onde $c_i(h)$ representa o limite mínimo e $c_f(h)$, o limite máximo do referido intervalo para cada grau de pertinência h considerado. Estando representados na forma de intervalos para cada grau de pertinência considerado, os números *fuzzy* podem ser aritmeticamente manipulados, utilizando regras da matemática intervalar. Mais detalhes podem ser encontrados em Ganoulis (1994).

As operações com números ou conjuntos *fuzzy* conduzem a um *output* também *fuzzy* (Vieira, 2005), que necessita ser reconvertido em um valor numérico determinístico, representativo deste número (ou conjunto) *fuzzy* de saída (Hamidi *et al.*, 2010). Este procedimento é chamado *defuzzificação*, e permite tirar conclusões sobre as operações *fuzzy* realizadas.

3 MODELOS FUZZY

3.1 Barragem Olho d'Água

Construída em Várzea Alegre, município do Estado do Ceará, a Barragem Olho d'Água é zoneada, formada por solos SC-CL e SC-SM, com seção máxima de 24 m de altura, e inclinação de 1(V):3(H) no talude de montante e de 1(V): 2,5(H) no de jusante. O sistema de drenagem interna consiste de um filtro vertical combinado a um dreno horizontal, conectado a um *rockfill*.

Concluída em 1998, a construção da Barragem Olho d'Água foi executada com uma série de modificações em relação ao projeto original, havendo muito poucos registros formais das alterações implementadas e dos materiais efetivamente utilizados. Como consequência, em 2009, começaram a aparecer problemas, a maioria relacionada a um considerável fluxo de água através do solo de fundação (Araújo, 2013).

A Figura 2 mostra a seção transversal da barragem. Esta foi a seção utilizada nos cálculos realizados com os modelos *fuzzy* desenvolvidos.

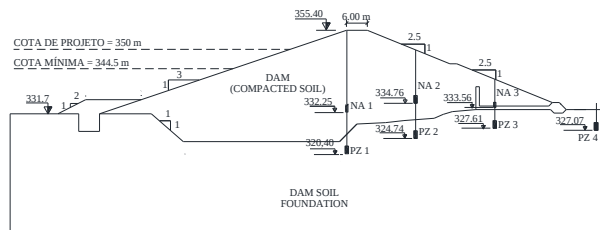


Figura 2. Seção transversal da Barragem Olho d'Água.

3.2 Definição do Problema

O problema ora discutido consiste na utilização de modelos baseados em operações com números *fuzzy* para a avaliação da estabilidade de taludes de terra, utilizando os métodos de Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955).

A etapa inicial do desenvolvimento dos modelos *fuzzy* foi a coleta de dados relativos à Barragem Olho d'Água, considerando operação com fluxo estacionário e carga hidráulica atuante máxima, nomeadamente, dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto para amostras do solo do maciço compactado (ensaios 1 e 2) e do solo de fundação (ensaios 3 e 4), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades geotécnicas dos solos do maciço compactado e de fundação.

Variável	Maciço Compactado		Solo de Fundação	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
c' (kPa)	37,0	33,0	0,0	17,0
ϕ' (°)	31,5	27,3	31,9	40,5

De posse dos resultados dos ensaios, foram definidos os números coesão efetiva *fuzzy* ($\tilde{c}'$) e ângulo de atrito efetivo *fuzzy* ($\tilde{\phi}'$), na forma de funções de pertinência triangulares, tanto para o solo do maciço compactado quanto para o solo de fundação.

Estas funções triangulares foram definidas atribuindo-se grau de pertinência 1,0 para os valores de c' e ϕ' obtidos nos ensaios de cisalhamento direto realizados (Tabela 1). Em seguida, segundo o julgamento técnico e a

experiência de especialistas em Geotecnia (os autores), foram arbitrados os limites mínimo e máximo das funções (aqueles relativos ao grau de pertinência 0,0), em valores coerentes com o tipo de solo analisado. Estes limites mínimo e máximo foram mantidos constantes para todas as funções de pertinência de cada parâmetro e tipo de solo.

Tendo sido definidos o ápice e os limites mínimo e máximo de cada função de pertinência das variáveis coesão e ângulo de atrito *fuzzy*, os valores com graus de pertinência entre 0,0 e 1,0 foram automaticamente determinados, representando assim, nesta análise, as incertezas acumuladas durante todo o processo de determinação de seu valor (desde a fase de coleta das amostras de solo até a obtenção dos resultados de laboratório). E apesar de não terem figurado entre os resultados dos ensaios, estes eram valores plausíveis para o parâmetro considerado, daí porque receberam graus de pertinência no intervalo]0, 1[.

Na definição das funções triangulares da coesão *fuzzy* do solo do maciço compactado, os dois valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto foram assumidos como o ápice das funções do Caso A (o menor valor, 33,0 kPa) e do Caso B (o maior valor, 37,0 kPa). Para a função do Caso C, foi assumido o valor médio dos resultados dos Casos A e B (i.e., 35,0 kPa).

Este mesmo procedimento, descrito para a definição das funções de pertinência da coesão *fuzzy* do solo do maciço compactado, foi utilizado na definição das funções de pertinência da coesão *fuzzy* do solo de fundação.

Semelhantemente, o procedimento acima descrito também foi adotado na definição das funções de pertinência do ângulo de atrito *fuzzy*, utilizando os valores da Tabela 1 relativos ao ângulo de atrito de ambos os solos, arbitrando-se os limites mínimo e máximo de 15° e 40° para o solo do maciço compactado, e de 20° e 50° para o solo de fundação.

Na forma como foram definidos, estes três casos permitem avaliar a influência, no resultado final da análise de estabilidade de taludes (ou seja, no valor do FS), do fato de o geotécnico dispor de apenas um único dado de ensaio para definir um valor para os parâmetros de entrada dos modelos, admitindo-se que este

valor pode ser qualquer dos três ápices assumidos nos Casos A, B e C, e que existe uma possibilidade de qualquer valor na região delimitada pela função de pertinência ser o mais adequado para esta escolha.

A Figura 3 mostra as funções de pertinência triangulares adotadas nos Casos A, B e C para a coesão *fuzzy* do solo do maciço, e a Figura 4, para a coesão *fuzzy* do solo de fundação.

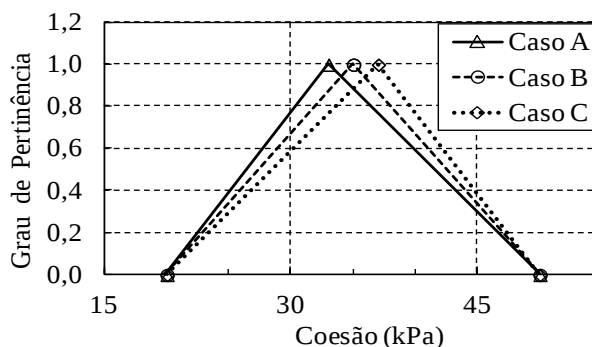


Figura 3. Funções de pertinência triangulares (Casos A, B e C) da variável coesão *fuzzy* para o solo do maciço compactado.

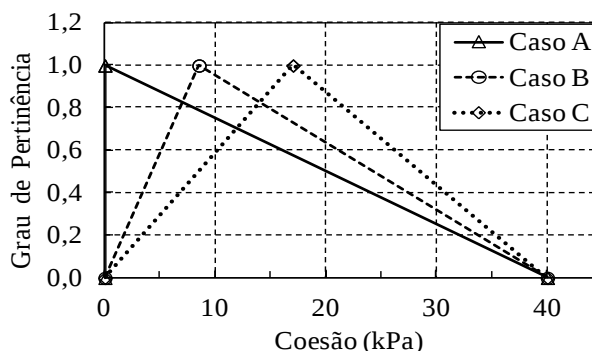


Figura 4. Funções de pertinência triangulares (Casos A, B e C) da variável coesão *fuzzy* para o solo de fundação.

3.3 Fator de Segurança *Fuzzy*

Nos métodos baseados no equilíbrio limite de uma massa de solo, o fator de segurança FS é dado por:

$$FS = \frac{\sum [c'.L.R + (N - u.L).R.\tan\phi']}{\sum W.x - \sum N.f + \sum kW.e \pm D.d \pm A.a} \quad (4)$$

Nesta Eq. (4), FS é o fator de segurança do equilíbrio de momentos, c' e ϕ' são a coesão e o ângulo de atrito efetivos do solo da base de cada fatia, α é o ângulo de atrito efetivo, L é o comprimento da base da fatia, R é o raio da superfície potencial de ruptura circular, N é a

força normal na base da fatia, u é a poropressão na base da fatia, W é o peso da fatia, k é o coeficiente de conversão de ação sísmica para a ação estática equivalente, D e A são ações externas, e x , f , e , d , a são os braços de alavanca das forças W , N , kW , D e A (Krahn, 2004).

Conforme explicitado, as variáveis de resistência ao cisalhamento dos solos (c' e ϕ') carregam consigo incertezas que dependem do tipo, quantidade e qualidade da investigação geotécnica realizada, e influenciam diretamente tanto a definição dos valores para estes parâmetros quanto a confiabilidade dos prognósticos de estabilidade da obra em análise.

Desta forma, coesão e ângulo de atrito podem ser assumidos como números *fuzzy*, tornando igualmente em números *fuzzy* as variáveis que deles dependem.

No método de Fellenius (1936), apenas o FS é um número *fuzzy*, já que, nele, a força normal N independe de variáveis *fuzzy*. Já no método de Bishop Simplificado (1955), tanto a força normal N quanto o próprio FS são *fuzzy*, conforme mostra a Eq. (5):

$$\widetilde{FS} = \frac{\sum [\widetilde{c'} \cdot L \cdot R + (\widetilde{N} - u \cdot L) \cdot R \cdot \tan \widetilde{\phi'}]}{\sum W \cdot x - \sum \widetilde{N} \cdot f + \sum kW \cdot e \pm D \cdot d \pm A \cdot a} \quad (5)$$

Escrevendo, agora, as variáveis *fuzzy* coesão e ângulo de atrito na forma intervalar, isto é: $c(h) = [c_i(h), c_f(h)]$ e $\phi'(h) = [\phi'_i(h), \phi'_f(h)]$, e considerando ainda: o princípio da extensão de Zadeh (1965), as regras de operação da aritmética intervalar, e uma superfície potencial de ruptura circular ($f=0$), a função de pertinência do FS *fuzzy* pode ser definida, considerando os intervalos para cada nível de pertinência h , $FS(h) = [FS_i(h), FS_f(h)]$. Desta forma, o FS inicial e final de cada intervalo, para cada grau de pertinência h , serão conforme as Eqs. (6) e (7):

$$FS_i(h) = \frac{\sum [c'_i(h)LR + N_i(h)R \tan \phi'_i(h) - uLR \tan \phi'_f(h)]}{\sum Wx - \sum kWe \pm Dd \pm Aa} \quad (6)$$

$$FS_f(h) = \frac{\sum [c'_f(h)LR + N_f(h)R \tan \phi'_f(h) - uLR \tan \phi'_i(h)]}{\sum Wx - \sum kWe \pm Dd \pm Aa} \quad (7)$$

Na forma como foram definidos os extremos

FS_i e FS_h , verificou-se que a convergência das iterações do método de Bishop Simplificado (1955) não ocorre, porque estes extremos são interdependentes: para toda iteração realizada, a convergência do limite FS_i automaticamente afeta o valor atual do limite FS_h , o que, por sua vez, altera novamente o FS_i , e assim por diante. Isto foi solucionado substituindo-se, na expressão da força normal *fuzzy* ($\widetilde{N}$), os extremos FS_i e FS_h por um FS médio, o que viabilizou a convergência do processo iterativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados da Barragem Olho d'Água foram usados como *inputs* dos modelos *fuzzy* testados, a saber: as funções de pertinência triangulares (Casos A, B e C).

Os resultados da defuzzificação das funções de saída dos modelos *fuzzy*, via método do centroide (Hamidi *et al.*, 2010), para os dois métodos de AET avaliados (Fellenius e Bishop Simplificado), nos Casos A, B e C, encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados determinísticos e dos modelos *fuzzy*, para Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955).

Caso	Determinístico		Fuzzy	
	Fellenius	Bishop	Fellenius	Bishop
A	1,61	1,77	2,12	2,36
B	1,94	2,13	2,22	2,47
C	2,28	2,50	2,32	2,56

Os resultados determinísticos e dos modelos *fuzzy* mostraram coerência com o esperado: para coesão e ângulo de atrito menores, FS menores (a possibilidade de ruptura é maior em solos com valores de c' e ϕ' mais baixos).

Para os dois métodos analisados, os FS *fuzzy* mantiveram a tendência de conservadorismo peculiar a cada um deles em suas versões determinísticas. Os FS do método de Bishop Simplificado (1955) resultaram entre 10% e 15% maiores que os de Fellenius (1936).

A metodologia *fuzzy* apresentou maior uniformidade dos valores dos FS resultantes (desvio-padrão de 0,100) que aqueles provenientes da metodologia determinística (0,365). Esta maior homogeneidade dos

resultados *fuzzy* se deu mesmo a despeito de alguns dados de entrada terem constituído um conjunto amostral com valores bastante díspares (ver dados da coesão do solo de fundação).

No entanto, ainda que os resultados do FS em uma análise de estabilidade de taludes sejam significativos, é arriscado tirar conclusões a respeito de um valor numérico isolado, sendo mais apropriado avaliá-lo em conjunto com outras ferramentas. Uma delas é o *índice de falha* (R_f), que define a possibilidade de falha de um sistema (no caso deste artigo, a possibilidade da ruptura de um talude), e é calculado a partir da função de pertinência de saída (a do FS), pela relação entre a área da função até um valor assumido como crítico (o $FS_{crít} = 1,0$), e a área total sob a curva (Ganoulis, 1994).

Os modelos *fuzzy* para o método de Bishop Simplificado (1955) apontaram um índice de falha (R_f) para o talude de jusante da Barragem Olho d'Água de 6,60% no Caso A, de 5,66% no Caso B, e de 4,51% no Caso C, enquanto que a metodologia probabilística apresentada por Araújo (2013) indicou, para o mesmo cenário, um índice de falha de 0,0%, ou seja, probabilidade de ruptura nula, conforme mostra a Figura 5.

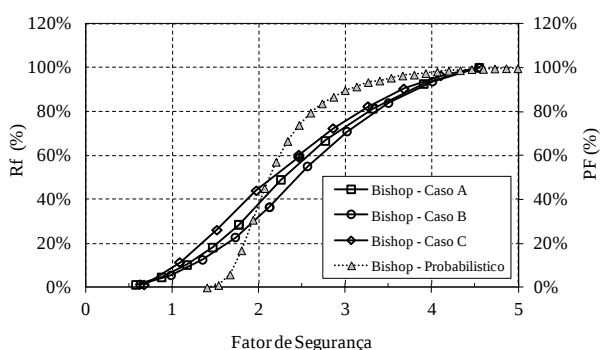


Figura 5. Índice de Falha (R_f) e probabilidade de falha (PF) dos modelos *fuzzy* apresentados (Casos A, B e C) e da análise probabilística de Araújo (2013) considerando o método de Bishop Simplificado (1955).

Sabe-se, no entanto, que o desempenho de campo da Barragem Olho d'Água não condiz com esta probabilidade de ruptura nula indicada pelas análises probabilísticas de Araújo (2013), pois tem apresentado diversas patologias desde o início da operação, incluindo artesianismo e areia movediça em áreas a jusante do maciço,

além de um processo erosivo avançado no talude de jusante, decorrentes de um sistema ineficiente de drenagem e da carência de mecanismos de proteção (Dantas Neto e Carneiro, 2013; Araújo, 2013).

Assim sendo, a metodologia *fuzzy* ora apresentada se mostrou capaz de indicar, de forma adequada e bastante eficiente, o risco real de ruptura do talude de jusante da Barragem Olho d'Água, prognóstico fortemente condizente com sua insatisfatória performance de campo.

As análises *fuzzy* apresentaram resultados bastante significativos, a despeito de os modelos terem recebido um conjunto amostral de dados de entrada muito pequeno (dois dados para cada parâmetro considerado) e com um grau razoável de heterogeneidade.

5 CONCLUSÕES

Através desse trabalho foi possível demonstrar que a metodologia *fuzzy* proposta se apresentou como uma ferramenta bastante atrativa e extremamente útil ao Geotécnico, em razão de seu excelente desempenho, mesmo em face de dados de entrada escassos e relativamente heterogêneos, propiciando uma enorme simplificação do procedimento tradicional de AET.

Além disto, a metodologia *fuzzy* demonstrou prescindir completamente da adoção de funções de densidade de probabilidade para representar os parâmetros geotécnicos, e propiciou a realização de análises mais céleres, com uma grande economia de tempo computacional, e sem perdas na qualidade nos resultados, quando comparada a metodologias tradicionais.

Exigindo apenas alguns dados de ensaios, o julgamento técnico de um especialista e uma simples planilha de cálculo, a metodologia *fuzzy* se configura, assim, como alternativa bastante atrativa e de futuro promissor na prática geotécnica, em especial quando o profissional dispõe de poucos dados de campo/laboratório, e estes envolvem incertezas.

Os resultados mostraram que a metodologia *fuzzy* foi capaz de avaliar de modo mais eficiente a existência de um risco real de ruptura da Barragem Olho d'Água, revelando-se bastante coerente com seu desempenho de

campo insatisfatório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro à pesquisa que proporcionou a elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Araújo, F. R. (2013) *Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de Taludes da Barragem Olho d'Água no Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- Bishop, A. W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, nº 1, p.7-17.
- Dantas Neto, S. A. e Carneiro, A. A. (2013) Universidade Federal do Ceará. *Relatório das Condições de Segurança da Barragem de Olho d'Água*. Convênio UFC/COGERH, Fortaleza.
- Dodagoudar, G. R e Venkatachalam, G. (2000) Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory, *Computer and Geotechnics*, nº 27, Issue 2, p.101-115.
- Dubois, D.; Esteva, F.; Godo, L.; Prade, H. (2007) Fuzzy-set Based Logics – An History-oriented Presentation of Their Main Developments, *Handbook of the History of Logic*, Vol. 8, Elsevier.
- Fellenius, W. (1936) W. *Calculation of the Stability of Earth Dams*. Proceedings of the Second Congress of Large Dams, Vol. 4, p.445-463.
- Fontenelle, A. S. e Vieira, V. P. P. B. (2001) Análise de risco aplicada à estabilidade de talude de barragem de terra no Estado do Ceará. *XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Fortaleza.
- Ganoulis, J. G. (1994) Engineering Risk Analysis of Water Pollution. *Probabilities and Fuzzy Sets*, VCH Publishers.
- Gomes, V. U. (2001) *Aplicação da teoria Fuzzy em um modelo bidimensional de transporte de massa, para estudar o risco Fuzzy em rios urbanos, sujeitos a lançamentos de agentes poluentes*. Tese de Doutorado em Rec. Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 120p.
- Hamidi, J. K.; Shahriar, K.; Rezai, B.; Bejari, H. (2010) Application of Fuzzy Set Theory to Rock Engineering Classification Systems: An Illustration of the Rock Mass Excavability Index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 43, 2010, p.335–350.
- Hosseini, N. e Gholinejad, M (2014) Investigating the Slope Stability Based on Uncertainty by Using Fuzzy Possibility Theory. *Mining Sciences*, Vol.59, Issue 1, April, p.179–188.
- Juang, C. H.; Lee, D. H.; Sheu, C. (1992) Mapping Slope Failure Potential Using Fuzzy Sets. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, nº 3, p. 475-494.
- Krahn, J. (2004) *Stability Modeling with SLOPE/W*. An Engineering Methodology, 1st ed., GEO-SLOPE/W International Ltd.
- Kosko, B. (1995) *Pensamiento Borroso. La nueva ciencia de la lógica borrosa*. Editora Crítica, 301p.
- Lambe, W. T. e Whitman, R. V. (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.
- Mattos, C. L. C. e Barreto, G. A. (2013) ARTIE and MUSCLE Models: Building Ensemble Classifiers from Fuzzy ART and SOM networks, *Neural Computing & Applications*, Vol. 16, p.49-61.
- Meidani, M. G.; Habibagahi, S.; Katebi, S. (2004) An Aggregated Fuzzy Reliability Index for Slope Stability Analysis”, *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 1, nº 1, p.17-31.
- Sales, R. J. M.; Gomes, V. U.; Souza, R. O. (2014) Aplicação da Teoria Fuzzy em um Modelo Bidimensional de Transporte de Massa, para Estudar o Risco em Rios, *Revista DAE*, nº 194.
- Silva, M. A. (2008) *Aplicação de Lógica Nebulosa para previsão do risco de escorregamentos de taludes em solo residual*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia, Faculdade de Engenharia da UERJ, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Silva, A. V. (2015) *Avaliação do risco de ruptura em análises de estabilidade de taludes de barragens de terra utilizando números fuzzy*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- Topçu, I. B. e Saridemir, M. M. (2008) Prediction of Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, *Computational Materials*, Vol. 41, p.305-311.
- Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (2011) *Fundações. Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. Vol. completo.
- Vieira, V. P. P. B. (2005) *Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 361p.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, Vol.8, p. 338-353.