

## Avaliação da Condição Não Drenada Liquefeita em Solos Residuais Maduros

Emily Cristina da Silva, Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,  
emily.cristina@fonntesgeotecnica.com

Gladys Celia Hurtado Aquino Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,  
gladys.hurtado@fonntesgeotecnica.com

Rodrigo Pereira de Almeida, Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,  
rodrigo.almeida@fonntesgeotecnica.com

Henrique Lomasso Perche Costa, Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,  
henrique.lomasso@fonntesgeotecnica.com

Michel Moreira Morandini Fontes, Sócio Diretor, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,  
michel@fonntesgeotecnica.com

**RESUMO:** A análise não drenada em solos é um método utilizado na geotecnia para avaliar o comportamento de solos saturados sob condições de carregamento rápido, onde não há tempo suficiente para a dissipação dos excessos de pressões intersticiais. Esse tipo de análise assume que a capacidade de drenagem do solo é inferior à velocidade do carregamento, dessa maneira a água presente nos vazios do solo não sai a tempo. Isso gera poropressões que reduzem o contato entre as partículas dos solos, reduzindo assim sua resistência aos esforços de cisalhamento. Se o solo estiver saturado e seu comportamento for contrátil, eles podem apresentar um amolecimento, ou seja, queda da sua resistência ao cisalhamento não drenada de pico para uma resistência não drenada liquefeita ou residual. Quanto mais contrátil o solo, maior será seu potencial para perda dessa resistência. Em situações não drenadas, como em casos de carregamentos sísmicos, construção de aterros rápidos ou fundações de estruturas, a análise não drenada se torna crucial para compreender a estabilidade do solo. Nesse contexto, destaca-se a análise liquefeita em solos, um fenômeno em que um solo saturado perde temporariamente sua capacidade de suporte devido ao aumento das pressões intersticiais durante carregamentos cíclicos ou estáticos. A liquefação pode ocorrer em qualquer solo contrátil e saturado ou próximo da saturação, tais como areias e siltes fofos e argilas muito sensíveis. Contudo, nem todo solo apresentaria perda da resistência não drenada (de pico) até alcançar uma resistência não drenada residual, a condição não drenada residual dos materiais contráteis deverá ser avaliada em conjunto com outros ensaios nesses materiais para comprovação de tal comportamento. Nesse contexto, o artigo se propõe avaliar a condição não drenada, em especial a suscetibilidade a liquefação de solos residuais maduros, por meio de ensaios triaxiais associados a ensaios CPTu (Cone Penetration Test with measure of pore pressure). O estudo propõe a avaliação por diversos autores em função dos solos residuais maduros originados em região tropical serão avaliados em relação ao seu comportamento não drenado aos esforços de cisalhamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Liquefação, Solos Residuais, CPTu, Mineração, Triaxial.

**ABSTRACT:** Undrained soil analysis is a method used in geotechnics to evaluate the behavior of saturated soils under conditions of rapid loading, where there is not enough time for excess pore pressure to dissipate. This type of analysis assumes that the soil's drainage capacity is lower than the loading speed, meaning that the water present in the soil voids does not escape in time. This generates pore pressures that reduce contact between soil particles, thus reducing their resistance to shear stress. If the soil is saturated and its behavior is contractile, they may exhibit softening, that is, a drop from their peak undrained shear strength to a liquefied or residual undrained strength. The more contractile the soil, the greater its potential for loss of resistance. In undrained situations, such as seismic loading, construction of rapid embankments or foundations of structures,

undrained analysis becomes crucial to understanding soil stability. In this context, liquefied soil analysis stands out, a phenomenon in which a saturated soil temporarily loses its bearing capacity due to increased pore pressures during cyclic or static loading. Liquefaction can occur in any contractile and saturated soil or close to saturation, such as soft sands and silts and very sensitive clays. However, not all soil would show a loss of undrained resistance (peak) until reaching a residual undrained resistance, the residual undrained condition of the contractile materials must be evaluated in conjunction with other tests on these materials to prove such behavior. In this context, the article proposes to evaluate the undrained condition, in particular the susceptibility to liquefaction of mature residual soils, through triaxial tests associated with CPTu tests (Cone Penetration Test with measurement of pore pressure). The study proposes evaluation by different authors of mature residual soils originating in tropical regions will be evaluated in relation to their undrained behavior under shear stresses.

**KEYWORDS:** Liquefaction, Residual Soils, CPTu, Mining, Triaxial.

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação da condição não drenada de materiais de fundação, nesse caso o Solo Residual Maduro originados de regiões tropicais, será realizada mediante a caracterização do seu comportamento sob cisalhamento, isto é, se seu comportamento é contrátil ou dilatante, por meio de correlações com os ensaios CPTU, SPT, triaxiais e ensaios de caracterização realizados nas campanhas de investigação da estrutura. Se o solo estiver saturado e seu comportamento for contrátil, com base nas recomendações dadas por Olson (2009) e Robertson (2016), eles podem apresentar um amolecimento, ou seja, queda da sua resistência ao cisalhamento não drenado de pico para uma resistência não drenada liquefeita ou residual. Quanto mais contrátil o solo, maior será seu potencial para perda dessa resistência.

Ressalta-se que, de acordo com Robertson (2016) a liquefação ocorre em materiais saturados ou quase saturados, sejam eles soltos, de nula coesão como as areias, bem como em argilas sensíveis de baixa plasticidade. Algumas argilas de alta plasticidade também podem apresentar amolecimento quando saturada e sob efeito de carregamento, no entanto, essa resposta é de maneira mais gradual. Nesse sentido, é importante sinalizar que esta caracterização de susceptibilidade à liquefação está integralmente ligada ao comportamento arenoso dos materiais – *sand like* de baixa densificação. Contudo, como sinalizado pelos dois autores, Olson e Robertson, solos com comportamento argiloso – *clay like* e contráteis também geram excessos de poropressão significativos que podem levar a queda da sua resistência ao cisalhamento não drenado, sendo sinalizados para este tipo de material outras áreas dentro dos gráficos para definição dessa condição e outras fórmulas para definição dos parâmetros não drenados residuais.

Contudo, a avaliação da condição não drenada por meio de ensaios CPTU permite a definição do comportamento do material, sendo ele contrátil ou dilatante. A confirmação da contratibilidade de um material, amolecimento, não significa necessariamente queda da sua resistência ao cisalhamento não drenado de pico para uma resistência não drenada liquefeita ou residual. Dessa forma, torna-se importante a avaliação conjunta dos ensaios de campo, como por exemplo o CPTu com os resultados externados por ensaios de laboratório como ensaios de caracterização e dos triaxiais não drenados CIU uma vez que, por meio da avaliação das trajetórias de tensão é possível identificar a susceptibilidade, ou não, de um material.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Avaliação da condição não drenada por meio de ensaios CPTU

Para avaliação do material de solo residual maduro foram utilizados os ensaios CPTu, com base na aplicação das envoltórias propostas por Fear e Robertson (1995), conforme proposto por Olson (2009). A metodologia de Olson (2009) estabelece novos limites em relação às formulações de Fear e Robertson (1995), baseados na compressibilidade de materiais não coesivos, estabelecendo que materiais mais resistentes têm menor susceptibilidade a perda de resistência quando não drenado, se comparados com materiais mais contráteis para uma mesma tensão efetiva e valor de NSPT/ $qc1$ .

Ainda, os ensaios CPTu foram avaliados também pelo método proposto por Robertson em 2016, que apresentou uma atualização do sistema de classificação de solos SBTn (Soil Behavior Type) proposto por Robertson (2009). Com o objetivo de apresentar uma classificação prática, o foco esteve na determinação de

classes de comportamento e não na separação de materiais por características físicas. O autor utilizou uma classificação do comportamento in situ observado nos materiais analisados, apresentando os grupos de comportamento *sand-like*, *transicional* e *clay-like*.

O critério de estado é um importante identificador de suscetibilidade à liquefação, devido a que esta suscetibilidade depende fortemente do estado inicial do solo. Grande progresso no entendimento deste fenômeno deve-se principalmente ao avanço desta metodologia que vem desde o pioneiro Casagrande (1936) como o “índice do estado crítico”, Ishihara et al. (1975) com “a linha de transformação de fase”; Castro e Poulos (1977), Poulos (1981) com “o estado permanente de deformação” até Been & Jefferies (1987) e Jefferies & Been (2016) com “os parâmetros de estado”.

A Figura 1 apresenta os resultados gráficos para avaliação da suscetibilidade à perda de resistência quando submetido a carregamento não drenado pelas metodologias de Robertson (2016), Jefferies & Been (2016) e Olson (2009) respectivamente.

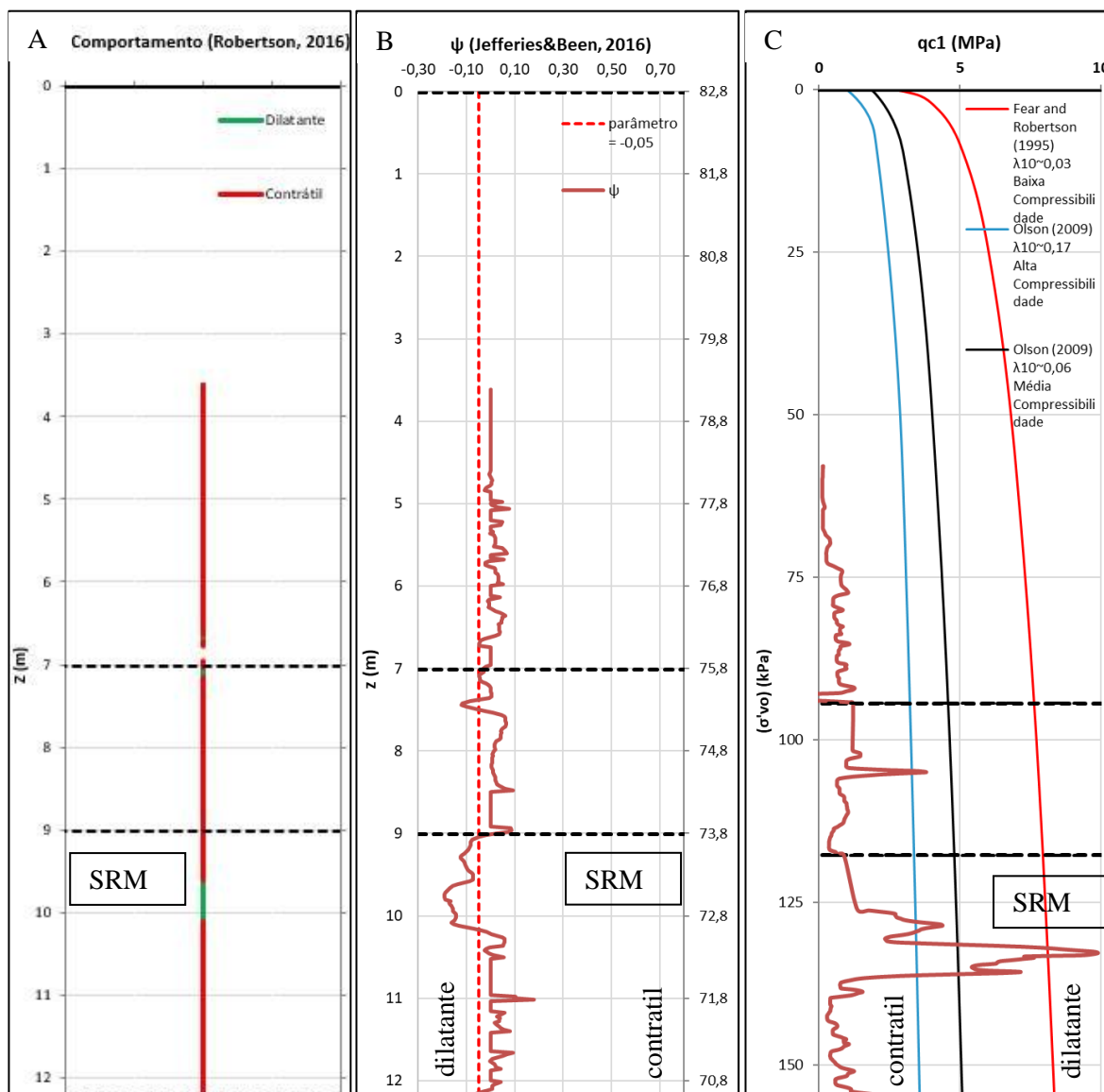


Figura 1. Avaliação da suscetibilidade à perda de resistência quando submetido a carregamento não drenado - Correlação com ensaios CPTu. (A) Robertson, 2016. (B) Jefferies & Been, 2016. (C) Olson, 2009.

Na avaliação dos CPTu apresentados, considerando as três metodologias citadas, o Solo Residual Maduro (SRM) apresenta comportamento majoritariamente contrátil.

## 2.2 Avaliação da condição não drenada por meio de ensaios de caracterização

Conforme resultados apresentados na Tabela 1, o solo residual foi caracterizado principalmente como areia silto argilosa com pedregulhos, exceto a amostra coletada na barragem A-1 que foi caracterizada como areia silto argilosa variando até argila areno siltosa. Os resultados dos limites de plasticidade, indicaram que o Solo Residual Maduro apresenta comportamento de argila de baixa plasticidade e silte de alta plasticidade.

Esses resultados serviram de base para avaliação da susceptibilidade à liquefação, adotando o critério definido por Perlea et al. (1999), onde indica que para um solo ser suscetível à liquefação deve apresentar fração de finos ( $< 0,005 \text{ mm}$ )  $< 20\%$  e índice de plasticidade ( $IP$ )  $\leq 13\%$ . Sendo assim, os resultados indicaram que o SRM não é suscetível à liquefação, com exceção da amostra 02.

Ainda, Perlea indica um gráfico de correlação do limite de liquidez (LL) com a umidade natural do solo para verificação das condições de saturação na susceptibilidade à liquefação. Esse gráfico é apresentado na Figura 2, plotando os resultados dos ensaios obtidos, voltando a confirmar a não susceptibilidade à liquefação, novamente com exceção da amostra 02.

Tabela 1. Granulometria do Solo Residual Maduro

Amostra	Argila (%)	< 0,005mm (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)
				Fina	Média	Grossa	
01	41,0	46,0	25,0	8,0	7,0	13,0	6,0
02	7,2	8,7	33,7	13,6	9,1	8,1	28,3
03	14,9	31,0	29,3	11,7	11,6	22,1	10,5

Tabela 2. Limites de Plasticidade e Umidade Natural (%)

Amostra	LL	LP	IP	W
01	55	32	23	11
02	28	18	10	30
03	39	22	17	19

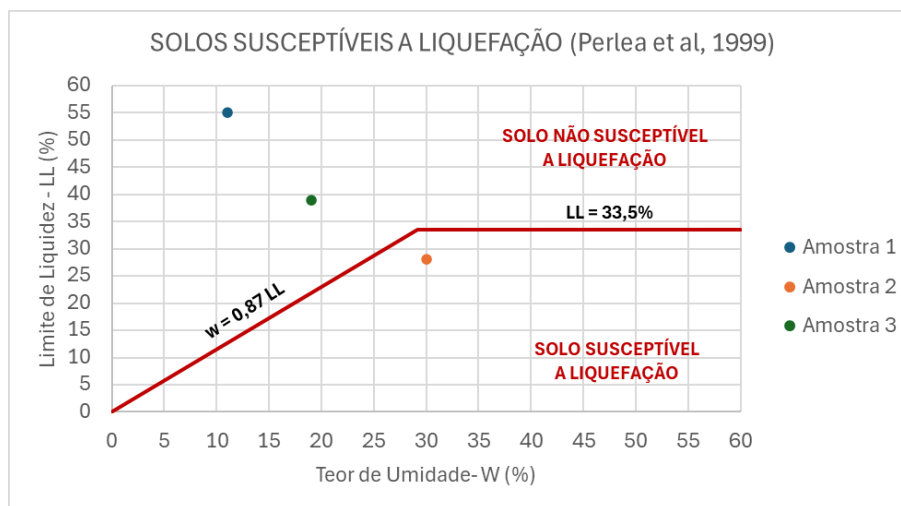


Figura 2. Influência da plasticidade na liquefação dos solos finos (Perlea et al., 1999)

## 2.3 Avaliação da condição não drenada por meio de ensaios triaxiais CIU

A avaliação do comportamento contrátil ou dilatante por meio dos ensaios triaxiais, consiste na avaliação dos excessos de poropressão gerados durante o cisalhamento para diferentes níveis de tensões nos quais foi submetida a amostra durante o ensaio. Dessa forma, um material com comportamento contrátil apresenta elevados excessos de poropressão na ruptura e indica pouca ou nula dissipação após ruptura para determinado nível de tensão. Sendo assim, o material deverá ser modelado com parâmetros de resistência não drenada durante o carregamento no nível de tensão especificado. No caso contrário, material com comportamento dilatante apresenta poropressão negativa para determinado nível de tensões; sendo assim, o

material deverá ser modelado com parâmetros de resistência drenada durante o carregamento no nível de tensão especificado.

Nos ensaios triaxiais, esse comportamento pode ser observado no gráfico de trajetórias de tensões efetivas  $p'$ - $q$  em conjunto com a trajetória de tensões totais  $p$ - $q$ , onde é possível observar a geração dos excessos de poropressão durante o carregamento e no cisalhamento. Geralmente, materiais dilatantes apresentam a trajetória de tensões  $p'$ - $q$  para a direita da linha  $p$ - $q$ , ou muito próximas no ponto de ruptura. Em contrapartida, materiais contráteis se comportam de maneira contrária ao descrito, apresentando a trajetória de tensões efetivas voltada para esquerda, representando o acréscimo de poropressão gerado.

De acordo com o comportamento observado nas Figura 3, Figura 4 e Figura 5 das trajetórias de tensões  $p'$ - $q$  e  $p$ - $q$ , para as três amostras ensaiadas, o SRM demonstrou ser dilatante até 200 kPa, gerando baixos excessos de poropressão e conseguindo dissipá-los após cisalhamento. Cabe mencionar que para tensão confinante de 400 kPa e 600 kPa, o material apresenta comportamento contrátil, exibindo maiores acréscimo de poropressão e trajetória de tensões efetivas voltada para esquerda da trajetória total. Ainda, é possível observar pela curva de tensão-deformação (A), que para todos os níveis de tensão, exceto 600 kPa, as amostras apontam um comportamento *strain-hardening*, sem amolecimento após a ruptura. Para 600 kPa de nível de tensões, o material apresenta comportamento *strain-softening*, com amolecimento do material após atingir a resistência de pico.

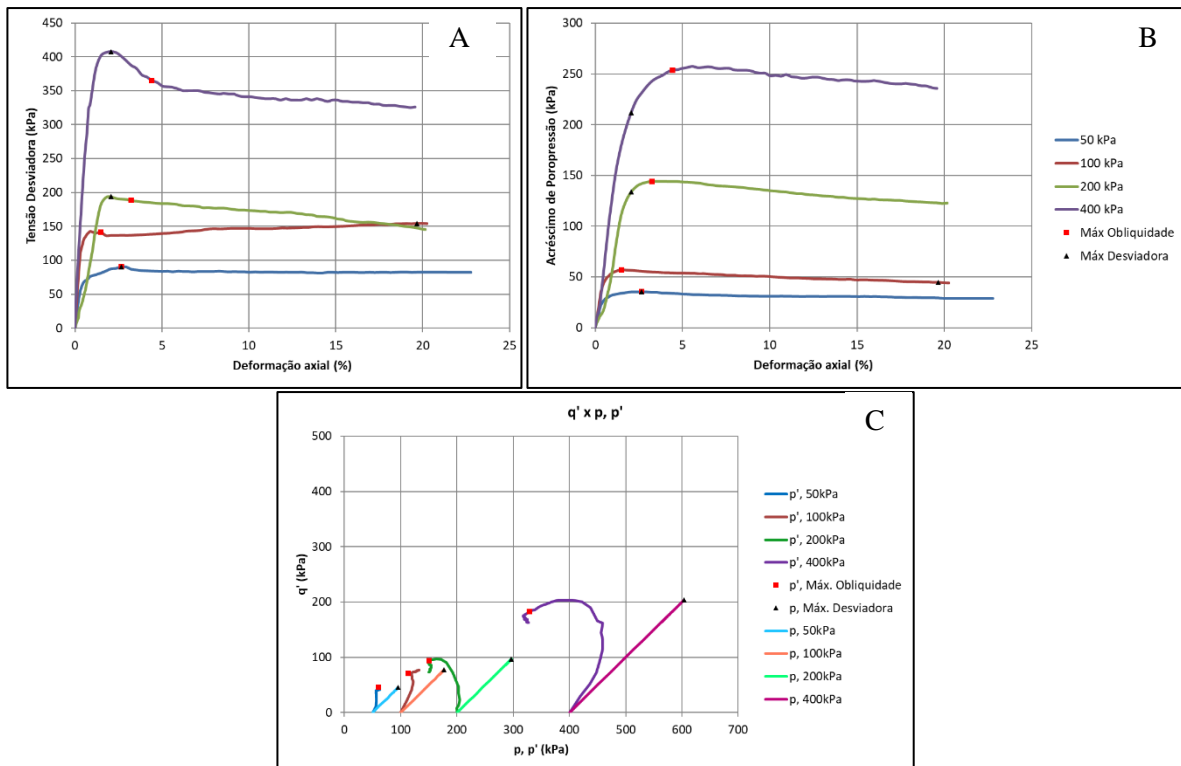


Figura 3. (A) Curva Tensão-deformação; (B) Acréscimo de poropressão x deformação; (C) trajetória de tensões  $q'$  x  $p$ ,  $p'$  - Amostra 01

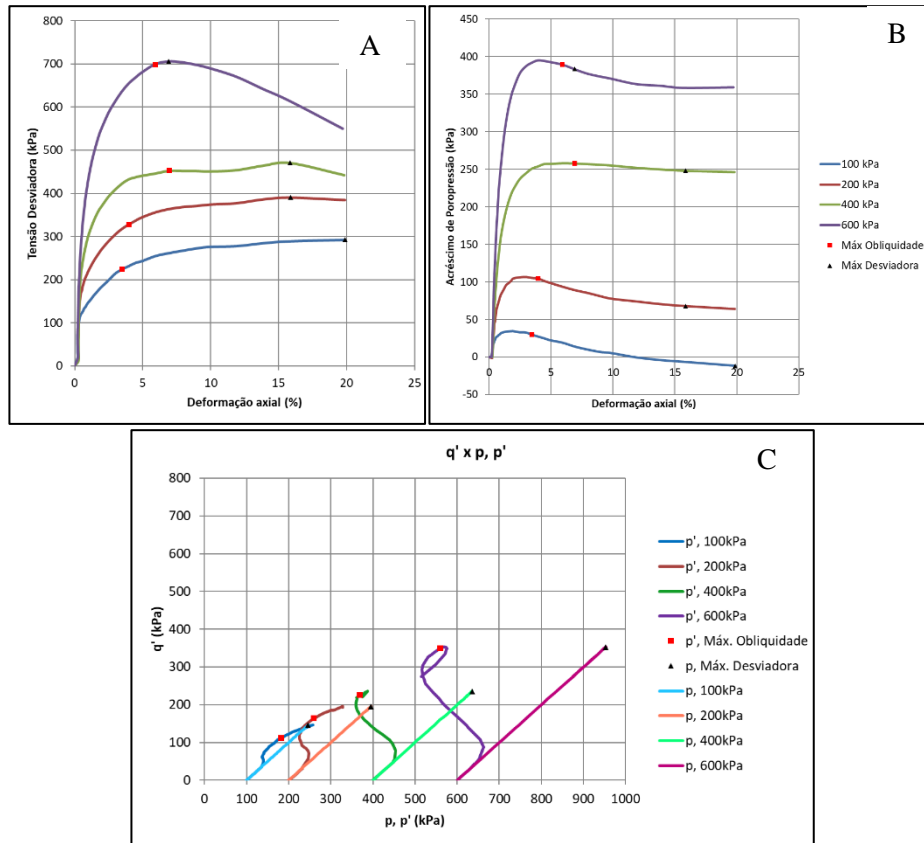


Figura 4. (A) Curva Tensão-deformação; (B) Acréscimo de poropressão x deformação; (C) trajetória de tensões  $q'$  x  $p$ ,  $p'$  - Amostra 02

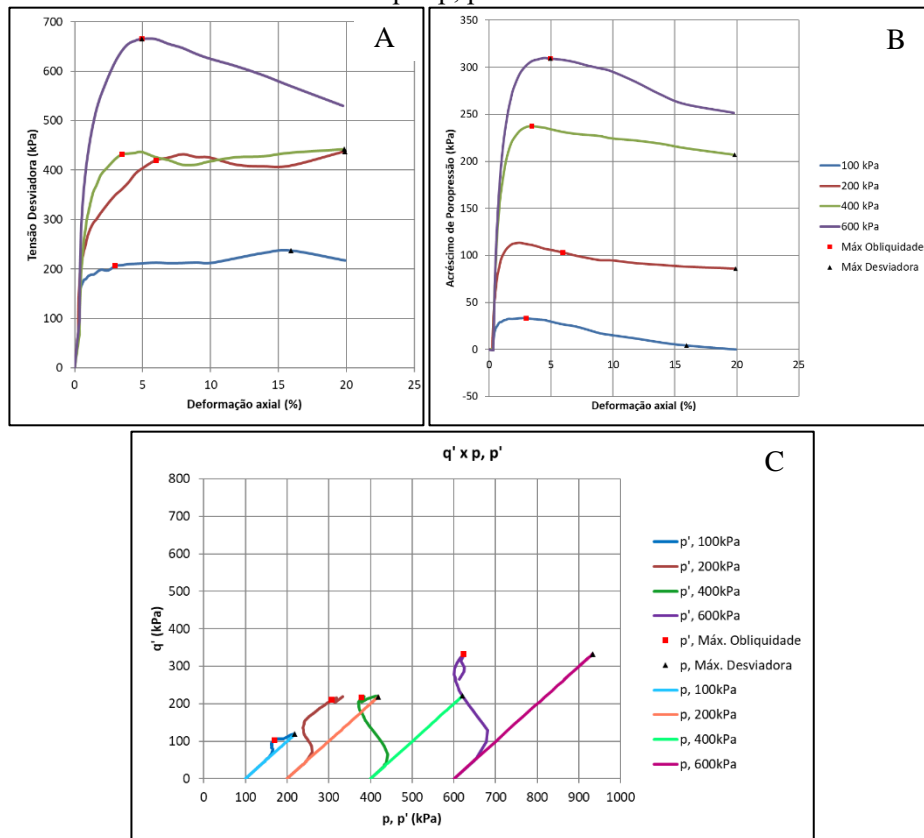


Figura 5. (A) Curva Tensão-deformação; (B) Acréscimo de poropressão x deformação; (C) trajetória de tensões  $q'$  x  $p$ ,  $p'$  - Amostra 03



### 3 CONCLUSÃO

O solo residual maduro em estudo apresenta comportamento contrátil quando observado os resultados externados pelo CPTu. No entanto, a identificação do comportamento contrátil não é suficiente para classificá-lo como susceptível a liquefação. Dessa forma, é importante a associação à outros ensaios, como os ensaios de caracterização e triaxiais, onde seja possível identificar, ou não, a susceptibilidade do material a condição não drenada residual.

Conforme ensaios de caracterização, adotando o critério definido por Perlea et al. 1999, o SRM apresenta não ser um solo suscetível à liquefação por apresentar fração de finos ( $< 0,005 \text{ mm}$ )  $> 20\%$  e índice de plasticidade ( $IP \geq 13\%$ ). Sendo assim, os resultados indicaram que o SRM não é susceptível à liquefação, com exceção da amostra 02. Ainda de acordo com Perlea et al. 1999, pelo gráfico de correlação do limite de liquidez (LL) com a umidade natural do solo para verificação das condições de saturação na susceptibilidade à liquefação, plotando os resultados dos ensaios obtidos, voltando a confirmar a não susceptibilidade à liquefação, novamente com exceção da amostra 02.

O comportamento tensão deformação e as trajetória das tensões totais e efetivas dos ensaios triaxiais mostraram que o rejeito para baixo nível de tensão apresenta comportamento majoritariamente dilatante. Ainda, não foi identificado, por meio da curva de tensão-deformação, queda da resistência não drenada de pico para resistência não drenada residual (*strain-softening*), observando estabilização da curva após ruptura. No que tange à análise das trajetórias de tensões totais e efetivas, as trajetórias efetivas estão voltadas para direita das trajetórias totais, reiterando a dilatância do material para baixos níveis de tensão. Em contrapartida, para o nível de tensão de 400 kPa e 600 kPa, apresenta trajetória efetiva voltada para esquerda da trajetória total, comportamento esse característico de materiais contráteis. Para 600 kPa de nível de tensões, o material apresenta comportamento *strain-softening*, com amolecimento do material após atingir a resistência de pico. Dessa forma, é importante que se avalie o nível de tensão e deformação que ocorrerá a ruptura desse material, bem como as condições *in situ* que estão submetidos, para assim determinar como deverá ser considerado seu comportamento.

De forma geral, é importante a avaliação conjunta de ensaios de campo com ensaios de laboratório, bem como caracterização geral, para determinação do comportamento do material. Apenas a identificação da contratibilidade de um material não é suficiente para classificação deste como susceptível à liquefação.

### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEEN, K & JEFFERIES, M.G., CROOKS, J.H.A., and ROTHENBURG, L. (1987). “The cone penetration test in sands: part II, general inference of state.” *Geotechnique* 37(3), 285-299.
- CASAGRANDE, A. (1936). “The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance,” *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics*, Harvard, Vol. 3.
- CASTRO, G. & POULOS, S.J. (1997). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103(GT6), 501-516.
- FEAR, C.E. & ROBERTSON, P.K. (1995). Estimating the undrained strength of sand: a theoretical framework. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, p. 859-870.
- ISHIHARA, K. TATSUOKA, F, AND YASUDA, S (1975). “Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses” *Soils and Foundations*, 15 p. 29-44.
- JEFFERIES, M.G & BEEN, K. (2016). *Soil liquefaction: a critical state approach*, 2nd edition · Volume 75, article number 1014.
- OLSON, S. M. (2009). Strength ratio approach for liquefaction analysis of tailings dams. In: *Proceedings of the 57th Annual Geotechnical Engineering Conference*. Minneapolis, Minnesota, USA.
- PERLEA, V.G, KOESTER, J.P. AND PRAKASH, S. (1999). “How liquefiable are Cohesive Soils?” Proc. *Second Int Conf on Earthquake Geotechnical Engg.*, Lisbon, Portugal, Vol. 2, 611-618.
- POULOS, S.J. (1981) The Steady State of Deformation. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 17, 553-562.

- ROBERTSON, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian geotechnical journal*, v. 46, n. 11, p. 1337-1355, 2009.
- ROBERTSON, P. K. (2016). *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - an update*, NRC Research Press.