

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/595

Avaliação da condição não drenada liquefeita em rejeitos de mineração

Anderson Nascimento Milagres

Eng. Geotécnico, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, anderson.nascimento@fonntesgeotecnica.com

Gladys Hurtado Aquino

Eng. Geotécnica, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, gladys.hurtado@fonntesgeotecnica.com

Fernanda Sasdelli Figueiredo Sales

Eng. Geotécnica, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, fernanda.figueiredo@fonntesgeotecnica.com

Raphael Zanotti do Carmo

Eng. Geotécnico, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, raphael.carmo@fonntesgeotecnica.com

Michel Moreira Morandini Fontes

Eng. Geotécnico, Fonntes Geotécnia, 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 de pressões intersticiais. 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 drenada de pico para uma resistência não drenada liquefeita ou residual. Quanto mais contrátil o solo, maior será seu potencial para perda dessa resistência. De acordo com Robertson (2010), 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 para comprovação do seu comportamento. Nesse contexto, o artigo se propõe a avaliar a condição não drenada, em especial a susceptibilidade à liquefação, de um rejeito de mineração, por meio sondagens CPTu associado à ensaios triaxiais não drenados CIU.

PALAVRAS CHAVES: contrátil, não drenada, CPTU, 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 pore pressure to dissipate. If the soil is saturated and its behavior is contractile, based on the recommendations given by prof. Olson (2009) and Robertson (2016), 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. According to Robertson (2010), 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 to prove their behavior. In this context, the article proposes to evaluate the undrained condition, in particular the susceptibility to liquefaction, of a mining tailing, using CPTu surveys associated with undrained CIU triaxial tests.

KEYWORDS: contractive, undrained, CPTU, triaxial.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da condição não drenada do rejeito foi 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 e triaxiais realizados. 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 e 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 de baixa densificação. Contudo, como sinalizado pelos dois autores, Olson e Robertson, solos com comportamento argiloso 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 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 das sondagens CPTu com os resultados externados por ensaios triaxiais não drenados CIU, uma vez que, por meio da avaliação da curva tensão – deformação e das trajetórias de tensão efetiva é possível identificar a susceptibilidade, ou não, de um material, sendo alvo deste estudo o rejeito de mineração.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Avaliação da condição não drenada por meio de ensaios CPTu

Para avaliação do material do rejeito foram utilizados os ensaios CPTu, com base na aplicação das envoltórias propostas por Fear & Robertson (1995), conforme proposto por Olson (2009). A metodologia de Olson (2009) estabelece novos limites em relação às formulações de Fear & Robertson (1995), baseados na compressibilidade de materiais não coesivos, estabelecendo que materiais mais resistentes têm menor susceptibilidade à perda de resistência quando não drenado, se comparados com materiais mais contráteis para uma mesma tensão efetiva e valor de NSPT/qc1. Essa definição de maior ou menor compressibilidade é estabelecida como a inclinação da linha de estado crítico do material, avaliada em gráficos de índice de vazios $x \log$ na base 10 de tensões principais efetivas. Logo, está diretamente relacionada com a variação de índice de vazios, denotando melhor a característica contrátil/dilatante do material.

Ainda, os ensaios CPTu foram avaliados também pelo método proposto por Robertson (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 arenoso, transicional e argiloso. Em geral os materiais com comportamento arenoso não apresentam plasticidade, e podem ter comportamento não drenado em função da velocidade de aplicação do carregamento e do nível de tensões. De acordo com Robertson, materiais que apresentam comportamento argiloso tendem a dissipar poropressão mais lentamente sob condições não drenadas, quando comparado aos materiais de comportamento arenoso, ou seja, sua tensão efetiva sobre efeito de carregamento cíclico não chega a zero. Já os materiais transicionais são aqueles que podem apresentar comportamento variando entre o grupo arenoso e argiloso e é típico de materiais finos de baixa plasticidade, como siltes. Para estes últimos materiais

quando saturados, o recomendado por Robertson é, após definir o comportamento contrátil, avaliar a sua resistência não drenada pelas duas formulações, de areia e argila, e adotar a mais conservadora.

As Figura 1 e Figura 2 apresentam os resultados gráficos para avaliação da suscetibilidade à perda de resistência quando submetido a carregamento não drenado utilizando ensaios CPTu realizados em uma camada íntegra em rejeitos de uma estrutura pelas metodologias de Olson (2009) e Robertson (2016) respectivamente.

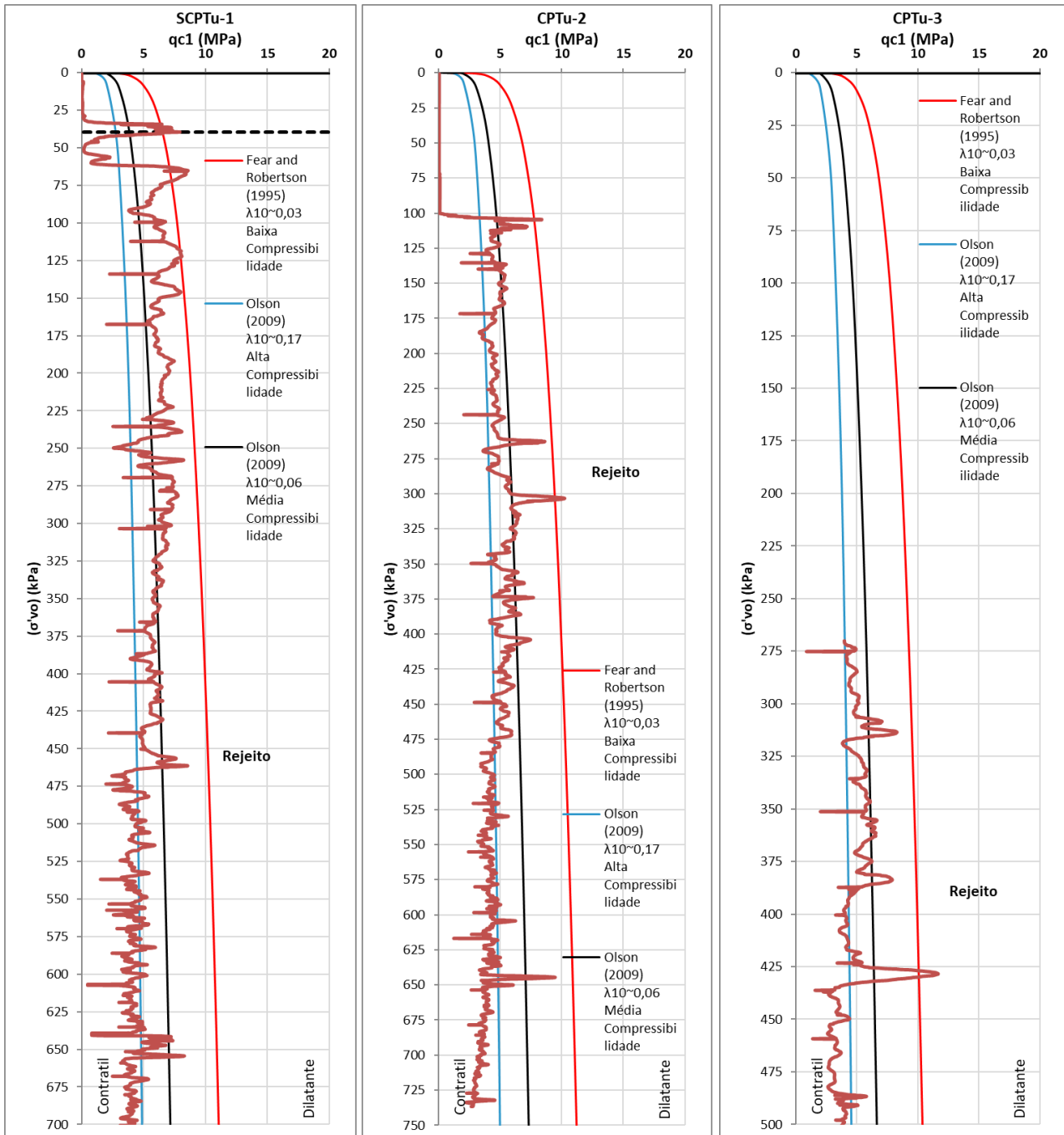


Figura 1. Avaliação da suscetibilidade à perda de resistência quando submetido a carregamento não drenado - Correlação com ensaios CPTu – Metodologia de Olson (2009)

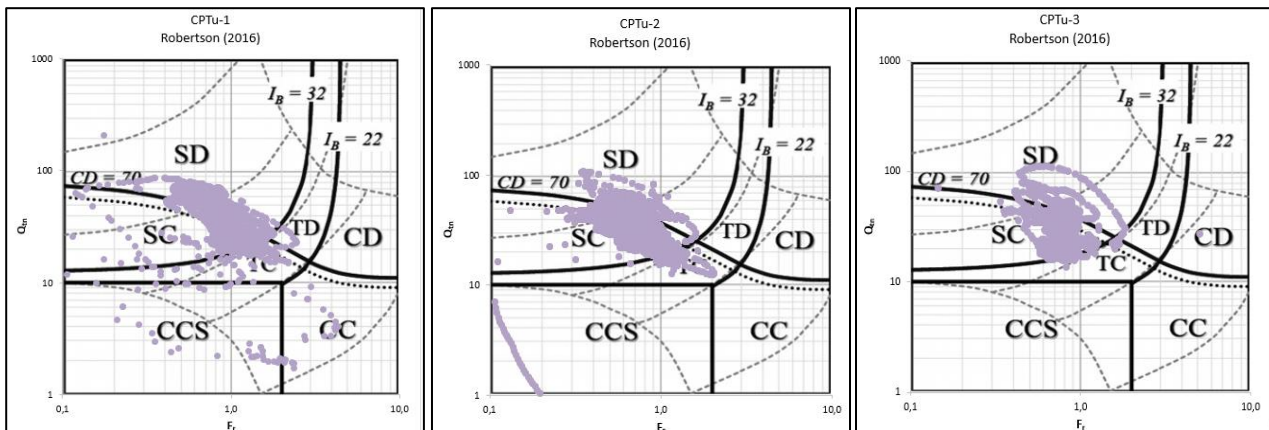


Figura 2. Avaliação da suscetibilidade à perda de resistência quando submetido a carregamento não drenado - Correlação com ensaios CPTu – Metodologia de Robertson (2016)

Na avaliação dos CPTu's apresentados, considerando a curva para materiais de baixa compressibilidade pela metodologia de Olson (2009), observa-se que o rejeito em estudo apresenta comportamento principalmente contrátil, mostrando queda da resistência de ponta, à medida que o nível de tensão aumenta, externando contratibilidade ainda maior. Ainda, o comportamento contrátil do rejeito reitera, quando observado o gráfico de Robertson (2016), ocupando, majotitariamente, a zona de comportamento arenoso contrátil.

2.2 Avaliação da condição não drenada por meio de ensaios triaxiais CIU

A avaliação do comportamento contrátil ou dilatante do rejeito 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, rejeito com comportamento dilatante apresenta poropressão negativa para determinado nível de tensões; sendo assim, o material deverá ser modelado com parâmetros de resistência efetiva 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.

A Figura 3 apresenta a curva de tensão-deformação que caracteriza um material com comportamento não drenado, onde é possível observar a passagem da resistência não drenada de pico para a residual. A resistência residual é atingida quando o solo passa para o seu estado crítico, as poropressões não são dissipadas, em consequência não há mais variação volumétrica. O amolecimento do material após atingir a resistência de pico classifica o comportamento *strain-softening*.

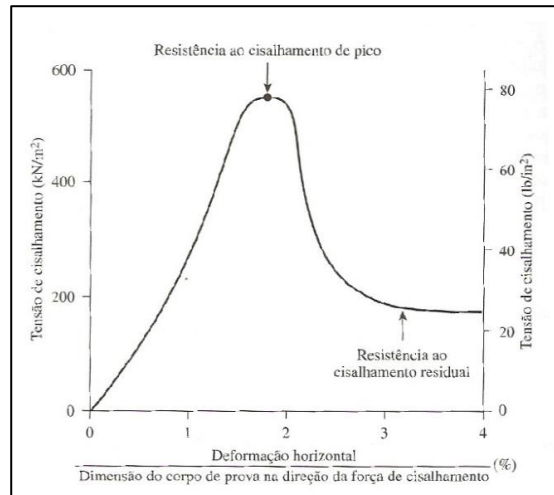


Figura 3. Curva tensão-deformação característica de solos com comportamento não drenado (DAS, 2006).

De acordo com o comportamento observado nas Figura 4 e Figura 5 das trajetórias de tensões p' - q e p - q , para as duas amostras de rejeito coletadas próximos dos pontos onde foram realizados os ensaios CPTu e em diferentes profundidades, o rejeito demonstrou ser dilatante, gerando baixos excessos de poropressão e conseguindo dissipá-los após cisalhamento. Cabe mencionar que para tensão confinante de 1000 kPa, o material apresenta maiores acréscimo de poropressão mostrando-se sempre positiva ao longo do ensaio, a diferença dos outros corpos de prova ensaiados a menores tensões de confinamento onde a poropressão vira negativa próximo do ponto de ruptura (B). Ainda, é possível observar pela curva de tensão-deformação (A), que para todos os níveis de tensão confinante as amostras apontam um comportamento *strain-hardening*, sem amolecimento após a ruptura.

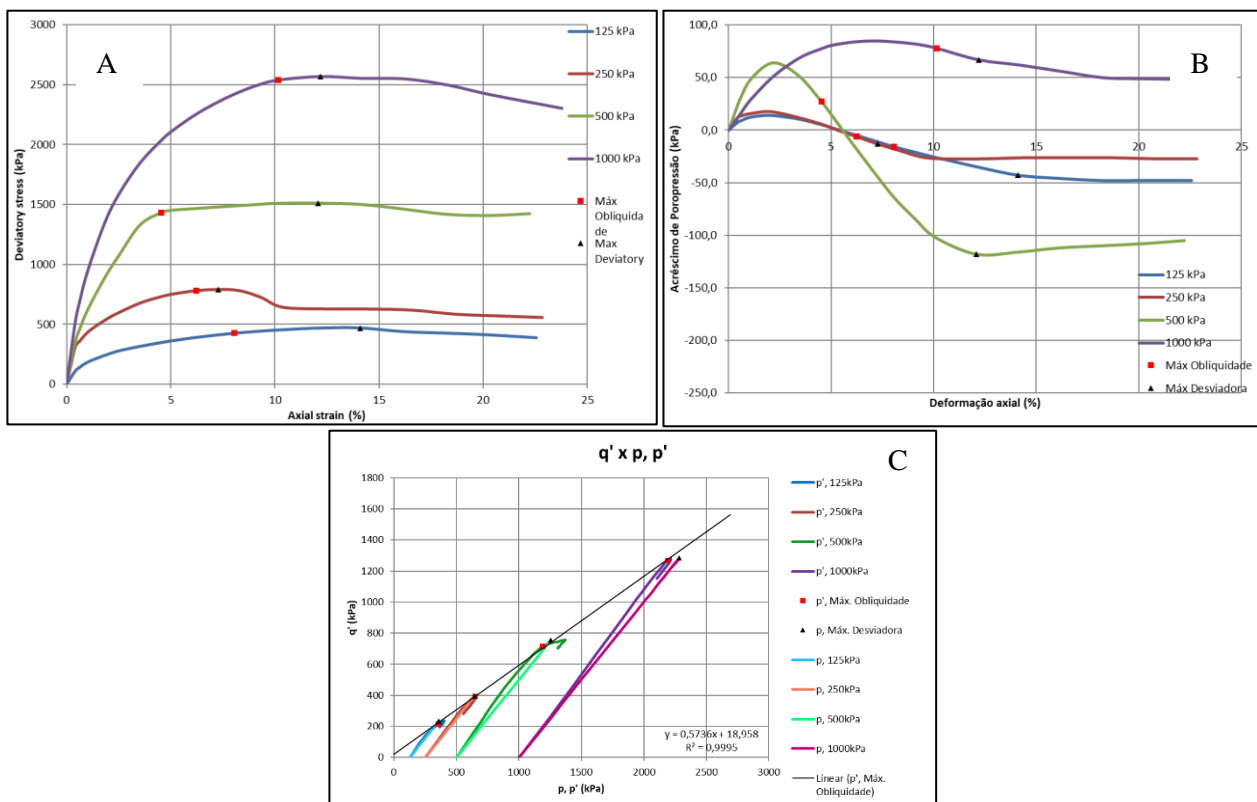


Figura 4. (A) Curva Tensão-deformação; (B) Acréscimo de poropressão x deformação; (C) trajetória de tensões q' x p, p' do rejeito – Amostra 1.

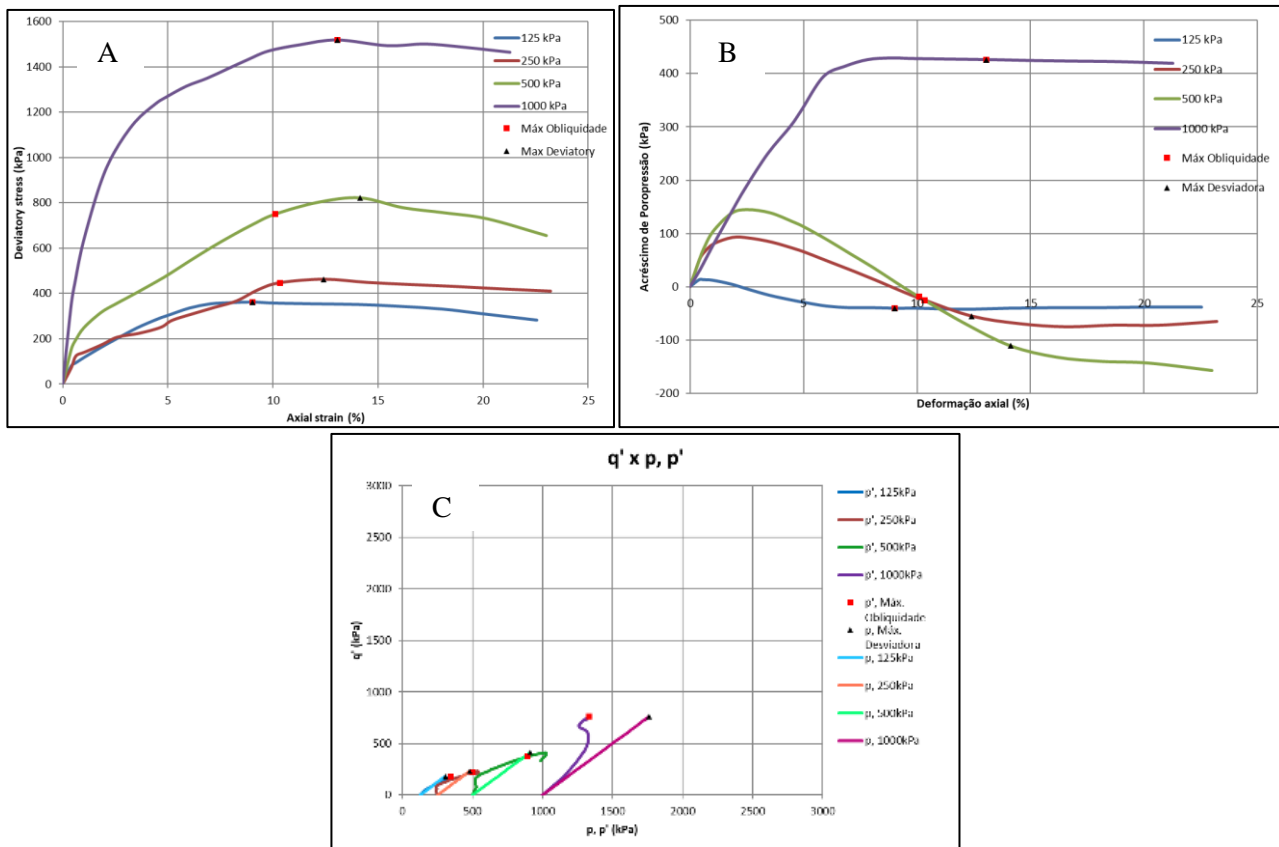


Figura 5. (A) Curva Tensão-deformação; (B) Acréscimo de poropressão x deformação; (C) trajetória de tensões q' x p , p' do rejeito – Amostra 2.

3 CONCLUSÃO

O rejeito em estudo apresenta comportamento contrátil quando observado os resultados externados pelas sondagens CPTu, onde também é possível observar que quanto maior o nível de tensão, menor é a resistência de ponta e maior a contratibilidade do solo. No entanto, a identificação do comportamento contrátil do rejeito não é suficiente para classificá-lo como susceptível a liquefação. Dessa forma, é importante a associação à outros ensaios, como os triaxiais, onde seja possível identificar, ou não, a susceptibilidade do material a condição não drenada residual.

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*) para deformações de até 20%, observando estabilização da curva após ruptura. No que tange à análise das trajetórias de tensões totais e efetivas, as trajetórias efetivas apesar de estarem levemente voltadas para esquerda das trajetórias totais, estas viram para o lado direito após ou próximo do ponto de ruptura, indicando a dissipação dos poucos acréscimos de poropressões positivas, reiterando a distância do rejeito.

Em contrapartida, para o nível de tensão de 1000 kPa, apesar de mostrar poropressão positiva durante todo o ensaio, estas são baixas quando se comparando com o nível de tensão a que foi submetida, apresentando ainda, dissipação para maiores deformações. Dessa forma, uma condição não drenada poderá existir para esses níveis de tensões, contudo, hesita-se que um fenômeno de liquefação possa acontecer.

Por fim, conclui-se que, para o rejeito estudado esse apresenta comportamento contrátil para determinada profundidade, aumentando a susceptibilidade à medida que o nível de tensão aumenta. No entanto, quando associado os ensaios CPTu's com os ensaios triaxiais não é identificado comportamento *strain-softening* do rejeito. Sendo assim, em modelagens numéricas em projetos geotécnicos apenas a consideração da resistência residual de pico do rejeito é suficiente para níveis de tensões elevadas.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAS, B. M., (2006). *Fundamentos da Engenharia Geotécnica*, Ed. Thomson Learning, 6ª edição, São Paulo, SP, Brasil.

FEAR, C.E. & ROBERTSON, P.K (1995). Estimating the undrained strength of sand: a theoretical framework. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 859-870.

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.

ROBERTSON, P. K. (2009) Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian geotechnical journal*, v. 46, n. 11, p. 1337-1355.

ROBERTSON, P. K. (2010) Avaliação da liquefação de fluxo e resistência liquefeita usando o teste de penetração do cone. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 136, n. 6, pág. 842-853.

ROBERTSON, P. K. (2016) *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - an update*, NRC Research Press, Julho.