

Análise experimental do comportamento térmico de argilas moles com variação da velocidade de cisalhamento

Priscila Pessanha Abreu

Mestranda, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ- Brasil.

E-mail: priscila.pa@yahoo.com

Fernando Saboya Jr

Professor, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ- Brasil.

E-mail: saboya@uenf.br

Sérgio Tibana

Professor, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ- Brasil. tibana@uenf.br

RESUMO: A influência da velocidade de cisalhamento na resistência não drenada de solos argilosos é fundamental para compreender o comportamento desses materiais em situações extremas. Devido à sua composição fina e alta plasticidade, esses solos manifestam um comportamento viscoso durante a deformação cisalhante. Esse fenômeno permite estudar o comportamento da interação solo x estrutura em cenários onde a velocidade de cisalhamento é parte importante do problema. Esta pesquisa visa contribuir com estudos para indicar solução de melhoria de resposta mecânica de ancoragens tipo estaca torpedo e assim contribuir para redução do excesso de linhas de ancoragem de plataformas de petróleo, na região marinha explorada. O estudo foi realizado por meio de ensaios triaxiais em temperatura ambiente e em condições não isotérmicas, não drenadas com variação de velocidade de cisalhamento afim identificar a componente viscosa da resistência não drenada. A temperatura foi usada como fator de modificação da viscosidade e assim evidenciar o mecanismo envolvido no comportamento. Os resultados mostraram a grande influência da parcela viscosa na resistência não drenada e na deformação na ruptura..

PALAVRAS-CHAVE: Taxa de Cisalhamento. Fundações Offshore, Viscosidade, Triaxial Térmico

ABSTRACT: The influence of shear rate on the undrained strength of clayey soils is fundamental for understanding the behavior of these materials in extreme situations. Due to their fine composition and high plasticity, these soils exhibit viscous behavior during shear deformation. This phenomenon allows studying the interaction behavior of soil and structure in scenarios where shear rate is a significant part of the problem. This research aims to contribute to studies indicating solutions for improving the mechanical response of torpedo pile anchors and thus reducing the excess of mooring lines of offshore oil platforms in the explored marine region. The study was conducted through triaxial tests at room temperature and under non-isothermal, undrained conditions with varying shear rates to identify the viscous component of undrained strength. Temperature was used as a modifier of viscosity to highlight the mechanism involved in the behavior. The results demonstrated the significant influence of the viscous component on undrained strength and deformation at failure.

KEYWORDS: Shear Rate, Offshore Foundation, Viscosity, Triaxial Test.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, dentre os principais sistemas de ancoragem para as plataformas de exploração de petróleo incluem-se o sistema taut-leg e o sistema por catenária. As ancoragens tipo “*taut-leg*” utilizam ancoras de arraste tipo VLA, estacas de sucção, estacas torpedo entre outras. Essas ancoragens são, em geral, conectadas por cabos inclinados, proporcionando resistência aos esforços horizontais e verticais. A Catenária é uma ancoragem convencional fixada no solo por uma âncora permanente, resistindo a esforços majoritariamente

horizontais. As ancoragens em águas profundas, acima de 2000 metros quando são do tipo catenária, causam grandes congestionamentos na região de exploração em razão da quantidade de linhas necessárias à ancoragem da estrutura. Este inconveniente leva a necessidade de se buscar condições que propiciem maior verticalização das linhas, tendendo a um sistema tipo “*taut-leg*”. No entanto, como, em geral, as argilas marinhas brasileiras não possuem resposta mecânica suficiente para uso de ancoragens verticalizadas, uma das alternativas reside na melhoria estrutural do conjunto âncora x solo. Uma das técnicas estudadas para este fim, é proporcional um adensamento adicional no entorno da âncora por meio de incrementos de temperatura no local. Para desvendar o mecanismo envolvido no processo, é fundamental estudar a componente viscosa da resistência ao cisalhamento não drenado do solo marinho, uma vez que a temperatura local é de cerca de 4°C e a água apresenta alta viscosidade. Investigando-se a influência da velocidade de cisalhamento na resistência do solo sob várias temperaturas busca-se entender seu comportamento sob diferentes velocidades de cisalhamento onde a viscosidade se mostra relevante. A metodologia inclui ensaios triaxiais térmicos com quatro incrementos de velocidades e três temperaturas: 24°C, 40°C e 55°C. Os resultados visam comparar a resistência não drenada, a resistência viscosa e a compressibilidade do solo argiloso diante dos incrementos de velocidades de cisalhamento sob variação de temperatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comportamento termomecânico de solos moles

Uma das consequências do aquecimento da argila é o sugimento do excesso de poropressão, que pode ocorrer quando o solo é exposto às condições não drenadas. Alguns autores verificaram este fenômeno ao submeter a argila a variações de temperatura. Campanella e Mitchell (1968) observaram que quando um solo saturado em condições normalmente adensadas é exposto a um aumento de temperatura, pode ocorrer uma poropressão termicamente induzida. Isso se dá devido à diferença de expansão relativa entre a água e o esqueleto sólido do solo, resultando em uma redução da tensão efetiva, especialmente em solos de baixa permeabilidade.

Esrig (1969), Houhou et. al.(2021) e outros explicam que o aumento da temperatura em solos moles resulta em um aumento na distância entre suas partículas e uma redução na espessura de sua camada dupla.

Portanto, no aquecimento não drenado, alguns autores perceberam um aumento na expansão da água nos poros, ao contrário do aquecimento drenado, o que causa naturalmente uma diminuição no índice de vazios após dissipação. (Kuntiwattanakul et. al. 1995, apud Campanella e Mitchell, 1968; Baldi et al., 1988).

A definição de viscosidade para solos argilosos se dá pela observação em que as partículas de argila estão revestidas por uma camada de água adsorvida que se encontra firmemente aderida aos grãos. À medida que se afasta da superfície da partícula, a viscosidade da água adsorvida diminui até que essa água se torne livre a partir de uma determinada distância.

Diante disso, os solos argilosos, devido à sua composição fina e elevada plasticidade, exibem comportamento viscoso durante processos de deformação. A resistência viscosa desses solos é fortemente influenciada pela taxa na qual são submetidos a esforços de cisalhamento. À medida que a velocidade de cisalhamento aumenta, observa-se uma variação significativa na sua resistência viscosa. Esse comportamento está associado ao rearranjo das partículas do solo durante o processo de deformação, segundo o modelo definido por Therzaghi (1941), onde a resistência do solo corresponde à soma de uma parcela de atrito e uma parcela viscosa. (Taylor, 1948; Martins, 1992).

Martins et al. (2021), demonstraram este modelo em seus estudos e evidenciaram no diagrama $p' \times q$ o caminho trajetória de tensão efetiva onde destaca-se salto de viscosidade que acompanha o caminho de tensões totais (parcela viscosa) até que esta parcela seja vencida.

Martins et al. (2021), ainda enfatizaram em seu estudo a seguinte afirmativa sobre a velocidade de cisalhamento: "A resistência não-drenada, além da parcela de atrito, é composta de uma parcela viscosa dependente da velocidade de deformação. Quanto maior a velocidade, maior a resistência não-drenada (...)"

Godoy (2022) também estudou os efeitos da viscosidade no comportamento geomecânico e no seu estudo menciona: "(...) no início da etapa de cisalhamento, caso a prensa seja ligada com certa velocidade, ocorrerá um salto inicial da CTE em direção a CTT, devido a mobilização instantânea da viscosidade (...)" essa afirmação explica o modelo disponibilizado por Martins et al. (2021).

Mecca (2004), ao estudar provas de carga, tipo statnamic, de alta velocidade em estacas, realizou ensaios com várias velocidades em argila Speswhite e observou que a maior velocidade apresentou maior resistência não drenada e menor desenvolvimento de poropressão.

Observa-se diante do resultado do Mecca (2004), que maiores velocidades de cisalhamento apresentaram maiores resistências não drenadas e que com o acréscimo de velocidade nos ensaios, os caminhos de tensão efetiva e totais coincidiam até um certo ponto (salto viscoso) seguindo-se a retomada da trajetória convencional para solos normalmente adensados, com geração de poropressão positiva.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo aqui presente, utilizou -se uma argila caulim branca moldada e adensada a 100 kPa por 24 horas em um consolidômetro. Após adquirir consistência, a amostra foi levada à câmara triaxial para ser ensaiada convencionalmente em ensaios tipo CIU. Os ensaios iniciais foram executados à temperatura ambiente à 100, 200 e 400 kPa de tensão hidrostática à temperatura ambiente de 23,5°C. Seguindo a bateria dos ensaios convencionais, executaram-se os ensaios térmicos com adensamento mecânico a 200 kPa e adensamento térmico nas temperaturas de 44° e 55°C, mantendo-se constante a tensão hidrostática de 200 kPa. Após esta etapa, todas as amostras adensadas a 200 kPa foram cisalhadas com velocidades de 0,02, 0,2, 2 e 20 mm/min de deformação axial, sob condições não drenadas. A Figura 1 mostra o esquema para os ensaios convencionais e térmicos:

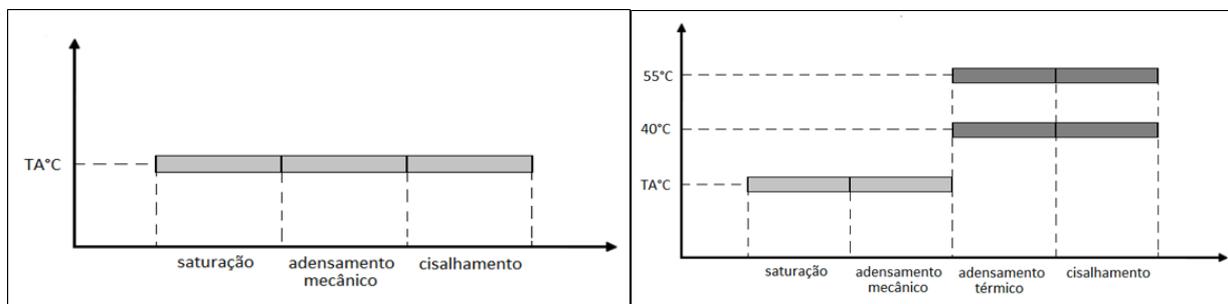


Figura 1. Diagrama do procedimento padrão para os ensaios triaxiais convencionais tipo CIU: (a) temperatura ambiente (TA 23°C), e (b) ensaios térmicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os caminhos de tensão efetiva (CTE) para as amostras ensaiadas à temperatura ambiente e cisalhadas a diferentes velocidades podem ser vistas na Figura 2. Nas Figura 3 e 4 estão apresentados os caminhos de tensão efetiva dos ensaios executados em amostras com adensamento térmico adicional nas temperaturas de 40°C e 55°C respectivamente, e levadas à ruptura nas mesmas temperaturas de adensamento.

Observam-se nos resultados um acréscimo de resistência para cada incremento de velocidade de cisalhamento para todas as temperaturas e também um aumento no salto viscoso com a velocidade. No entanto, a envoltória não parece ser afetada pelo processo do adensamento térmico nem pela velocidade de cisalhamento, mas a resposta do solo mostra-se susceptível à combinação da velocidade com a temperatura.

Ao analisar as deformações na resistência máxima, verificou-se uma diferença considerável entre os valores obtidos nas temperaturas ambiente (TA 23,5°C) e aqueles apresentados nos ensaios a 40°C e 55°C, independente da velocidade de cisalhamento (Figura 5).

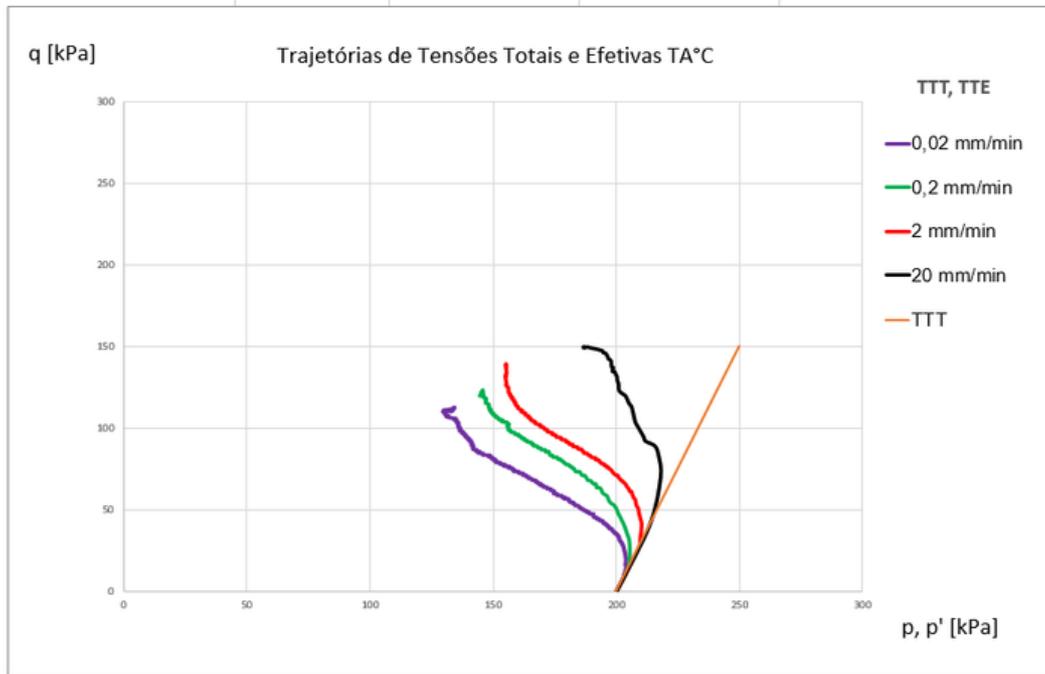


Figura 2. Caminho de tensões totais e efetivas para os ensaios na temperatura ambiente (TA 23,5°C) sob várias velocidades de cisalhamento.

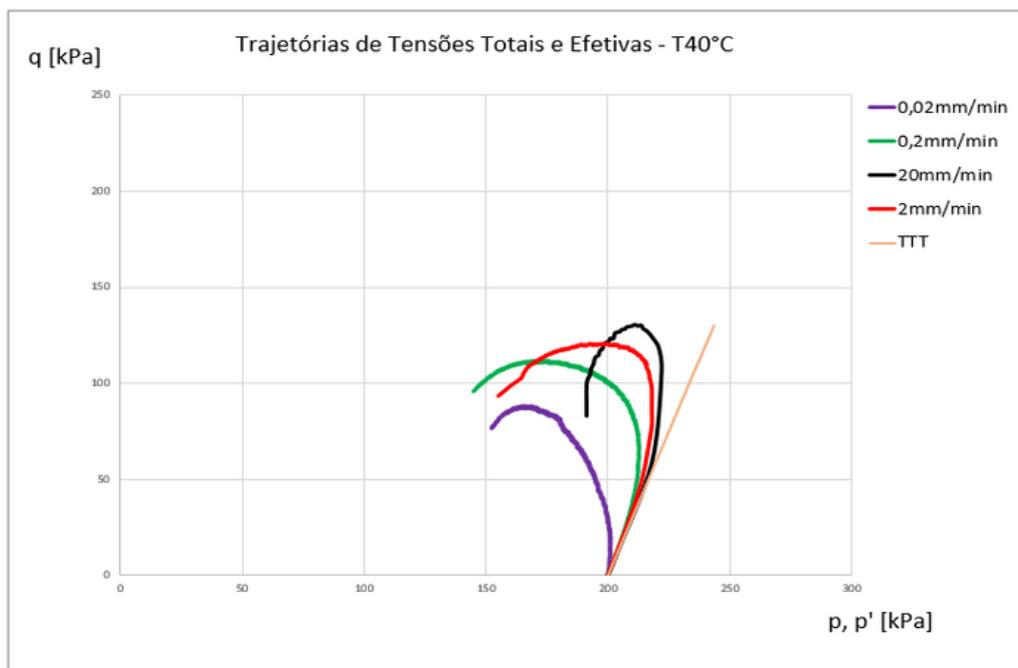


Figura 3. Caminho de tensões totais e efetivas para os ensaios adensados e levados à ruptura na temperatura de 40°C sob várias velocidades de cisalhamento.

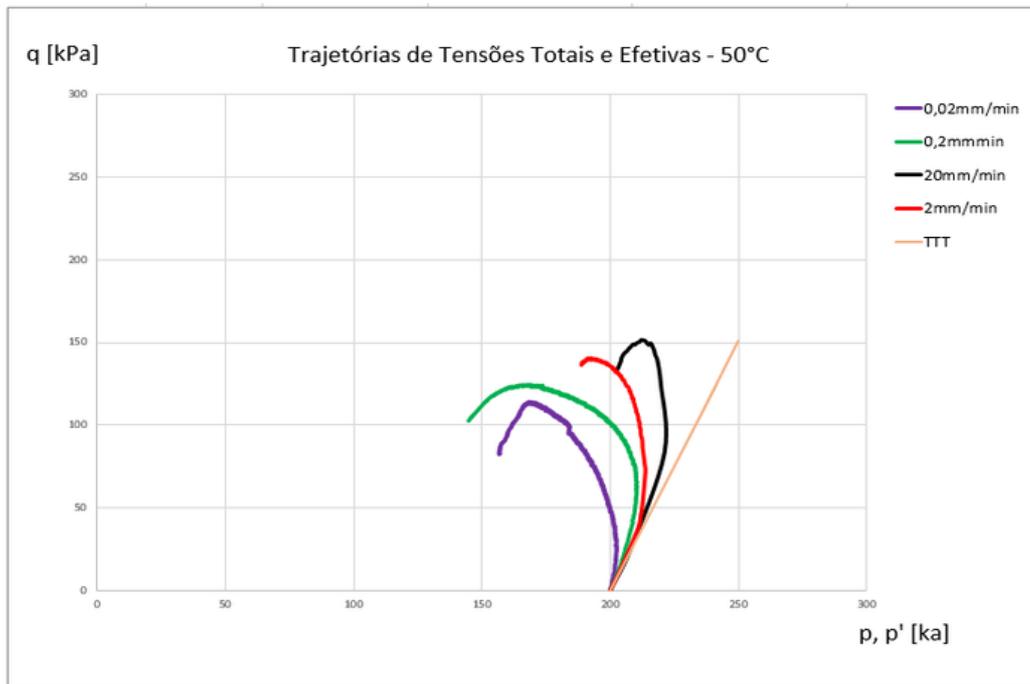


Figura 4. Caminho de tensões totais e efetivas para os ensaios adensados e levados à ruptura na temperatura de 55°C sob várias velocidades de cisalhamento.

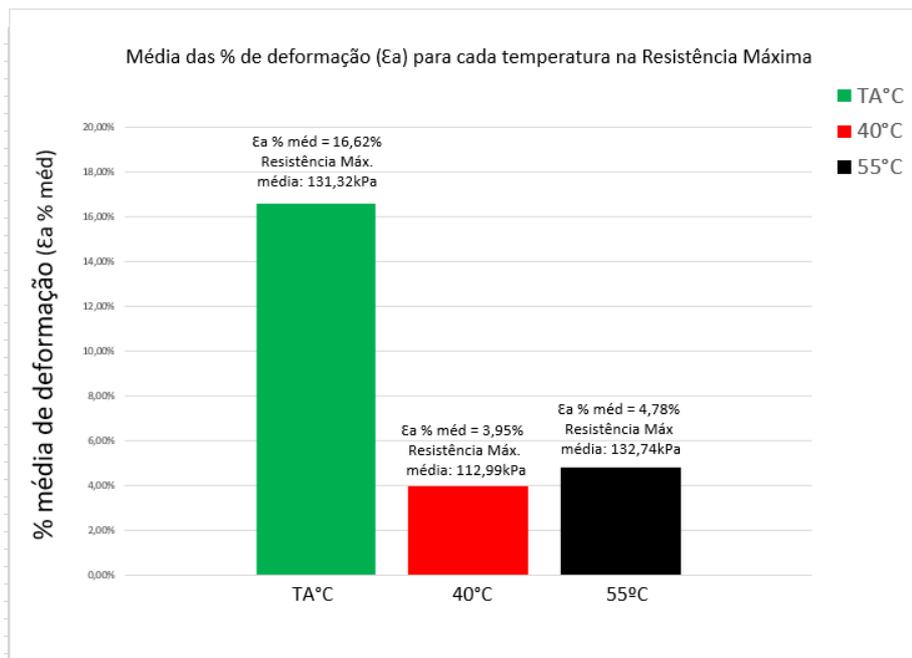


Figura 5. Porcentagem média de deformação axial na ruptura (ϵ_a) para cada velocidade de cisalhamento para cada temperatura na resistência máxima.

Nota-se se que na temperatura ambiente, para atingir o valor médio de resistência máxima, as amostras tiveram que se deformar axialmente, em média, 16,62%. Para amostras ensaiadas à temperatura de 55°C, as deformações axiais na ruptura foram da ordem de 4,78%. Nas amostras ensaiadas sob temperatura de 40°C, a deformação axial na ruptura foi de mesma ordem de grandeza das amostras cisalhadas a 55°C, aproximadamente 4%, independente da velocidade de cisalhamento.

Analisando os resultados em função das velocidades de cisalhamento (Figura 6), observou-se um

aumento de 11% na resistência não drenada para cada incremento de velocidade de cisalhamento, mantendo essa proporção para todas as temperaturas.

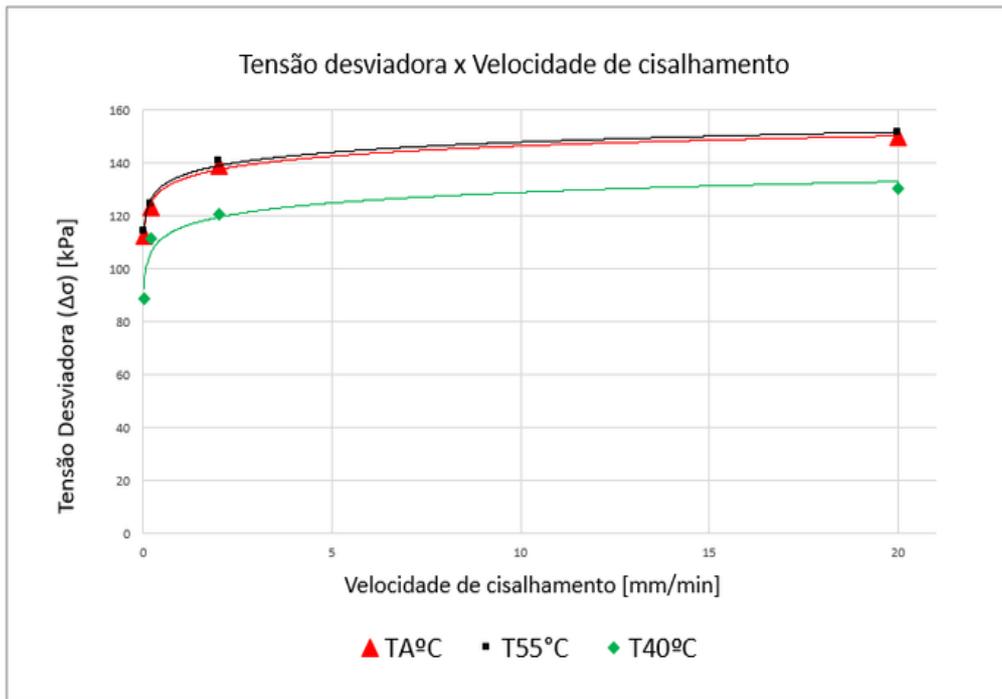


Figura 6. Comparação da resistência ao cisalhamento em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento.

Por outro lado, as resistências viscosas mostraram um decréscimo médio de 80% em relação aos ensaios na temperatura ambiente e nas temperaturas de 45° e 55°C, sendo proporcional para todas as velocidades de cisalhamento. Para cada incremento de velocidade de cisalhamento, houve um acréscimo da resistência viscosa para todas as temperaturas como mostra a Figura 7. Para as amostras ensaiadas nas temperaturas de 40°C e 55°C, há uma tendência de estabilização das resistências viscosas a partir da velocidade de 20mm/min. Esta tendência não é observada para os ensaios sob temperatura ambiente (23,5°C)

5 CONCLUSÃO

Para os ensaios na temperatura ambiente (TA) com variação de velocidade de cisalhamento, houve um acréscimo de resistência não drenada com incremento de velocidade de cisalhamento destacando-se a parcela viscosa. Para os ensaios nas temperaturas de 40° e 55°C houve um acréscimo de resistência não drenada com incremento de velocidade de cisalhamento para ambas, no entanto não se observa influência na envoltória de resistência.

Na temperatura ambiente para chegar ao valor médio de resistência máxima, as amostras se deformaram em média de 16,62% ao contrário das amostras rompidas aquecidas que apresentaram deformações axiais na ruptura da ordem de 4 a 5%, demonstrando claramente a influência da viscosidade na mobilização da resistência e na compressibilidade do material.

A resistência viscosa entre as temperaturas de 40°C e 55°C apresentou uma diminuição considerável referente a TA de 80%. Já para a variação de velocidade, há uma tendência de estabilização do salto viscoso a partir da velocidade de 20mm/min, o que não se observa para os ensaios executados na temperatura ambiente, onde a parcela viscosa ainda se mostra crescente com a velocidade de cisalhamento.

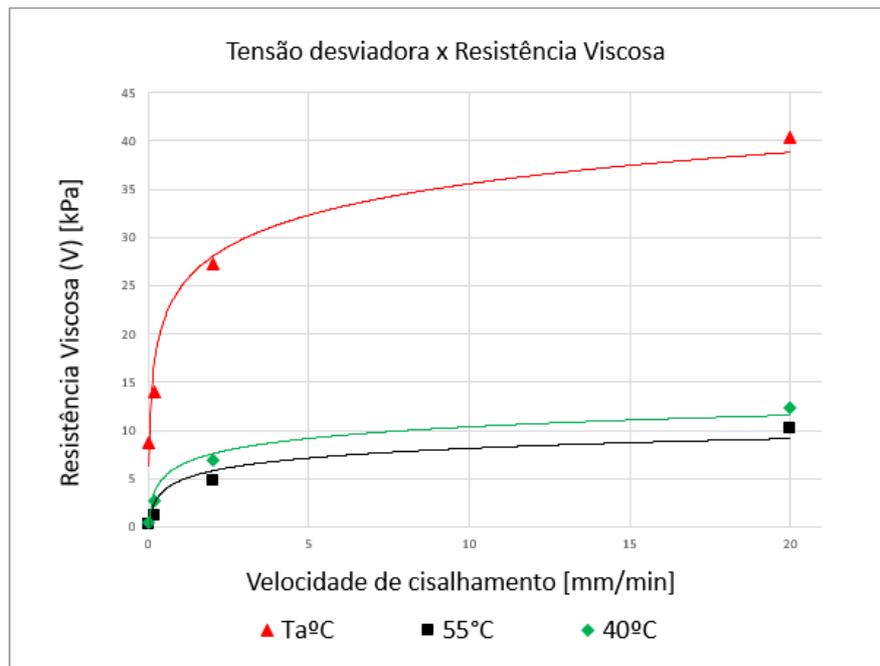


Figura7. Comparação da resistência viscosa em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuel-Naga, H. M.; Bergado, D. T.; Lim, B. F. Effect of Temperature on Shear Strength and Yielding Behavior of Soft Bangkok Clay. v. 47, n. 3, p. 423–436, 2007.
- Bai, B.; Guo, L.; Han, S. Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling. *Mechanics of Materials*, v. 75, p. 84–94, 2014.
- Baldi, G; Hueckel, T.; Pellegrini, R. “Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils.” *Canadian Geotechnical Journal*. 25, p. 807–825, 1988.
- Campanella, R.G.; Mitchell, J. K. Influence of temperature variations on soil behavior, 1968.
- Esrig, M. I. (1969). Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure. *Special Report*, (103), 23.
- Godoy, V. Efeito da Viscosidade no Comportamento Geomecânico de Solos offshore. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2022.
- Houhou, R.; Sutman, M.; Sadek, S.; Laloui L.; Microstructure Observations in Compacted Clays Subjected to Thermal Loading. *Engineering Geology*, p. 287, 2021.
- Kuntiwattanagul, P. et. al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay. *Soils and Foundation* 1995;35(1):147–62.
- Martins, I. et, al. Velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos. *Geotecnia* nº 152 – julho/julho/july 2021 – pp. 405-434. 2021 Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Martins, I.S.M. (1992) Fundamentos de um modelo de comportamento de solos argilosos saturados. Tese de doutorado COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro.
- Mecca, J. *Rate Effects of Rapid Loading In Clay Soils*. Department of Civil and Structural Engineering University of Shef field, March2004.
- Taylor, D.W. (1948) *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons., New York, 700p., pp. 208-405.
- Terzaghi, K. (1941) Undisturbed clay samples and undisturbed clays, *Contributions to soil Mechanics*, pp. 45-65. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* - July, 1941