

Influência da Temperatura no Comportamento Mecânico de um Solo Mole.

The Effect of Temperature in the Mechanical Behavior of a Soft Soil.

Luciana Andrade Peixoto Silva

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, luciana.silva@uva.br

Karl Igor Martins Guerra

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, karligor70@gmail.com

Leonel Dias de Araujo Mello

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, leomello.lm.94@gmail.com

Joao Hygor de Carli Ribeiro

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, joaoh1709@gmail.com

Michele Dal Toé Casagrande,

PUC- Rio, Rio de Janeiro, Brasil michele_casagrande@puc-rio.br

Resumo: Para que se possa ter uma melhor compreensão do comportamento termomecânico dos solos, novos métodos de ensaios foram criados para que caracterizações térmicas fossem possíveis. O entendimento do comportamento termomecânico também passa por tentativas de elaboração de modelos matemáticos que visam mapear e explicar leis constitutivas dos materiais dentro do campo termo-hidro-mecânico. Por maior que seja o desafio nas áreas citadas acima, tivemos nos últimos anos, avanços enormes e significativos.

Este trabalho tem como objetivo ressaltar a importância da temperatura nas propriedades físico-mecânicas do solo e como ela deve ser implantada nos cálculos de resistência mecânica. Foram extraídos parâmetros termodinâmicos como a condutividade térmica, o coeficiente de expansão térmica e emissividade de radiação térmica, difusividade térmica, entropia do material elástico, dissipação interna de energia, colocando em evidência a dependência térmica de alguns parâmetros do solo que não são constantes. As variações na taxa de deformação e a evolução do limite de escoamento da amostra também serão discutidos no presente trabalho, assim como a correlação entre termodinâmica e parâmetros geomecânicos.

PALAVRAS-CHAVE: Termomecânica, Termodinâmica, Solos Moles, Meio Poroso.

Abstract: For a better understanding of the thermomechanical behavior of soils, new tests and methods has been created for the thermal characterization to be possible. The understanding of the thermomechanical behavior is also made by the development of mathematical models that tries to map and explain the constitutive laws of materials inside the thermo-hydro-mechanical domain. Even though it's a enormous challenge, great advances had been made in the last years.

The aim of this work is to highlight the importance of the temperature on the physical and mechanical properties of soils and how they should be implanted into the very known mechanical strenght of materials calculations. Thermodynamical parameters has been extracted as thermal conductivity, thermal expansion coefficient, emissivity, thermal diffusivity, entropy and energy dissipation, putting in evidence the dependency of some soil parameters that are not constant. The variations on the strain rate and the evolution of the yield stress will also be discussed in this work and also the correlation in between some thermodynamical and geomechanical parameters.

Key words: Thermomechanics, Thermodynamics, Soft Soils, Porous Media.

1 INTRODUÇÃO

Estudos termomecânicos aplicados ao solo são utilizados para aplicações como depósitos de lixo nuclear (LALOUÏ 1994), armazenamento de calor (BURGER A., RECORDON E., BOVET D., COTTON L. & SAUGY B., 1985), estruturas geotérmicas (LALOUÏ 1999), extração de petróleo, zonas em torno de cabos de alta voltagem enterrados e outros fenômenos como mudanças cíclicas de temperatura devido ao clima que podem afetar estradas, fundações, entre outros. Devido a sua imensa importância, a termomecânica dos solos está se tornando uma das maiores questões na mecânica dos solos moderna.

Para que se possa ter uma melhor compreensão do comportamento termomecânico dos solos, novos métodos de ensaios foram criados para que caracterizações térmicas fossem possíveis. O entendimento do comportamento termomecânico também passa por tentativas de elaboração de modelos matemáticos que visam mapear e explicar leis constitutivas dos materiais dentro do campo termo-hidro-mecânico. Por maior que seja o desafio nas áreas citadas acima, tivemos nos últimos anos, avanços enormes e significativos. Alguns resultados fogem do senso comum e devem ser analisados criteriosamente, como o comportamento de contração de argilas sobre-adensadas quando submetidas a carregamentos térmicos, além de ter sua deformação irreversível durante o esfriamento, característica não presente na maioria dos materiais quando submetidos a altas temperaturas.

O solo fluminense, devido a grandes variações de temperatura durante o ano e até mesmo durante o dia, sofre carregamento térmico cíclico com amplitudes consideravelmente altas. Segundo estudos já realizados por engenheiros geotécnicos e de pavimentação, a camada de solo a 10cm do material de pavimentação, atinge temperaturas em média na ordem de 70°C durante o verão, podendo chegar a 90°C em dias extremos. Esse trabalho expõe alguns aspectos termomecânicos derivados de modelos matemáticos previamente propostos que correlacionam tensão-deformação-temperatura para um material qualquer, adaptando-se ao caso de materiais porosos. É válido lembrar que não é da ambição dos autores que este artigo seja o estado da arte no assunto e que somente nos propomos a apresentar alguns resultados baseados em teorias físicas já estabelecidas previamente.

2 TEORIA TERMOMECÂNICA DO MEIO POROSO.

2.1 Ligações Atômicas.

O solo saturado é um material composto de duas fases: a fase sólida referente ao esqueleto de grãos ou partículas adsorvidas pela água no caso das argilas, e a parte fluida que consiste normalmente em água livre estocada nos vazios do material. Quando um solo é aquecido, todos os seus componentes se dilatam. No caso específico de solos argilosos, a dilatação produz uma diminuição na tenacidade das camadas adsorvidas assim como uma mudança na distância entre as partículas de argila, ROBINET J.C., RAHBAOU A., PLAS F. & LEBON P. (1996) e FLEUREAU J.M (1979). Esse aumento da distância entre os grãos do material modifica o equilíbrio entre as forças atrativas de Van der Waals e as forças repulsivas eletrostáticas, o que resulta no comportamento térmico mais conhecido das argilas. Durante o resfriamento, ao contrário do que é observado para o aquecimento, nota-se um padrão linear de aumento volumétrico da amostra. O comportamento durante todo o ciclo aquecimento-resfriamento indica a irreversibilidade da deformação que indica a presença de um endurecimento térmico do material. Mesmo sem mudanças físicas na tensão efetiva, o que foi observado pode ser interpretado e qualificado como uma densificação do material que, para solos, chamamos esse processo de adensamento. A intensidade das partes reversíveis e irreversíveis depende do tipo de solo e de sua plasticidade. Por este motivo, foi realizada uma caracterização completa do solo plástico estudado.

A primeira lei da termodinâmica afirma que para uma quantidade de calor fornecida dQ , ou de trabalho mecânico dW em um sistema, a consequência é um aumento na energia interna dU , sendo então $dU = dW + dQ$. Para um processo irreversível, a segunda lei da termodinâmica nos permite afirmar que $dQ = TdS$, e nos dedicaremos apenas a aumentos de trabalho mecânico na forma $dW = f \cdot dx$. Combinando essas duas relações temos a seguinte equação:

$$f \cdot dx = dU - TdS$$

Então, se torna visível o fato de que ao realizarmos um trabalho mecânico em um material, produzimos um aumento da energia interna dU ou uma diminuição da entropia dS .

Para a maioria dos materiais, a quantidade de alongamento submetida à amostra tracionada por uma carga pequena e fixa é relativamente fácil de ser explicada pela força coesiva das ligações químicas a nível atômico, e permite que a dureza do material seja relacionada a arquitetura química do material em questão. Esta visão teoricamente simplista entra em contraste com a complexidade

mecânica de fenômenos como fraturas, que são por sua vez controladas por diversas combinações microscópicas assim como aspectos moleculares da estrutura interna do material e sua superfície. No caso de ligações iônicas, como o da argila, a lei eletrostática de atração de Coulomb pode ser

$$F_{atr} = \frac{Ce^2}{r^2}$$

usada para simples aproximações da dureza das ligações. Para íons de mesma carga, a força de atração pode ser escrita pela relação:

Em uma distribuição atômica cristalina, por exemplo, devemos multiplicar a carga elementar pelas “porções” de átomos para cada lattice, pois cada átomo é influenciado por seus vizinhos. Essa parcela é constante para cada material e pode ser denominada A.

A energia associada a atração de Coulomb é obtida pela integração da força em relação à distância, o que nos mostra a energia das ligações varia inversamente com o aumento da distância, pela equação:

$$U_{atr} = \int F_{atr}.dr = \frac{-Ce^2}{r}$$

A distâncias menores, a força atrativa eletrostática é equilibrada por mútuas forças de repulsão que aparecem devido a interação entre camadas de valência da eletrosfera que se interceptam; esta força varia de maneira mais intensa com a distância do que a força de repulsão e a energia relativa a esta força pode ser escrita da seguinte maneira:

$$U_{rep} = \frac{B}{r^n}$$

Onde n é determinado experimentalmente para cada material. Podemos então concluir que a energia total devido as ligações químicas em um material é dada pela equação:

$$U = \frac{-ACe^2}{r} + \frac{B}{r^n}$$

O sistema descrito acima possui uma posição de menor energia, dada pelas coordenadas onde a tangente é nula. Ao derivarmos a função em relação a distância entre os átomos obtemos a seguinte relação:

$$(f)_{r=r_0} = \left(\frac{dU}{dr}\right)_{r=r_0} = \left(\frac{ACe^2}{r^2} - \frac{nB}{r^{n+1}}\right)_{r=r_0} = 0$$

Onde deduzimos que:

$$r_0 = \left(\frac{nB}{ACe^2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Essa distância determina o menor nível de energia entre as partículas e de maior estabilidade do material. Porém, durante a aplicação de esforços mecânicos, aproximamos ou afastamos os átomos uns dos outros fazendo variar a energia interna do material. Entretanto, o presente trabalho se propõe a explicar a importância da parcela da entropia durante carregamentos termomecânicos, e reforçar a ideia de que a energia fornecida durante um carregamento não é absorvida totalmente pela parcela das ligações atômicas. A teoria termodinâmica mostra que o material sempre tende a buscar seu estado de maior entropia, e que para materiais granulares porosos, esse estado varia com a reorganização da matriz sólida.

Mais à frente entraremos em detalhes do comportamento de um solo saturado onde não ocorre drenagem do fluido durante o carregamento. Quando a água livre não pode ser drenada da amostra, o comportamento do solo submetido a carregamentos termomecânicos é fortemente afetado. O aumento da temperatura resulta em um significativo aumento da poropressão. Em um quadro de variação uniforme e constante da tensão total, o aumento da poropressão induz a ruptura da amostra. Resultados experimentais em dois tipos de argilas citado por HUECKEL T. & PELLEGRINI R. (1989), mostrou que argilas sob condições não drenadas rompiam em temperaturas entre 70 e 90°C.

2.2 Ação Termodinâmica no Meio Poroso.

A visão termodinâmica para descrição do comportamento de sólidos deformáveis foi amplamente

estimulada nos anos 1950, quando Biot (1956) publicou vários trabalhos mostrando como a combinação da termodinâmica de processos irreversíveis e teorias clássicas da mecânica dos materiais, proveria a base da teoria termomecânica da viscoelasticidade para deformações micro, consideradas infinitesimais. O comportamento termomecânico do solo inclui uma parcela de processo dissipativo; a plasticidade. As considerações termodinâmicas feitas anteriormente para este tipo de análise demandam a inclusão de leis complementares relativas a essas irreversibilidades. Essas leis podem ser formuladas em respeito ao princípio da indiferença do material e ao caráter positivo da função dissipação, HALPHEN B. & NGUYEN Q.S. (1975). A segunda lei da termodinâmica pode ser a ferramenta ideal para esse propósito. A função do estado termodinâmico, que caracteriza a energia total do sistema, é a função da energia livre específica (por massa específica do material), representada por $\Psi(\varepsilon, \alpha, T)$, dependente dos parâmetros de estados previamente descritos. O tensor de tensões σ é dividido então em duas partes: a reversível quase conservativa e a irreversível dissipativa, podendo ser escrito então da seguinte maneira:

$$\sigma_i = \sigma - \sigma_r$$

A parte reversível pode ser definida pela relação abaixo, onde associamos a força termodinâmica com o tensor deformação ε :

$$\sigma^r = \rho \partial_\varepsilon \psi$$

Com a função de dissipação específica descrita por $\phi(T, \varepsilon, \alpha, \varepsilon', \alpha', q)$, onde os parâmetros assinalados por apóstrofos são a variação do próprio parâmetro em relação ao tempo. Podemos nos basear na inequação de Clausius-Duhem para propor a seguinte relação:

$$\rho \dot{\phi} = \sigma^i : \dot{\varepsilon} - \rho \partial_\alpha \psi : \dot{\alpha} - \frac{q}{T} \nabla T \geq 0$$

A energia livre é função de variáveis cinemáticas, enquanto a dissipação é função de variáveis cinemáticas, mas também da taxa de variação dessas variáveis ZIEGLER H. (1977). Abaixo, temos uma relação cujo cada termo é o produto entre termos de velocidade e força. Assim, sabemos que o fluxo térmico, a dissipação interna e as tensões irreversíveis caracterizam o processo de irreversibilidade da deformação plástica, onde a função de ação termodinâmica pode ser escrita pela

relação seguinte:

$$\vartheta = \rho \partial_{\alpha} \psi$$

A função dissipação pode ser escrita de várias outras formas. Segundo ZIEGLER H. (1977), sendo Φ' uma função convexa, contínua e não negativa, podemos então reescrever a função dissipação da maneira seguinte, aplicando a cada parcela da equação:

$$\phi = \partial_{\varepsilon} \Phi' : \dot{\varepsilon} + \partial_{\dot{\alpha}} \Phi' : \dot{\alpha} + \partial_q \Phi' q \geq 0$$

Ao compararmos a equação acima com a inequação de Clausius-Duhem, percebemos que é possível estabelecer uma relação entre o tensor de tensões e a função dissipação, podendo assim ser descrita pela equação abaixo:

$$\sigma^i = \rho \partial_{\varepsilon} \Phi'$$

Baseando-nos na mesma lógica, a segunda lei fundamental da termodinâmica nos permite tirar as duas relações abaixo envolvendo o fluxo de calor, a ação termodinâmica e a função dissipação:

$$\vartheta = -\rho \partial_{\dot{\alpha}} \Phi'; \quad \frac{1}{T} \nabla T = \rho \partial_q \Phi'$$

O tensor de tensões pode então ser escrito como:

$$\sigma = \rho \partial_{\varepsilon} \varphi + \rho \partial_{\varepsilon} \Phi'$$

Por analogia, podemos então descrever a atuação das forças termodinâmicas pela equação:

$$\rho \partial_{\alpha} \varphi + \rho \partial_{\dot{\alpha}} \Phi' = 0$$

Com a equação acima, se torna fácil entender que a relação entre energia interna livre e dissipação de energia obedecem a lei da conservação de energia. Tal relação nos permite avançar a hipótese de

que, para um carregamento de natureza térmica, que introduza ou retire energia do sistema, essa energia deverá ser processada por uma das parcelas citadas acima, seja a da energia livre ou dissipação. Quando o material argiloso é aquecido, como previamente citado, ele possui tendência a contração devido ao desequilíbrio das energias internas. Notamos também experimentalmente que a deformação do material argiloso sob carregamento térmico é irreversível após o esfriamento, fenômeno que nos indica que a energia fornecida pela fonte exterior foi processada pela parcela da dissipação, mudando seu estado de máxima entropia pela relação TdS. Ao ser absorvida pela parcela da entropia, a nova energia fornecida diminui a energia livre interna do material, energia essa que permite que o trabalho volumétrico seja realizado, o que justifica a menor deformação de uma amostra argilosa aquecida submetida a um carregamento dinâmico (impacto). Notamos também, que as amostras cuja temperatura atingiu valores superiores a 60°C, desenvolveram trincas em sua superfície de contato do impacto, o que pode ser interpretado como uma maneira de dissipar a energia fornecida a taxas altíssimas por meio de fraturas.

3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL.

3.1 Peneiramento.

O ensaio de peneiramento foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-RJ, conforme a NBR 7181/1984, com apenas algumas modificações. O material analisado foi o passante na peneira n°40 e não na n°10 como recomenda a norma.

Solos Coluvionares								
Amostra	com defloculante (%)				sem defloculante (%)			
	pedregulho	areia	silte	argila	pedregulho	areia	silte	argila
PUC	1,1	30,6	8,5	59,8	1,1	51,9	45,0	2,0

Tabela 01: Ensaio de granulometria com e sem defloculante.

A notável diferença no resultado da fração de argila com e sem defloculante (hexametáfosfato de sódio) é devido ao tempo de sedimentação para cada ensaio. O ensaio sem defloculante completou a sedimentação em menos de 30 minutos, evidenciando o caráter flocculado do solo.

3.2 Limites de Atterberg.

O ensaio para determinar os Limites de Atterberg foram realizados conforme as normas NBR 7180/1984 e NBR 6459/84b. As amostras foram secas em estufa a 60° durante um período de 24h, foram destorroadas e peneiradas na peneira n°40 (0,42mm).

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Ia
PUC	61,3	33,1	28,2	0,47

Tabela 02: Limites de Atterberg e Atividade de Skempton

Nota-se um índice de plasticidade regular, dentro do esperado para o tipo de solo e um Índice de Atividade de Skempton abaixo do nível considerado ativo.

3.3 Análise Química e Porosimetria de Mercúrio

A análise química do material passante na peneira n°200 foi realizado no Laboratório de Fluorescência e Difração de Raios-X no Departamento de Geologia da UFRJ e os resultados foram extraídos da dissertação de mestrado da Manuelle Galindo (Galindo,2013) e da tese de doutorado da Taíse Carvalho (Carvalho,2012). A amostra foi fundida em tetraborato de lítio antes de ser submetida ao ensaio com raios-x cujo resultados estão na tabela abaixo:

Amostra	Constituintes em porcentagens							Traços
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	
PUC	32,83	42,59	0,10	0,15	1,10	7,73	0,01	Ca, Cr, Mn

Tabela 03: Minerais constituintes da amostra.

O alto teor de sílica na amostra examinada é consequência do teor de argila, referente aos argilominerais resistentes ao intemperismo como o quartzo por exemplo, ou pela presença de possíveis compostos amorfos de alumina e sílica. O teor de ferro pode ser justificado pela composição da rocha de origem.

O estudo da porosidade do material foi realizado por injeção de mercúrio na amostra. O mercúrio é considerado um fluido não molhante para a maioria dos materiais e então só penetraria pequenos poros na presença da aplicação de uma pressão. A relação entre a quantidade de mercúrio penetrada nos poros e a pressão aplicada é uma função direta. Os resultados para esse material foram extraídos

da tese de doutorado da Miriam Escalaya (Escalaya, 2015).

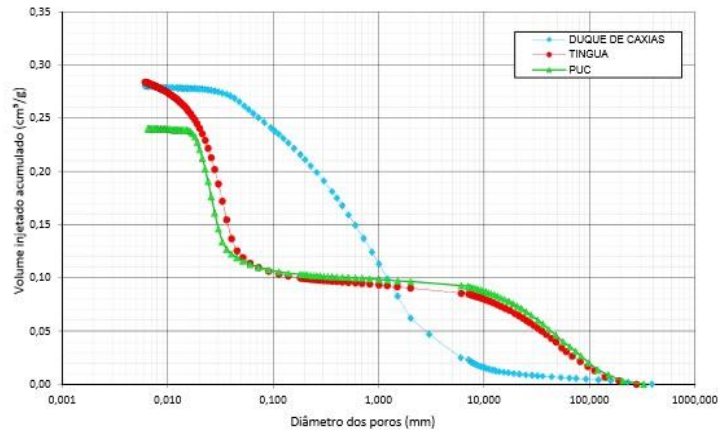


Figura 01: Relação entre diâmetro dos poros e volume de Hg injetado.

Amostra	Porosidade por injeção de mercúrio (%)
PUC	36,22

Tabela 04: Porosidade da amostra por injeção de Hg.

4. Ensaio Dinâmico de Queda Livre.

O solo utilizado para os ensaios foi extraído do talude experimental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), possuindo como citado previamente, características físicas e granulométricas compatíveis com um silte argiloso de característica superplástica. O material foi moldado em esferas de 60g com aproximadamente 38mm de diâmetro e foram submetidas a uma queda livre de 0,57m, possuindo assim ao atingir o solo, uma energia cinética total de 0,335kJ.

Após o impacto, o diâmetro do corpo de prova foi novamente aferido assim como sua altura. Tal ensaio foi repetido com variadas temperaturas, alteradas em estufa e controladas com uma câmera térmica infravermelha digital que possibilita a obtenção da temperatura em pontos específicos da amostra simultaneamente e com intervalos de dez segundos entre os monitoramentos para que se obtenha uma avaliação da evolução da temperatura com o tempo, sempre mantendo o mesmo teor de umidade do solo para que a relação entre as duas fases que compõe o material fosse respeitada e considerada constante ao longo do ensaio.

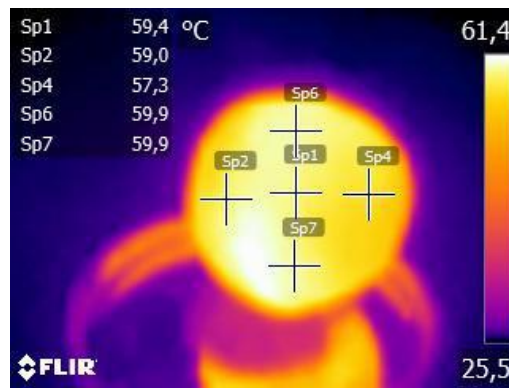


Figura 02: Imagem térmica de uma amostra aquecida e controlada em cinco pontos.

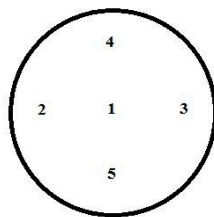


Figura 03: Pontos de monitoramento das amostras.

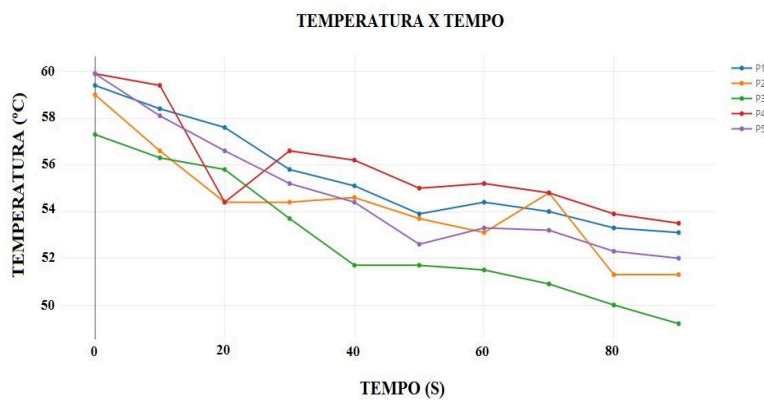


Figura 04: Acompanhamento da evolução da temperatura em cada ponto em função do tempo.

Com os resultados em mãos, as seguintes relações foram extraídas:

- Deformação axial;
- Deformação radial;
- Deformação volumétrica;
- Razão entre temperatura ambiente e Temperatura de Ensaio.

Os resultados foram plotados em gráficos para que se tornasse mais visual toda a teoria citada acima.

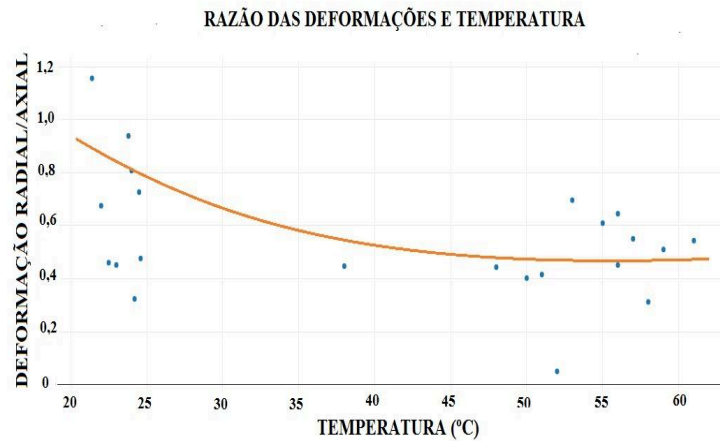


Figura 05: Razão entre deformações x temperatura.

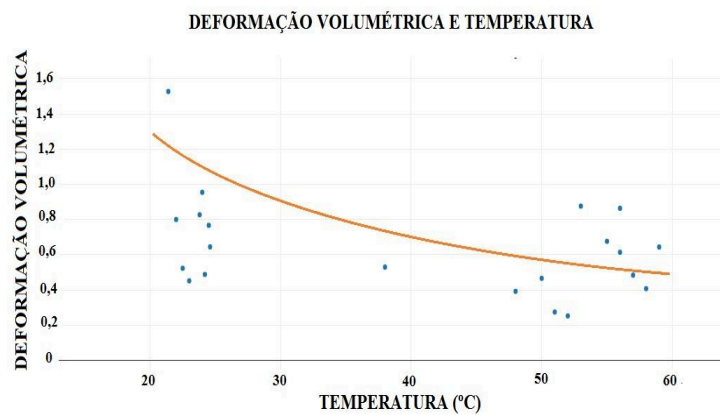


Figura 06: Deformação volumétrica x temperatura.

Nota-se que tanto a razão entre as deformações nos diferentes eixos, quanto a deformação volumétrica total devido a um carregamento dinâmico, diminuem suas intensidades com o aumento da temperatura. O comportamento das amostras condiz com o aspecto teórico abordado na primeira parte do trabalho e, conseqüentemente, com a literatura já existente sobre termomecânica do meio poroso. É esperado que o aumento da temperatura mude o estado de energia total do corpo, alterando a parcela da entropia e, pelo equilíbrio de energia, diminua a parcela da energia livre, responsável pela capacidade do corpo de realizar trabalho. Segundo Laloui (2011), baseando-se na

teoria elasto-plástica do material, a função que define a superfície de escoamento é dependente da temperatura do material. O aumento da temperatura provoca um encolhimento da superfície de escoamento, acompanhado pelo deslocamento instantâneo do ponto de tensões efetivas devido ao endurecimento por trabalho, fazendo com que a superfície de escoamento isotrópica se encontre sempre sobreposta ao ponto de tensões, BALDI G., BORSETTO M., HUECKEL T. & TASSONI E. (1985). Em uma ótica viscoplástica, a superfície volta para o ponto de tensões de maneira gradual e em um intervalo de tempo, determinado pela viscosidade do meio.

O ensaio dinâmico de queda livre permite que seja colocado em evidência a relação entre energia cinética e trabalho volumétrico. Considerando-se que haja conservação total de energia, o trabalho realizado pelo corpo deverá ser idêntico em módulo a energia cinética no instante do impacto. Porém, para um meio viscoplástico, parte da energia é dissipada por deformações irreversíveis, onde a taxa de dissipação interna do material é menor do que o trabalho externo realizado, sendo esta taxa de dissipação uma função direta do fluxo de calor existente no material, como descrito pela inequação de Clausius-Duhem.

5. ENSAIO ESTÁTICO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.

Neste ensaio as amostras foram colocadas em moldes metálicos cilíndricos vazados em uma das faces, com diâmetro de 10cm e altura de 5cm, com densidade constante verificada pelo peso das amostras e submetidas a carregamentos estáticos variando sua intensidade a cada 30 segundos. O ensaio foi realizado para uma temperatura de 22°C e 73°C, com tensões variando de 15,2 a 82kPa. Os valores foram inseridos em um gráfico de tensão-deformação permitindo uma melhor comparação dos dois cenários.

Temperatura (°C)	Tensão (kPa)	Altura Inicial (mm)	Altura Final (mm)	Deformação	Deformação Acumulada
22	15,2	40	38	0,05	0,05
22	32,4	38	37	0,02631579	0,07631579
22	56,0	37	36	0,02702703	0,10334282
22	82	36	35,8	0,00555556	0,10889837

Tabela 05: Dados do ensaio de tensão-deformação a 22°C.

Temperatura (°C)	Tensão (kPa)	Altura Inicial (mm)	Altura Final (mm)	Deformação	Deformação Acumulada
73	15,2	40	39	0,025	0,025
73	32,4	39	38	0,02564103	0,05064103
73	56,0	38	37	0,02631579	0,07695682
73	82	37	36,5	0,01351351	0,09047033

Tabela 06: Dados do ensaio tensão-deformação a 73°C.

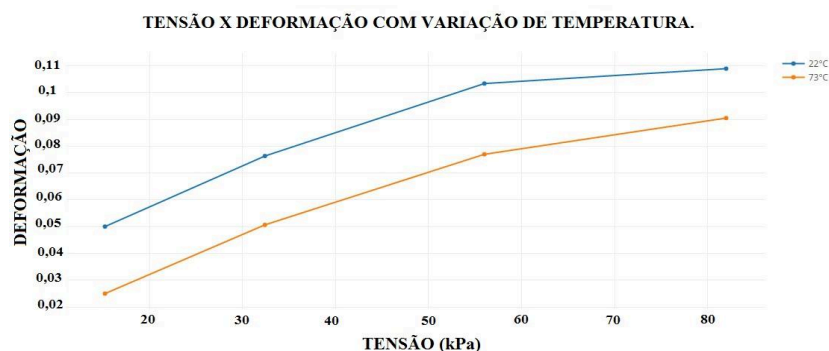


Figura 07: Gráfico do ensaio tensão x deformação a diferentes temperaturas.

A amostra com maior temperatura (73°C) aponta uma menor deformação durante todo o ensaio. É notável uma simetria entre os dois ensaios, um comportamento quase idêntico, porém deslocado de um valor constante. Durante o ensaio, como já citado anteriormente, as deformações radiais foram contidas, e o fluxo radial e axial e água também foram impedidos. O aumento da temperatura resultou em um aumento da poropressão devido a dilatação da água e o aparecimento de tensões residuais devido a impossibilidade da água se expandir mais do que o limite imposto em laboratório. Esta tensão derivada do aumento de volume da fase líquida dentro do meio poroso resulta em um aumento da poropressão, diminuindo por consequência a ação das tensões efetivas e

reduzindo a deformação da matriz sólida. A influência da parcela de energia livre acredita-se ser negligenciável neste ensaio pois a taxa de fornecimento de energia no sistema é menor do que a taxa de dissipação e interna e de transmissão de informação entre as partículas. Neste ensaio de baixa taxa e aplicação de carga, o solo perde calor ao longo do tempo e aumenta linearmente seu volume, não voltando completamente para seu estado inicial. A reorganização dos grãos devido ao resfriamento pode ser comparada a um pré-adensamento, o que justificaria também em uma menor deformação para o mesmo nível de tensões.

6. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados evidenciaram o caráter contrativo e a tendência dos materiais silte-argilosos a enrijecer em consequência de um carregamento térmico. As amostras ensaiadas em carregamento dinâmico sob forma de impacto apresentaram deformações menores quando aquecidas, assim como quando submetidas a um carregamento uniaxial. A aproximação termodinâmica explica os resultados pelo equilíbrio das forças internas do corpo, e sua diminuição da capacidade de realizar trabalho devido ao aumento da entropia do material. Os ensaios também demonstraram o efeito de endurecimento por trabalho análogo a um pré-adensamento durante o processo de resfriamento, processo esse que justificaria uma resistência maior a deformação inicialmente durante o ensaio uniaxial.

REFERÊNCIAS

BURGER A., RECORDON E., BOVET D., COTTON L. & SAUGY B., *Thermique des nappes souterraines*, Presses polytechniques romandes, 1985.

LALOU L. & MODARESSI H., “Effets de la Thermo-Plasticite des argiles sur le comportement des puits de stockage”, 1st International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, p. 881-887, Ed. BiTech publishers Ltd. 1994.

ROBINET J.C., RAHBAOU A., PLAS F. & LEBON P., “A constitutive thermomechanical model for saturated clays”, *Engineering Geology*, vol. 41, 1-4, p. 145-169, 1996.

LALOU L., MORENI M., FROMETIN A., PAHUD D. & VULLIET L., “In-Situ ThermoMechanical Load Tests on a Heat Exchanger Pile”, *Proceedings of 4th International Conference on Deep Foundation Practice incorporating Piletalk*, Singapore, p. 273-279, 1999.

BALDI G., BORSETTO M., HUECKEL T. & TASSONI E., “Thermally induced strains and pore pressures in clays”, *International symposium on environmental geotechnology*, Allentown, p. 391-402, 1985.

FLEUREAU J.M., *Influence d'un champ thermique ou électrique sur les phénomènes d'interaction solide-liquide dans les milieux poreux*, Doctoral thesis, Ecole Centrale de Paris, 1979.

HUECKEL T. & PELLEGRINI R., "Modeling of thermal failure of saturated clays", in Numerical models in geomechanics, 81-90, Elsevier, 1989.

BIOT I.M.A., "Thermoelasticity and irreversible thermodynamics", J. Appt. Phys., 27, p. 240-253, 1956.

HALPHEN B. & NGUYEN Q.S., "Sur les Matériaux Standard Généralisés", J. de Mécanique, vol. 14, n° 1, 39-63, 1975.

ZIEGLER H., An Introduction to Thermomechanics, North-Holland, Amsterdam, 1977.

ESCALAYA.M., "Avaliação do Efeito de Aumento de Poropressão nas Características de Resistência de Três Solos Tropicais", 2015.

GALINDO, M. S. V. "Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da viscosidade de solos". Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013, 122p.

CARVALHO, T. M. O. "Desenvolvimento de um sistema de medição de variação de volume total de amostras não saturadas em ensaios triaxiais e avaliação da influência da técnica de saturação no comportamento tensão deformação-resistência de solos residuais". Tese de doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012, 401p.

LALOU L. "Thermo-mechanical behaviour of soils", 2011.