

Influência da Temperatura no Comportamento Geomecânico de um Solo Argiloso Mole

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

Michéle Dal Toé Casagrande

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

RESUMO: O presente trabalho consiste em uma análise preliminar do comportamento termomecânico de um solo mole. Foram realizados ensaios de impacto e de penetração não drenada, com diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que nessas condições o comportamento mecânico do solo é fortemente afetado pela temperatura. O estudo aborda também aspectos dos modelos matemáticos e leis constitutivas dos materiais dentro do campo termo-hidro-mecânico. O presente trabalho visa ressaltar a importância da temperatura nas propriedades físico-mecânicas do solo.

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

1 INTRODUÇÃO

O estudo sobre o comportamento

termomecânico do solo possui aplicações em diferentes áreas, como por exemplo: depósitos de lixo nuclear (Laloui, 1994), armazenamento de calor (Burger et al. 1985), estruturas geotérmicas (Laloui, 1999), extração de petróleo, zonas em torno de cabos de alta voltagem enterrados e outros fenômenos como mudanças cíclicas de temperatura. Devido a sua crescente importância, a termomecânica aplicada aos solos necessita de maiores pesquisas para uma melhor compreensão de sua influência, nas análises de tensões x deformações.

Uma abordagem termomecânica necessita na

elaboração de modelos matemáticos, visando mapear e explicar leis constitutivas dos materiais dentro do campo termo-hidro-

mecânico. Aliado ao número reduzido de estudos, os resultados obtidos são não-intuitivos e merecem uma análise criteriosa, como o comportamento de contração de argilas quando submetidas a carregamentos térmicos. Estudos mostraram também que a argila quando aquecida possui uma parcela da deformação irreversível durante o resfriamento. 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 nas camadas mais superficiais. 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 citados por (Hueckel e Pellegrini, 1989) mostraram que sob condições não drenadas rompiam em temperaturas entre 70 e 90°C. 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 servirá para a apresentação de alguns resultados experimentais baseados em teorias físicas já estabelecidas previamente.

2 TEORIA TERMOMECAÂNICA 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. Porém, 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 et al., 1996 e Fleureau 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, determinando a característica do 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 solo que, ou o 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 dQ , ou de trabalho mecânico dW fornecida 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 $dQ = TdS$. Combinando essas duas relações, tem-se:

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

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 sua arquitetura química. 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 presentes nas argilas, a lei eletrostática de atração de Coulomb pode ser usada para simples aproximações da dureza das ligações. Para íons de mesma carga, a força de atração pode ser escrita pela relação:

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

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. A energia associada a atração de

Coulomb é obtida pela integração da força em relação à distância, isto é, a energia das ligações varia inversamente com o aumento da distância, pela equação:

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

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 é expressa pela equação:

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

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 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 obtêm-se a seguinte relação:

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

Em que:

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

A aplicação de esforços mecânicos, aproxima ou afasta os átomos variando a sua energia interna. 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.

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 e Nguyen, 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 $\Psi(\epsilon, \alpha, T)$, 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 definida pela equação:

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

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

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

Com a função de dissipação específica descrita

por ϕ ($T, \varepsilon, \alpha, \varepsilon', \alpha', q$), podemos nos basear na inequação de Clausius-Duhem para propor a seguinte relação:

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

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, 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:

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

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

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

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

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

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

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

O tensor de tensões pode então ser escrito como:

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

Por analogia, pode-se então descrever a atuação das forças termodinâmicas pela equação:

$$\rho\partial_\alpha\varphi + \rho\partial_\alpha\Phi' = 0$$

Esta equação evidencia a relação entre energia interna livre e dissipação de energia obedecendo a lei da conservação. Logo, 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, possui tendência a contração devido ao desequilíbrio das energias internas, além de uma parcela irreversível de deformação também observada por Lalloui (2011). Isso mostra uma mudança em 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.

3. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo utilizado para os ensaios foi extraído do talude experimental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) com características físicas e granulométricas compatíveis com um silte argiloso de característica superplástica (Tabela 1).

Tabela 1: Ensaio de granulometria com e sem defloculante.

Amostra	Solos Coluvionares							
	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

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 floculado 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 nº40 (0,42mm), conforme pode-se observar na Tabela 2.

Tabela 2: Limites de Atterberg e Atividade de Skempton

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

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 nº200 foi realizado no Laboratório de Fluorescência e Difração de Raios-X no Departamento de Geologia da UFRJ e os resultados foram extraídos de Galindo (2013). A amostra foi fundida em tetraborato de lítio antes de ser submetida ao ensaio com raios-x cujo resultados estão na Tabela 3.

Tabela 03: Minerais constituintes da amostra (Galindo, 2013)

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

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 de Escalaya (2015), conforme Tabela 4.

Tabela 4: Porosidade da amostra por injeção de Hg. (Escalaya, 2015)

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

4. Ensaio de Impacto

Amostras do solo foram moldadas 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.

Os ensaios foram realizados com variadas temperaturas, mantendo o mesmo teor de umidade $w = 40\%$, para que a relação entre as duas fases que compõe o material fosse respeitada. A temperatura foi controlada com uso de uma câmera térmica infravermelha digital que possibilita a obtenção de seu valor 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 (Figuras 1 e 2).

A Figura 3 apresenta o acompanhamento da evolução da temperatura em cada ponto em função do tempo.

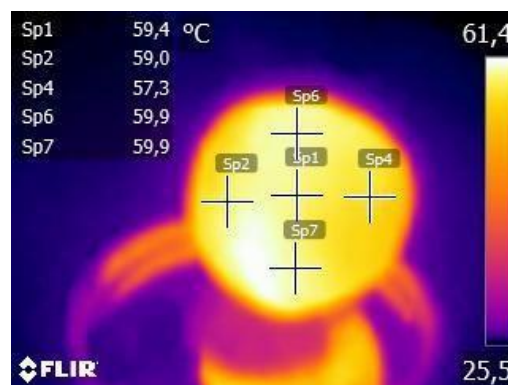


Figura 1: Imagem térmica de uma amostra aquecida e controlada em cinco pontos.

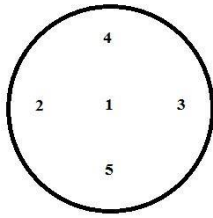


Figura 2: Pontos de monitoramento das amostras.

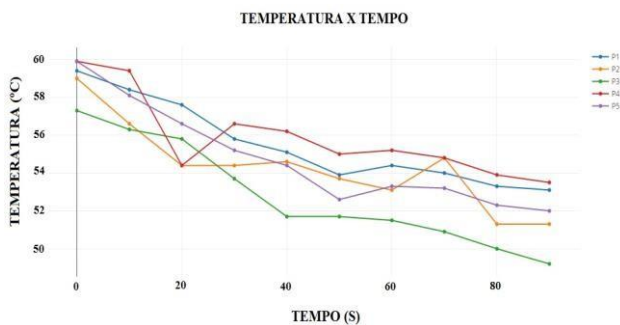


Figura 3: Acompanhamento da evolução da temperatura em cada ponto em função do tempo.

As seguintes relações foram extraídas: deformação axial, deformação radial; deformação volumétrica; razão entre temperatura ambiente e temperatura de ensaio. Os resultados estão apresentados na Figura 4 e 5.

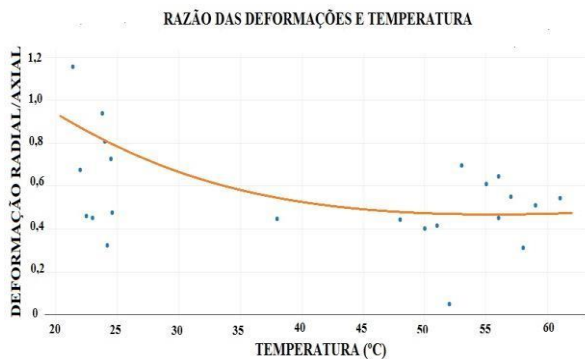


Figura 4: Razão entre deformações x temperatura.

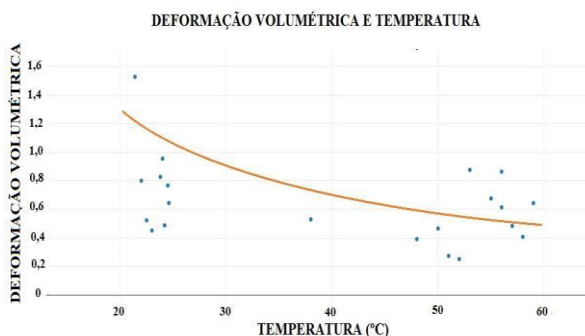


Figura 5: Deformação volumétrica x temperatura.

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, consequentemente, 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 et al., 1985). Em uma ótica visco-plástica, 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 visco-plástico, 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 um função direta do fluxo de calor existente no material, como descrito pela inequação de Clausius-Duhem.

6. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados evidenciaram o caráter

contrativo e a tendência dos materiais silto-argilosos a enrijecer em consequência de um carregamento térmico. As amostras ensaiadas em carregamento dinâmico sob forma de impacto apresentaram deformações menores quando aquecidas. A aproximação termodinâmica explica os resultados pelo equilíbrio das forças internas do corpo, e sua diminuição na capacidade de deformar devido ao aumento da entropia do material.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BIOT I.M.A., “Thermoelasticity and irreversible thermodynamics”, J. Appl. Phys., 27, p. 240-253, 1956.
- BURGER A., RECORDON E., BOVET D., COTTON L. & SAUGY B., Thermique des nappes souterraines, Presses polytechniques romandes, 1985.
- 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.
- ESCALAYA.M., “Avaliação do Efeito de Aumento de Poropressão nas Características de Resistência de Três Solos Tropicais”, Tese de doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.
- 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.
- GALINDO, M. S. V. “Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da viscosidade de solos”. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013, 122p.
- HALPHEN B. & NGUYEN Q.S., “Sur les Matériaux Standard Généralisés”, J. de Mécanique, vol. 14, n° 1, 39-63, 1975.
- HUECKEL T. & PELLEGRINI R., “Modeling of thermal failure of saturated clays”, in Numerical models in geomechanics, 81-90, Elsevier, 1989.
- LALLOUI L. “Thermo-mechanical behaviour of soils”, 2011.
- LALLOUI L. & MODARESSI H., “Effets de la Thermo-Plasticité des argiles sur le comportement des puits de stockage”, 1st International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, p. 881-887, Ed. BiTech publishers Ltd. 1994.
- LALLOUI 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.
- NBR 6459/84b - Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 - Determinação do Limite de Plasticidade
- 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.
- ZIEGLER H., An Introduction to Thermomechanics, North-Holland, Amsterdam, 1977.

