

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA RESIDUAL DE
SOLOS MOLES**

POLIANA DO CARMO JORGE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO – 2025

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA RESIDUAL DE SOLOS MOLES

POLIANA DO CARMO JORGE

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

ORIENTADOR: D.Sc. FERNANDO SABOYA ALBUQUERQUE JUNIOR

CO-ORIENTADOR: D.Sc. JULIANA PESSIN

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

J82

Jorge, Poliana do Carmo.

Influência da temperatura na resistência residual de solos moles / Poliana do Carmo Jorge.
- Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

113 f. : il.

Bibliografia: 104 - 111.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.

Orientador: Fernando Saboya Albuquerque Junior.

Coorientadora: Juliana Pessin.

1. Solo argiloso. 2. Temperatura. 3. Resistência Residual. 4. Resistência Viscosa. I.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA RESIDUAL DE SOLOS MOLES

POLIANA DO CARMO JORGE

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovada em 01 de Agosto de 2025.

Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

MICHELE DAL TOE CASAGRANDE

Data: 27/08/2025 15:32:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Michele Dal Toe Casagrande (D.Sc., Engenharia Civil) – UNB

Documento assinado digitalmente



SERGIO TIBANA

Data: 28/08/2025 07:24:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Sérgio Tibana

(Engenharia Civil) – UENF

Documento assinado digitalmente



JULIANA PESSIN

Data: 28/08/2025 12:13:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Juliana Pessin (D.Sc., Engenharia Civil) – UFF

Documento assinado digitalmente



FERNANDO SABOYA ALBUQUERQUE JUNIOR

Data: 27/08/2025 11:43:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Co-orientador)

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Junior (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele, não teria vencido essa batalha! Sua força, seu amor, seu cuidado, sua direção, me sustentou em todos os dias! Como Ayrton Senna uma vez disse: “Deus é o dono de tudo. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade. Ele deu para mim, não sei por quê. Sei que não posso desperdiçá-la.” E por isso, direcionei minha dedicação e esforço ao longo do desenvolvimento desta pesquisa para que pudéssemos alcançar resultados de excelência.

Agradeço a minha mãe, minhas irmãs, sobrinhos, sobrinhas e amigos, pelo apoio, motivação e principalmente por sempre estarem comigo nos momentos mais difíceis. Obrigada por cada oração, por todo o suporte, espiritual, emocional e financeiro!

Agradeço à Profa. Brunella Bruneli, que me apresentou à Geotecnia e foi e ainda é uma grande referência de profissional desde o início da minha formação. Seu exemplo, incentivo, excelência e dedicação foram fontes de inspiração para mim!

Agradeço a toda equipe geotécnica da centrífuga, André, Walber, Eberton, Gabriel, vocês foram essenciais no meu projeto! Obrigada por todo apoio técnico e emocional. O sucesso de uma pesquisa depende de uma boa equipe, e eu tive uma excelente! Agradeço ao professor Sérgio Tibana por todos os conselhos, por todos os puxões de orelha e principalmente por toda motivação! Agradeço ao meu orientador Fernando Saboya por todo conhecimento compartilhado, por acreditar e depositar em minhas mãos esse grande desafio! Minha co-orientadora Juliana Pessin por todas as valiosas contribuições e pelo apoio ao longo da pesquisa, por todo incentivo que me motivaram a buscar a excelência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Mestrado que possibilitou a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Organização do trabalho.....	4
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Propriedades Físico-Químicas de Solos Argilosos	6
2.1.1 Influência das Propriedades Minerais e efeitos Térmicos na Resistência Viscosa de Solos Argilosos	6
2.2 Comportamento Térmico dos Solos Argilosos	9
2.2.1 Adensamento: Resposta Termomecânica dos Solos Argilosos.....	9
2.3 Influência da Temperatura nos Parâmetros de Resistência de Solos Argilosos.....	14
2.3.1 Influência na Resistência ao Cisalhamento	14
2.3.2 Resistência Residual	16
2.4 Equipamentos para a Determinação da Resistência Residual dos Solos...22	
CAPÍTULO 3 MATERIAS E MÉTODOS.....	25
3.1 Considerações Iniciais	25
3.1.1 Materiais	25
3.1.2 Métodos	35
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	52

4.1	Efeito das Taxas de Cisalhamento e Temperatura na Resistência ao Cisalhamento do Solo Caulim Considerações Iniciais	52
4.2	Avaliação das Flutuações na Resistência Residual	84
4.3.	Curva Backbone.....	93
4.4.	Contribuições Científicas desta Pesquisa	97
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO		100
CAPÍTULO 6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....		102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		104
APÊNDICE A — Calibração dos Sensores		112
APÊNDICE B — Registro Visual da Extrusão do Solo em Ensaio de Cisalhamento Anelar.....		113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Partícula de Argilomineral (Budhu, 2010).....	6
Figura 2 — Desenho Esquemático do Comportamento químico-físico da Água em uma Partícula de Solo.	7
Figura 3 — Reversibilidade Elástica das Variações Volumétricas com a Temperatura (Huancollo et al., 2023).	11
Figura 4 — Influência da Temperatura na Mudança de Volume (Campanella; Mitchell, 1968).	12
Figura 5 — Comportamento do Solo na Resistência Residual.	17
Figura 6 — Comportamento do Solo Argiloso Normalmente Adensado na Resistência Residual.	17
Figura 7 — Relação Entre o Coeficiente de Resistencia Residual em Função da Tensão Normal (Bromhead, 1979).	19
Figura 8 — Amostra de Teste em Cisalhamento de Anel (Bishop <i>et al.</i> , 1971).....	23
Figura 9 — Vista Lateral do Equipamento de Bromhead.	26
Figura 10 — a) Diâmetro Externo em Milímetros do Anel de Moldagem; b) Diâmetro Interno em Milímetros do Anel de Moldagem.	26
Figura 11 — a) Vista da área Externa da Placa Superior do Equipamento de Cisalhamento de Anel; b) Vista da Área Interior da Placa Superior do Equipamento de Cisalhamento de Anel.	26
Figura 12 — Desenho Esquemático do Sistema para Controle de Temperatura.	28
Figura 13 — Placa Superior Modificada para Mudança de Temperatura.	28
Figura 14 — Desenho Esquemático para Sistema de Bombeamento.	29
Figura 15 — Caixa d'água com Bombas para Controle do Nível d'água.	29
Figura 16 — Sensor de Temperatura e Sensor de Nível d'água.	30
Figura 17 — Células de Carga Para Ensaios.	30
Figura 18 — Sistema de Aquisição dos Dados.	31
Figura 19 — Interface do Programa Controle de Temperatura.	31
Figura 20 — Interface do Programa Monitoramento dos Sensores de Carga e LVDT.	32
Figura 21 — Interface do Programa Monitoramento do Comportamento do Solo.	32
Figura 22 — Análise Granulométrica.	34
Figura 23 — Fluxograma da Metodologia Experimental Utilizada na Pesquisa.	37

Figura 24 — Disco de Moldagem com os Furos Lacrados.....	39
Figura 25 — Arrasamento Radial da Amostra.....	39
Figura 26 — Viscosidade da água em Função da Temperatura.	41
Figura 27 — Escape entre o disco de moldagem do Corpo de Prova e a Placa Superior.....	41
Figura 28 — Peso da Placa Superior.	42
Figura 29 — Tensões Normais Aplicadas em Cada Corpo de Prova.....	43
Figura 30 — a) Distância de Torque, d) Raio Externo e Interno em Milímetros.	45
Figura 31 — a) Topo da Placa Superior; b) Parafuso Central.	48
Figura 32 — Desenho Esquemático Modificado do Conjunto da Torre de Amostra (Bromhead, 1979).	48
Figura 33 — a) Testes de Atrito Temperatura 22 °C; b) Testes de Atrito Temperatura 32 °C.	49
Figura 34 — Testes de Atrito Temperatura 40 °C.	50
Figura 35 — Deslocamento Vertical Durante a Formação do Plano de Falha Sob Diferentes Temperaturas.....	53
Figura 36 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função da Tensão Normal sob Diferentes Temperaturas.....	55
Figura 37 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min.	56
Figura 38 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.	57
Figura 39 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento na Taxa de Cisalhamento: 60°/min.....	58
Figura 40 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento 2,4°/min	59
Figura 41 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento 30°/min.	60
Figura 42 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente a Taxa de Cisalhamento 60°/min.....	61

Figura 43 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min.	62
Figura 44 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.	63
Figura 45 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob a Taxa de Cisalhamento de 60°/min.	64
Figura 46 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob a Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min em Temperatura 40 °C.	64
Figura 47 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.	65
Figura 48 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min	66
Figura 49 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32 °C: Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min.	67
Figura 50 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.	68
Figura 51 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.	69
Figura 52 —Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min.	70
Figura 53 —Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.	71
Figura 54 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 40 °C a Taxa de Cisalhamento a 60°/min.	72
Figura 55 — Tensão de Cisalhamento em Função da Tensão Normal sob Diferentes Temperaturas.	73

Figura 56 — Efeito da Taxa de Cisalhamento na Tensão de Cisalhamento do Solo Caulim Speswhite na Temperatura: 22 °C.	74
Figura 57 — Efeito da Taxa de Cisalhamento na Tensão de Cisalhamento do Solo Caulim Speswhite: a) Temperatura: 32 °C; b) Temperatura: 40 °C.	75
Figura 58 — Variação Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente sob a Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min.	76
Figura 59 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.	77
Figura 60 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento:30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.	78
Figura 61 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 32 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min.	79
Figura 62 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 32 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.	80
Figura 63 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura: 32 °C ± 2 °C: Taxa de Cisalhamento: 60°/min.	81
Figura 64 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C: Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min.	81
Figura 65 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.	82
Figura 66 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.	83
Figura 67 — Desvio Padrão das Variações da Tensão Cisalhante sob a Tensão Normal sob Temperatura de 22 °C ± 2 °C.....	87
Figura 68 — Desvio Padrão das Variações da Tensão Cisalhante sob a Tensão Normal: a) Temperatura de 32 °C ± 2 °C; b)Temperatura de 40 °C ± 2 °C.....	88
Figura 69 — Influência da Taxa de Cisalhamento no Ângulo de Atrito sob a Temperatura 22 °C ± 2 °C.....	89

Figura 70 — Influência da Taxa de Cisalhamento no Ângulo de Atrito sob Cada Temperatura: a) Temperatura $32\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; b) Temperatura $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	90
Figura 71 — Influência da Temperatura na Taxa de Cisalhamento: $0,024^{\circ}/\text{min}$	91
Figura 72 — Influência da Temperatura em Cada Taxa de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: $2,4^{\circ}/\text{min}$; b) Taxa de Cisalhamento: $12^{\circ}/\text{min}$	92
Figura 73 — Influência da Temperatura em Cada Taxa de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: $30^{\circ}/\text{min}$; b) Taxa de Cisalhamento: $60^{\circ}/\text{min}$	93
Figura 74 — CurvaBackBone em cada Tensão Norma: a) Tensão Normal 50 kPa; b) Tensão Normal 75 kPa.....	95
Figura 75 — CurvaBackBone em cada Tensão Norma: a) Tensão Normal 50 kPa; b) Tensão Normal 75 kPa.....	96
Figura 76 — a) Calibração dos Sensores de Células de Carga; b) Calibração do Sensor LDVT.....	112
Figura 77 — Temperatura Ambiente: a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $2,4^{\circ}/\text{min}$; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $12^{\circ}/\text{min}$	113
Figura 78 — Temperatura Ambiente: a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $30^{\circ}/\text{min}$; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $60^{\circ}/\text{min}$	113
Figura 79 — a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $0,024^{\circ}/\text{min}$; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento $60^{\circ}/\text{min}$	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Taxas de Cisalhamento do Equipamento de Cisalhamento de Anel Bromhead — 1979	27
Tabela 2 — Resumo das Propriedades Geotécnicas da Argila Caulim Speswhite — 2024.	33
Tabela 3 — Análise Química por Metais do Solo Caulim Speswhite por Metais — 2024.	33
Tabela 4 — Análise Química por Óxido do Solo Caulim Speswhite — 2024.	33
Tabela 5 — Coeficiente de Adensamento Vertical do Solo Caulim Speswhite — 2024.	34
Tabela 6 — Resumo dos Índices Físicos Obtidos nos Corpos de Prova — 2024.....	40
Tabela 7 — Corpos de Prova Moldados para Ensaio — 2024.	44
Tabela 8 — Tabela dos Ensaios Realizados para Medição do Atrito — 2024.	47
Tabela 9 — Organização dos Ensaios de Cisalhamento de Anel: Séries, Baterias e Corpos de Prova — 2024.	52
Tabela 10 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 22 °C.....	85
Tabela 11 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 32 °C.....	85
Tabela 12 — Continuação da Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 32 °C — 2024.....	86
Tabela 13 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 40 °C — 2024.	86
Tabela 14 — Dados Experimentais para Construção das Curvas Backbone e Suas Respetivas Velocidades Normalizadas — 2024.	94

LISTA DE SÍMBOLOS

OCR : Overconsolidation Ratio

τ/σ'_n : Coeficiente de Atrito do solo

φ : Ângulo de Atrito Interno do Solo

δ' : Deslocamento Linear

η : Viscosidade da água

T : Temperatura em graus Celsius

v : volume

e_0 : Índice de Vazios Inicial

σ'_n : Tensão Normal efetiva

τ : Tensão de Cisalhamento

V : Velocidade Normalizada

\dot{v} : Velocidade Linear

d : Diâmetro

C_v : Coeficiente de Adensamento Vertical

T_{90} : Tempo de consolidação 90%

H_d : Altura da camada de amostra

T_v : Tempo total de adensamento para o nível de adensamento específico

$\dot{\gamma}$: Taxa de Cisalhamento

σ : Desvio Padrão

μ : média da população

M_d : Mediana

μ_k : Coeficiente de Atrito Cinético

RESUMO

A resistência residual é observada em situações, em que a ruptura já ocorreu de solos moles e é um parâmetro essencial na análise de obras sujeitas a grandes deformações, como a estabilidade de taludes, barragens e fundações profundas. Em particular, as argilas marinhas brasileiras, caracterizadas por sua elevada compressibilidade e reduzida resistência ao cisalhamento, apresentam baixa qualidade mecânica, representando um desafio para esses projetos. Para melhorar a estabilidade de fundações e obras geotécnicas em geral, nessas condições de alta complexidade geotécnica, uma alternativa é induzir poropressões térmicas cuja dissipação irá promover o adensamento do solo. Essa alternativa tem sido testada em fundações offshore na melhoria da capacidade de permanência de estacas tipo torpedo. Essas estacas são ancoradas na configuração *taut-leg*, gerando resistência pela combinação de forças verticais e horizontais em ângulos próximos de 45°. Em casos extremos a mobilização da resistência lateral se aproxima da condição residual da argila. Embora a influência da temperatura em solos argilosos seja bem documentada, pouco se sabe sobre seu efeito na resistência residual. Este estudo investigou a influência da variação da temperatura, taxas de cisalhamento e tensões normais na resistência residual do solo caulínico cuja mineralogia se assemelha às argilas marinhas brasileiras, por meio de ensaios de cisalhamento em anel. Os resultados revelaram que a resistência residual do solo varia com a temperatura. Em tensões normais mais altas, observou-se que a tendência de estabilização da resistência residual persiste mesmo com o aumento da temperatura. Além disso, a mudança da temperatura combinada com o aumento da taxa de cisalhamento, antecipa a transição entre os modos de cisalhamento ao mesmo tempo que provoca redução da resistência viscosa. Por fim, o comportamento da resistência residual depende da interação da taxa de cisalhamento, da temperatura e tensão normal.

Palavras-Chave: Solo argiloso, Temperatura, Resistência Residual e Resistência Viscosa.

ABSTRACT

The residual strength is observed in situations where rupture has already occurred in soft soils and is a key parameter in the analysis of civil engineering projects to large deformations, for example slope stability, dams, and deep foundations. In Brazil marine clays, known for being their high compressibility and low shear strength, exhibit poor mechanical quality, posing challenges for these projects. To improve the stability of foundations and geotechnical works under such complex geotechnical conditions, one alternative is to induce pore pressures through thermal effects, whose dissipation promotes soil consolidation. This approach has been tested in offshore foundations to enhance the load bearing capacity of torpedo-type piles. As torpedo-type piles are anchored in a taut-leg configuration, whose total resistance is the sum of vertical and horizontal forces at angles close to 45° . In extreme cases, the mobilization of lateral resistance approaches the clay's residual strength. Although the influence of temperature on clayey soils is documented in literature, the residual strength is poorly understood. This strength is important for resisting thrusts and lateral forces. This study investigated the influence of temperature change, shear rates, and normal stresses on the residual strength of kaolin clay through of apparatus ring shear. The results indicated that residual strength is influenced for temperature, shear rate, and normal stress. At higher normal stresses, the tendency toward stabilize of residual strength persists even with increasing temperature. In addition, the combination of increasing temperature and increasing shear rate advances the transition between shear modes while simultaneously reducing the viscous resistance

Keywords: Clay Soil, Temperature, Residual Strength e Viscous Resistance.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As mudanças do clima em contexto mundial despertou preocupação devido aos seus possíveis impactos a ocorrência de desastres naturais. O ano de 2023 foi o mais quente já registrado até o momento (UNFCCC, 2024), evidenciando a importância dessa questão. Esse aumento da temperatura contribuiu para a ocorrência de desastres naturais, como secas, inundações — sejam repentinas, ribeirinhas ou costeiras; incêndios florestais, ondas de calor, ciclones tropicais e deslizamentos de massa (Donatti *et al.*, 2024).

De acordo com os dados globais, o ano de 2023 teve um aumento da média dos desastres naturais em relação aos últimos 20 anos. Entre 2003 e 2022, 369 desastres naturais foram registrados. Entretanto, esse número subiu para 399 em 2023, representando um aumento global de 8,13%. O Brasil está entre os 10 países com o maior número de ocorrências de desastres naturais (EM-DAT, 2024). Entre esses desastres, observou-se, em 2023, um aumento de 33,33% na movimentação de massa provocada por chuvas, comparado à média anual dos últimos 20 anos (EM-DAT, 2024).

Os efeitos potenciais da temperatura no comportamento do solo têm motivado diversas pesquisas, por exemplo, (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018; Garcia *et al.*, 2023; Miao; Wang, 2022; Scaringi; Loche, 2022). Adicionalmente, estudos sobre a influência da temperatura têm sido aplicados às encostas (Kohler; Hottiger; Puzrin, 2023; Loche; Scaringi, 2023), estacas geotérmicas (Casagrande *et al.*, 2022; McCartney; Murphy, 2012; Yazdani; Helwany; Olgun, 2019), adensamento térmico (Huancollo, 2020) e estacas offshore (Ghaaowd; Saboya, jr; McCartney, 2025).

Apesar do aumento de pesquisas sobre os efeitos termomecânicos nos solos; ter crescido nos últimos anos, o interesse por esse tema já existe há décadas (Campanella; Mitchell, 1968; Plum; Esrig, 1969; Towhata *et al.*, 1993). Esse interesse surgiu pela busca por compreender como as variações térmicas e mecânicas influenciam o comportamento dos solos. A resposta dos solos a essas condições é influenciado pela mineralogia, grau de pré-adensamento (OCR), tensão normal, tipo

de aquecimento ou cisalhamento, drenado ou não drenado, variação de temperatura e interação solo-água.

De acordo com estudos anteriores, as mudanças volumétricas associadas ao aumento da temperatura estão relacionadas ao histórico de tensões (Campanella; Mitchell, 1968; Plum; Esrig, 1969). No entanto, em relação à resistência residual, o comportamento do solo parece ser independente desse histórico (Zheng *et al.*, 2022).

Além disso, a variação térmica pode induzir o aumento da poropressão em condições não drenadas ou parcialmente drenadas, alterando a resistência residual (Garcia *et al.*, 2023). Os diversos efeitos observados nas mudanças térmicas no comportamento mecânico dos solos levantam questões e podem despertar uma preocupação crescente em obras geotécnicas.

Recentemente, descobertas trouxeram resultados interessantes, como a redução do fator de segurança na estabilidade de taludes (Garcia *et al.*, 2023), melhoria significativa na resistência ao cisalhamento de solos moles em resposta ao incremento de temperatura (Huancollo *et al.*, 2023) e aumento da resistência viscosa em solos moles (Abreu; Jr; Tibana, 2024).

Embora haja avanços promissores na melhoria da resposta mecânica dos solos moles submetidos a variações de temperatura, ainda há um campo particularmente interessante a ser explorado: a influência da temperatura na resistência residual (Garcia *et al.*, 2023; Shibasaki; Matsuura; Hasegawa, 2017). Compreender como a resistência residual responde às variações térmicas é fundamental, pois está associada a grandes deformações, impactando a estabilidade de taludes e fundações profundas.

Esta pesquisa pretende investigar o efeito da temperatura na resistência residual de uma argila caulínica comercial, o Caulim Speswhite, submetida a diferentes níveis de tensões normais e diferentes taxas de cisalhamento, utilizando o equipamento de cisalhamento de anel modelo Bromhead que foi modificado para aquisição e controle dos dados e temperatura. A grande vantagem deste equipamento é sua capacidade de gerar grandes deformações, condição necessária para se obter a resistência residual, simulando assim as condições do solo semelhantes às encontradas em campo.

1.2 Justificativa

A aceleração das mudanças climáticas e a ocorrência de desastres naturais, surgiu uma crescente preocupação sobre a influência da temperatura em obras geotécnicas, a resistência ao cisalhamento residual do solo é um parâmetro importante para obras de grandes deformações. Esse tema ganha destaque em diversas aplicações práticas, como estabilidade de taludes, túneis, ruptura de barragens de terra, integridade de dutos enterrados e fundações profundas, como estacas geotérmicas que têm como objetivo aproveitar o calor natural do solo. Dentro das estacas, o fluido de transferência libera ou absorve calor para o solo, sendo utilizadas em edifícios para eficiência energética.

Estudos recentes indicam que a variação da temperatura no solo pode influenciar o fator de segurança de taludes, reduzindo em períodos mais quentes e aumentando-o em períodos mais frios. No verão, essa redução pode ser suficiente para reativar uma falha em uma superfície existente, mesmo sem a ocorrência de chuvas.

O estudo dos efeitos da temperatura têm sido aplicado ao melhoramento térmico do solo para fundações profundas, e mostrando-se relevante em plataformas offshore em águas ultraprofundas, devido às dificuldades em aplicar técnicas de melhoria de solos moles. Neste cenário, as estacas torpedo desempenham uma grande importância na estabilidade dessas estruturas. As condições adversas limitam as operações de perfuração e exploração, resultando em congestionamento no fundo do mar. Para superar a baixa resistência, é necessária a mobilização de uma grande área. Adicionalmente, essas estacas ficam sujeitas a esforços de arrancamento por tração devido à baixa capacidade de carga dos solos.

Em relação à integridade dos dutos enterrados, solos com baixa resistência residual podem permitir movimentos excessivos ao seu redor, favorecendo o deslocamento ou a deformação desse duto, o que compromete sua integridade. A avaliação da resistência residual do solo permite um melhor dimensionamento do duto e dos seus apoios para resistir essas ações. Além disso, a variação de temperatura, como nos casos de dutos que transportam óleo em altas temperaturas, pode atuar como um fator adicional que influencia a resistência residual do solo.

À vista disso, para complementação dos estudos baseados no melhoramento deste solo por meio de incremento de temperatura surge a oportunidade de análise

da resistência ao cisalhamento residual da argila Caulim Speswhite por meio do equipamento de cisalhamento de anel para diferentes níveis de temperatura, taxas de cisalhamento e tensões normais.

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência da temperatura na resistência ao cisalhamento residual de um solo caulínico, o Caulim Speswhite, considerando os efeitos da taxa de cisalhamento em função da temperatura aplicada. Para isso, os corpos de prova foram submetidos a diferentes taxas de cisalhamento, tensões normais e temperaturas, conforme descrito na metodologia, e os dados obtidos foram tratados por meio de estatística descritiva. Busca-se, assim, compreender como a temperatura afeta a resistência residual de solos moles, bem como a influência da taxa de cisalhamento sob diferentes condições térmicas.

1.4 Organização do trabalho

A dissertação está organizada em cinco capítulos:

[Capítulo 1:](#) Considerações iniciais sobre a importância do tema da pesquisa, bem como os objetivos e a organização da pesquisa.

[Capítulo 2:](#) Uma revisão bibliográfica detalhada sobre o comportamento termomecânico dos solos argilosos é apresentada. A revisão aborda desde as interações físico-químicas até a resistência residual, facilitando a compreensão do comportamento de solos argilosos submetidos a variações de temperatura.

[Capítulo 3:](#) São apresentados todos os materiais, como os equipamentos, modificações, os softwares criados e os métodos de ensaios padronizados para pesquisa experimental.

[Capítulo 4:](#) Apresenta os resultados e as análises obtidas.

[Capítulo 5](#): São apresentados as principais conclusões.

[Capítulo 6](#): Sugestões de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades Físico-Químicas de Solos Argilosos

2.1.1 Influência das Propriedades Minerais e efeitos Térmicos na Resistência Viscosa de Solos Argilosos

O comportamento mecânico dos solos argilosos é influenciado pelas ligações químicas entre as camadas dos argilominerais. As partículas da caulinita possuem estrutura lamelar, e suas superfícies são carregadas eletricamente, o que permite a atração de cátions ou ânions através de interações químicas. A caulinita apresenta menor espaço entre suas camadas, resultando em menor capacidade de adsorver água, conforme observado na Figura 1

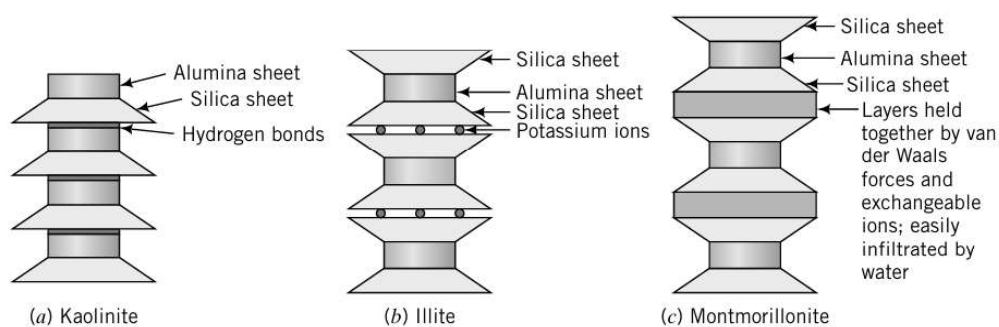


Figura 1 — Partícula de Argilomineral (Budhu, 2010).

Na caulinita as camadas são mantidas unidas por pontes de hidrogênio, enquanto na montmorilonita suas camadas são mantidas por fracas forças de Van der Waals (Budhu, 2010). Essa configuração permite que a montmorilonita e a illita apresentem maior capacidade de adsorver água em comparação à caulinita, devido à sua estrutura cristalina e maior área superficial específica. A montmorilonita, por possuir espaços interlamelares mais amplos e maior capacidade de troca catiônica, apresenta uma maior retenção de água. A illita, embora com estrutura semelhante, possui capacidade de troca catiônica inferior à da montmorilonita (Mitchell; Soga, 2005). Essas diferenças entre a capacidade de adsorção de água influenciam as interações da água com as partículas de argila, que por sua vez, impacta a resistência ao cisalhamento do solo.

Essas diferenças nas propriedades dos argilominerais — como a capacidade de troca catiônica e a estrutura cristalina — influenciam as interações físico-químicas entre as partículas de argila e a água, o que, por sua vez, impacta a resistência ao cisalhamento do solo. A forma como a água interage com as partículas de argila — seja na camada adsorvida, difusa ou na forma livre — influencia o comportamento mecânico do solo.

A água adsorvida forma-se devido à força eletrostática que mantém as partículas de argila fortemente ligadas às moléculas de água. Conforme ilustrado na Figura 2, à medida que essas forças diminuem, origina-se a camada difusa, onde as moléculas de água estão mais fracamente ligadas, até que, a uma maior distância, essa água passa a ser considerada livre (Terzaghi, 1941).

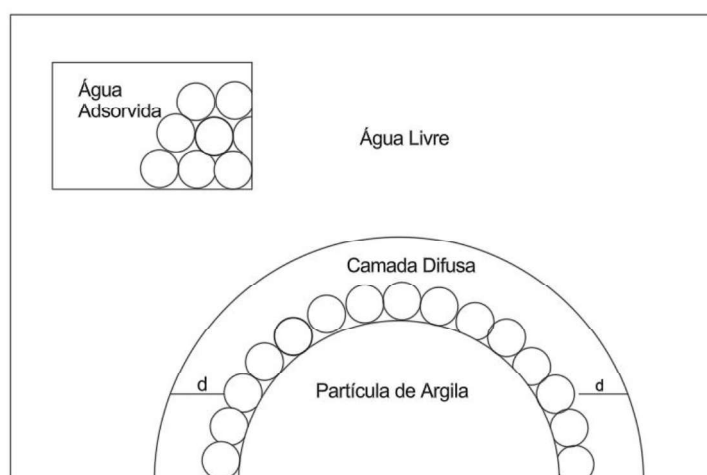


Figura 2 — Desenho Esquemático do Comportamento químico-físico da Água em uma Partícula de Solo.

Essas interações físico-químicas modificam a resposta do solo quando submetidas a esforços de cisalhamento e interferem na resistência viscosa — uma contribuição importante para a resistência ao cisalhamento dos solos. A resistência viscosidade está associada à adsorção da água pelas partículas do solo. Essa água adsorvida dificulta o movimento das partículas, resultando em um aumento da resistência ao cisalhamento do solo.

Fialho (2019) argumenta que a viscosidade é uma propriedade dos fluidos, podendo ser classificada como dinâmica ou absoluta. Quanto menor a viscosidade, maior será a condutividade hidráulica do solo, facilitando o escoamento do fluido (Azhar *et al.*, 2024).

A viscosidade da água é proporcional à energia necessária para a quebra de ligações de hidrogênio (Ni *et al.*, 2019) que são fortes e sensíveis à temperatura (Mitchell; Soga, 2005), interferindo diretamente na interação das moléculas de água com as partículas de solo. Quando as partículas do solo aderem à água, conhecida como água adsorvida, essa interação resulta em uma resistência viscosa.

A resistência viscosa varia com a temperatura e, portanto, influencia a resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento é proporcional à taxa de cisalhamento, desde que o fluido seja newtoniano e esteja submetido a uma tensão de cisalhamento diferente de zero. A água é considerada um fluido newtoniano. Quando um fluido newtoniano é submetido a uma tensão de cisalhamento constante, seu fluxo viscoso se desenvolve ao longo do tempo com uma taxa de deformação de cisalhamento constante (Ter-Martirosyan; Ermoshina; Anzhelo, 2024).

A resistência viscosa pode ser encontrada através da lei da Viscosidade de Newton (1), cujo coeficiente de viscosidade do solo (η) é a razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). A tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade (Schnaid *et al.*, 2021).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad 1$$

A transição entre a água adsorvida e a água livre no solo é influenciada pela variação de temperatura. Com o aumento da temperatura, a força de ligação que mantém as moléculas de água ligadas às partículas de solo é reduzida, facilitando a liberação da água dessas partículas (Gao; Shao, 2015). Isso ocorre quando as ligações intermoleculares se quebram mais facilmente com o aumento da energia cinética. Esse efeito resulta na redução da viscosidade à medida que a temperatura aumenta (Zhang, S. *et al.*, 2022), provocando alterações nas partículas de argila e na viscosidade da água (Towhata *et al.*, 1993; Zhu; Qi, 2018).

A análise da influência da temperatura sobre a viscosidade da água é importante para a compreensão do comportamento térmico dos solos argilosos. Durante o resfriamento, é possível que ocorra uma reversibilidade nesse processo, permitindo que a água remanescente seja novamente adsorvida pelas partículas de solo. Essa hipótese pode contribuir para a interpretação do comportamento de

reversibilidade da deformação volumétrica encontrada por alguns autores (Bentil; Zhou, 2022; Brochard *et al.*, 2017; Hueckel; Baldi, 1990).

Quando se trata da expansão térmica, seus efeitos também podem refletir diretamente na condutividade hidráulica. O aumento das partículas de solo devido à expansão térmica reduz os poros por onde o fluido escoar, levando à diminuição da condutividade hidráulica (Gao; Shao, 2015).

2.2 Comportamento Térmico dos Solos Argilosos

2.2.1 Adensamento: Resposta Termomecânica dos Solos Argilosos

As propriedades de contato entre as partículas de solo, como o atrito, coesão, adesão e capilaridade, influenciam a interação entre os grãos. Tais propriedades podem ser alteradas por agentes externos, dentre os quais estão as mudanças de temperatura ou tensão mecânica. Solos normalmente adensados, quando submetidos a uma tensão mecânica, tendem a se contrair e a reduzir de volume. Entretanto, Huancollo, (2020) observou que, o aumento da temperatura, em condições drenadas, sob tensão total constante, faz com que o solo apresente uma contração adicional. Isso se deve às mudanças de temperatura que alteram as forças interpartículas, levando à redução da viscosidade da água e à consequente reorientação dos grãos.

A redução na viscosidade da água com o aumento da temperatura gera adensamento adicional induzido pelo aquecimento (Brochard *et al.*, 2017; Ze-Jian Chen; Jian-Hua Yin, 2023). Dessa maneira, espera-se que o incremento da temperatura reduza a resistência viscosa, favorecendo o adensamento térmico (Campanella; Mitchell, 1968; Huancollo *et al.*, 2023).

O comportamento térmico dos solos argilosos pode apresentar respostas diferentes em função da variação da temperatura. Entretanto, a resposta volumétrica do solo assemelha-se à resposta da tensão normal, permanecendo inalterada até que este seja exposto a uma temperatura superior à máxima já experimentada (Hueckel; Baldi, 1990; Ze-Jian Chen; Jian-Hua Yin, 2023).

A compreensão da natureza reversível da deformação volumétrica dos solos é importante para analisar seu comportamento mecânico. Foram observados comportamentos distintos em solos argilosos normalmente adensados, submetidos a aquecimento drenado: um solo normalmente adensado, submetido a aumento de

temperatura apresentou deformação volumétrica essencialmente reversível (Campanella; Mitchell, 1968), enquanto um outro solo, igualmente argiloso e normalmente adensado, após resfriamento, apresentou deformação volumétrica irreversível (Towhata *et al.*, 1993). Essa diferença pode ser atribuída a duas hipóteses: primeiro, há uma diferença de temperatura entre as amostras de Campanella; Mitchell, (1968) e Towhata *et al.* (1993) de aproximadamente 30 °C. Além disso, observou-se uma fase de transição entre temperaturas, indicando que a influência da temperatura no solo não é linear.

Outra hipótese pode estar relacionada ao índice de plasticidade dos solos. As propriedades de dilatação e contração das partículas de argila seguem o padrão das propriedades plásticas. Assim, quanto maior a plasticidade da argila maior será sua dilatação ou contração (Mitchell; Soga, 2005) sob temperatura.

O comportamento de fluência dos solos de granulação fina está associado ao índice de plasticidade, que, por sua vez, está relacionado à mudança de volume do solo (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007; Bi *et al.*, 2022; Burghignoli; Desidrei; Miliziano, 1992; Towhata *et al.*, 1993). Além disso, quanto maior for o índice de plasticidade, maior será o impacto da variação da temperatura na deformação volumétrica (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007; Burghignoli; Desidrei; Miliziano, 1992; Demars; Charles, 1982).

De maneira similar, os efeitos da temperatura se manifestam na deformação volumétrica durante o resfriamento. Os efeitos do resfriamento influenciam a resposta do solo à deformação volumétrica (Figura 3). Em solos normalmente adensados ou levemente adensados, ocorrem contrações moderadamente reversíveis, como mostram os resultados de (Brochard *et al.*, 2017; Huancollo *et al.*, 2023).

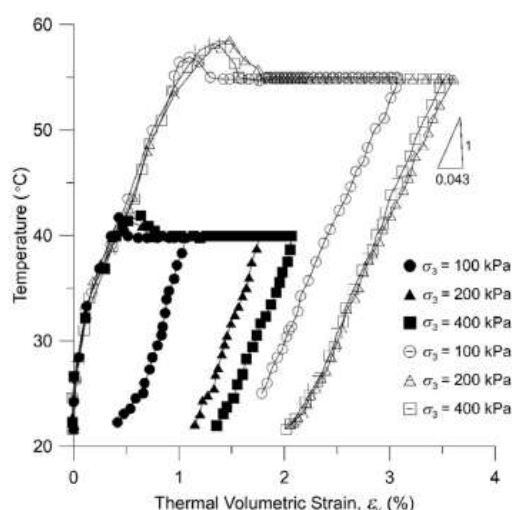


Figura 3 — Reversibilidade Elástica das Variações Volumétricas com a Temperatura (Huancollo *et al.*, 2023).

Uma hipótese alternativa é o efeito secundário na deformação volumétrica em função do aumento da temperatura, que pode ser explicado pela adsorção da água pela partícula de solo. Quando a amostra sofre um resfriamento, mesmo em condições drenadas, ela adsorve uma parte desta água. Ao ser aquecida novamente, essa água é expelida das partículas, esse processo de amolecimento térmico, ocorre repetidamente em pequenas proporções. Dessa forma, a amostra continua a apresentar deformação volumétrica ao acréscimo de temperatura, mesmo após ciclos anteriores de aquecimento e resfriamento.

Um solo argiloso compactado, em razão dos ciclos de temperatura e as tensões normais aplicadas, revelou que a deformação volumétrica depende do seu histórico de tensões. Durante o primeiro ciclo de temperatura, solos sobreadensados apresentaram deformações volumétricas reversíveis. Por outro lado, solos normalmente adensados apresentaram deformações volumétricas irreversíveis, e o comportamento plástico se torna dominante (Lahoori; Rosin-Paumier; Masrouri, 2021).

Quando a temperatura do solo varia, em condições não drenadas, ocorre uma mudança na poropressão, isso se deve a diferença do coeficiente de expansão das partículas e do fluido. Em solos com baixa condutividade hidráulica, a poropressão gerada pela mudança de temperatura provoca diminuição da tensão efetiva. Consequentemente, a dissipação do excesso de poropressão provocará alterações no volume (Tian; Zhang, 2022).

Como ilustrado na Figura 4, o incremento da temperatura resultou em uma deformação volumétrica contrativa. Durante a etapa de resfriamento, observou-se uma diferença na contração térmica entre a água e as partículas do solo. Quando a amostra foi novamente submetida a um aumento de temperatura, a deformação volumétrica contrativa não foi tão significativa. Esse comportamento se assemelha ao adensamento por tensão mecânica.

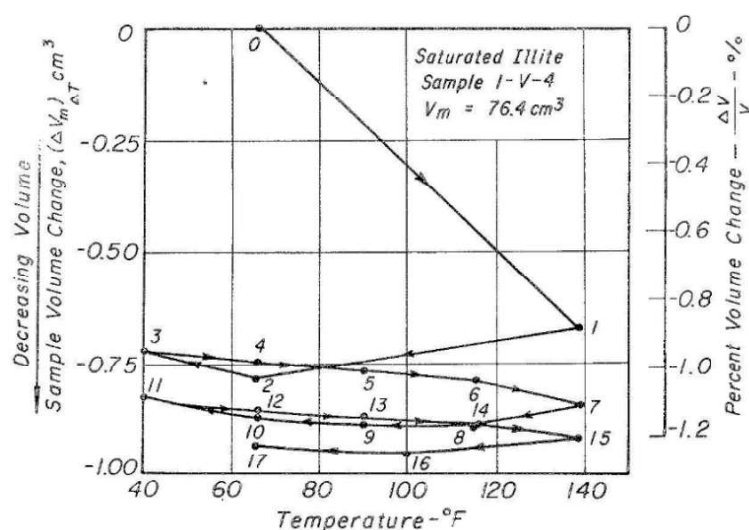


Figura 4 — Influência da Temperatura na Mudança de Volume (Campanella; Mitchell, 1968).

À medida que a temperatura diminui, a diferença na contração térmica faz com que a água presente no sistema seja novamente adsorvida pelas partículas do solo, resultando no fortalecimento da estrutura (Huancollo, 2020). No entanto, com o aumento da temperatura, a água livre escapa do sistema, permitindo que as partículas do solo entrem em contato umas com as outras. Desta forma, ocorre deformação volumétrica contrativa, mesmo que o excesso de poropressão seja nulo, e esse comportamento é irreversível (Towhata *et al.*, 1993).

Ademais, a baixa condutividade hidráulica dos solos argilosos pode levar a uma dilatação volumétrica, mesmo em situação não drenada, provocada pela expansão térmica tanto das partículas do solo quanto da água, cuja magnitude é diretamente influenciada pelo aumento da temperatura aplicada.

Conseqüentemente, quando a expansão térmica ocorre mais rapidamente do que a capacidade do solo de drenar a água, pode resultar inicialmente em uma dilatação volumétrica temporária. Um comportamento semelhante foi encontrado por

(Towhata *et al.*, 1993). Em resumo, o aumento da temperatura gera um excesso de poropressão devido à expansão térmica da água (Campanella; Mitchell, 1968).

Um solo argiloso caulínítico, submetido a aquecimento e cisalhamento não drenado em temperatura ambiente, apresentou menor excesso de poropressão comparado aos solos com aquecimento não drenado e cisalhamento não drenado sob temperatura isotérmica 40 °C, 45 °C e 55 °C, respectivamente (Wang; Shan; Wang, 2020).

Muitos estudos chegaram à conclusão de que o grau de pré-adensamento (OCR) interfere no impacto que a mudança de temperatura provoca na resistência ao cisalhamento (Abuel-Naga; Bergado; Lim, 2007; Demars; Charles, 1982; Plum; Esrig, 1969; Tian; Zhang, 2022).

O aumento da temperatura induz o excesso de poropressão, enquanto o resfriamento causa uma redução. Conforme esperado, a poropressão, para uma determinada temperatura, aumenta com o aumento das tensões normais (Chen; Xu; Xia, 2024). A poropressão induzida por temperatura no solo depende da tensão efetiva inicial, do índice de vazios inicial, coeficiente de expansão térmica da água, coeficiente de expansão térmica das partículas do solo e da magnitude da variação da temperatura (Baldi; Hueckel; Pellegrini, 1988; Campanella; Mitchell, 1968; Tian; Zhang, 2022).

No entanto, neste caso, observa-se na literatura comportamentos diferentes do esperado. Por exemplo, a poropressão positiva foi observada em ensaios drenados (Campanella; Mitchell, 1968; Towhata *et al.*, 1993), gerando uma aparente dilatação volumétrica do solo. Embora esses ensaios tenham sido realizados em condições drenadas, em função do aumento da temperatura, a dilatação térmica das partículas do solo e das moléculas de água ocorreu de forma mais rápida do que a capacidade do solo de dissipar a água, resultando em um acúmulo temporário de poropressão e do volume do solo. Em solos com baixo grau de pré-adensamento (OCR), o aumento da temperatura pode levar a um excesso de poropressão que exceda a tensão efetiva, comprometendo a resistência ao cisalhamento (Tian; Zhang, 2022).

À medida que a tensão efetiva aumenta, a poropressão também aumenta. Isso ocorre porque a tensão efetiva provoca adensamento no solo, reduzindo o índice de vazios. A expansão térmica das partículas do solo e da água provoca um excesso de poropressão, dependente da tensão efetiva aplicada (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza,

2007). Isso explica por que a poropressão aumenta de acordo com o aumento da temperatura (Abuel-Naga; Bergado; Lim, 2007).

Com base no exposto, existe uma relação entre o excesso de poropressão e as cargas mecânicas e térmicas (Bai; Guo; Han, 2014). No entanto, a influência dos diferentes incrementos de temperatura em solos sob aquecimento, seja drenado ou não drenado, na relação tempo versus excesso de poropressão, permanece pouco evidente. Até o momento, parece existir uma lacuna a esse respeito na literatura. Compreender como a temperatura influencia a poropressão é importante para a análise do comportamento de resistência cisalhante do solo, que também é influenciado pelas alterações de temperatura.

2.3 Influência da Temperatura nos Parâmetros de Resistência de Solos Argilosos

2.3.1 Influência na Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento é um parâmetro importante, conhecido como a resistência ao atrito interno de um solo às forças de cisalhamento. Portanto, compreender como as variações de temperatura influenciam o comportamento cisalhante do solo é importante, dada a discordância entre o aumento ou a redução da resistência ao cisalhamento de solos argilosos normalmente adensados e sobreadensados (Ogawa *et al.*, 2020).

Um solo argiloso normalmente adensado submetido a aquecimento de 90 °C apresentou aumento da tensão efetiva (Towhata *et al.*, 1993). Esse aumento resultou em um comportamento descrito pelo autor como “quase adensado”, o qual, em termos técnicos, corresponde ao que atualmente é denominado adensamento térmico.

Solos submetidos a aquecimento drenado tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento quando comparados aos levados à ruptura em temperatura ambiente (Burghignoli; Desideri; Miliziano, 1995; Huancollo, 2020; Kuntiwattanakul *et al.*, 1995). O aquecimento aumentou a rigidez do solo e a resistência ao cisalhamento (Burghignoli; Desideri; Miliziano, 1995; Huancollo, 2020; Kuntiwattanakul *et al.*, 1995; Towhata *et al.*, 1993).

Em solos normalmente adensados submetidos a aquecimento não drenado, a interação desses fatores tende a apresentar um aumento da poropressão positiva e

redução da resistência ao cisalhamento (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007; Campanella; Mitchell, 1968). Este comportamento pode ser mais bem explicado por (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007), que concluíram que a tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento viscosa entre as partículas da água adsorvida diminuem em solos normalmente adensados sob aquecimento não drenado levadas à ruptura sem resfriamento. Esse comportamento é resultado do aumento da poropressão e das forças físico-químicas entre as partículas de solo e a molécula de água.

No entanto, Wang; Shan; Wang, (2020) não observaram redução da resistência ao cisalhamento com o aumento da temperatura para 40 °C, 45 °C e 55 °C, respectivamente. Por outro lado, Burghignoli; Desideri; Miliziano (2000), observaram um ligeiro aumento da resistência ao cisalhamento ao comparar solos argilosos normalmente adensados, sendo um ensaio realizado com adensamento à temperatura ambiente e o outro aquecimento drenado, seguido de cisalhamento não drenado, com uma diferença de temperatura de 30 °C.

Analisando os resultados obtidos e estabelecendo uma correlação entre os estudos de Burghignoli; Desideri; Miliziano, (2000) e Wang; Shan; Wang, (2020), que submeteram suas amostras a temperaturas similares, é possível concluir que esse comportamento pode ter sido induzido pela redução da água adsorvida, provocando maior proximidade entre as partículas de solo. Essa condição faz com que o solo tenda naturalmente a aumentar sua resistência ao cisalhamento. Portanto, o incremento da resistência está mais associado à modalidade de aquecimento do que às alterações na temperatura.

As propriedades coloidais que estão relacionadas à facilidade da troca de íons, influenciam a interação solo-água e, por consequência, o adensamento térmico. Adicionalmente, as incertezas relacionadas ao impacto da mudança de temperatura na resistência ao cisalhamento requerem mais pesquisas (Azhar *et al.*, 2024; Mohammadi *et al.*, 2022).

Solos sobreadensados, devido à poropressão negativa, esperava-se que apresentassem um aumento da resistência ao cisalhamento. Este comportamento é resultado do grau de pré-adensamento (OCR); esses solos possuem menor índice de vazios e, quando submetidos a uma tensão mecânica, tendem a expulsar os grãos, resultando no aumento da resistência ao cisalhamento. Por outro lado, solos sobreadensados submetidos a aumento de temperatura tendem a apresentar menor

excesso de poropressão à medida que o grau de pré-adensamento (OCR) aumenta (Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007; Tian; Zhang, 2022).

Por outro lado, um comportamento diferente foi observado em solos com OCR até 1,5: o excesso de poropressão gerado reduziu com o aumento da temperatura. Já para solos com OCR maior ou igual a 3, o excesso de poropressão aumentou com o aumento da temperatura. Além disso, esses solos foram submetidos a aquecimento drenado e cisalhamento não drenado à medida que a temperatura aumentou independente do OCR, a resistência ao cisalhamento também aumentou (Abuel-Naga; Bergado; Lim, 2007).

Diante do exposto, é evidente que a resistência ao cisalhamento de solos argilosos é influenciada pela mudança de temperatura. Embora existam diversas pesquisas sobre o comportamento termomecânico dos solos argilosos, ainda há algumas lacunas que não foram preenchidas. A influência da plasticidade, tempo, mineralogia, interação solo-água, tensões e o grau de pré-adensamento (OCR) demandam investigação mais aprofundada.

2.3.2 Resistência Residual

A resistência ao cisalhamento residual dos solos é influenciada pela composição mineralógica, pelos limites de Atterberg, pelo teor de umidade, pela velocidade de cisalhamento e pela temperatura (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018; Garcia *et al.*, 2023; Lian *et al.*, 2020a, 2020b; Wang; Shan; Wang, 2020; Wang *et al.*, 2020; Wen *et al.*, 2007). No entanto, não depende do histórico de tensões (Loche; Scaringi, 2023; Zheng *et al.*, 2022).

A principal diferença entre um estado crítico e a resistência residual está no alinhamento das partículas. No estado crítico, as partículas estão dispostas de forma aleatória (Vasconcelos, 1992), enquanto, na resistência residual, ocorre um alinhamento mais ordenado, ou seja, é obtida quando as partículas de solo se aliam em uma orientação face a face na direção do cisalhamento e um aumento do deslocamento linear não provoca uma redução da resistência ao cisalhamento (Castellanos; Brandon; Kingrey, 2022).

O coeficiente de atrito do solo é influenciado pelo grau de orientação das partículas mesmo sob diferentes condições, quando o solo foi saturado com água

destilada e outro com NaCl, não apresentou diferenças significativas (Di Maio; Scaringi; Vassallo, 2015).

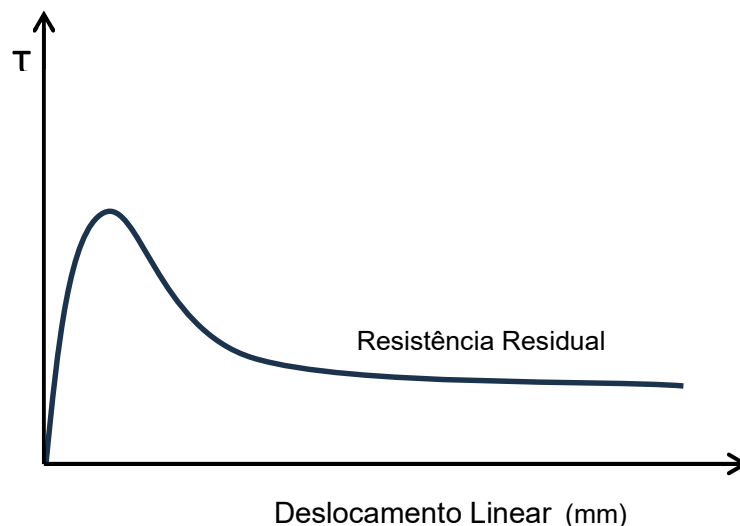


Figura 5 — Comportamento do Solo na Resistência Residual.

Na Figura 5, observa-se que, por se tratar de um solo sobreadensado, há um pico de resistência ao cisalhamento devido ao aumento da tensão normal aplicada. Posteriormente, ocorre uma redução nessa resistência, à medida que o grau de orientação das partículas aumenta. Essa reorganização progressiva das partículas continua até que o solo atinja sua resistência residual, caracterizada por um estado estável e constante.

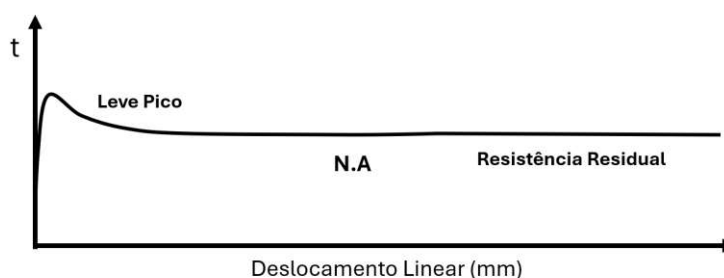


Figura 6 — Comportamento do Solo Argiloso Normalmente Adensado na Resistência Residual.

De acordo com a Figura 6, solos argilosos normalmente adensados não possuem diferenças significativas entre o pico e a resistência residual. Esse comportamento ocorre de acordo com a fração de argila. Essa queda da resistência pós-pico refere-se à reorientação de partículas de argila (Vasconcelos, 1992). Este

comportamento explica por que em solos com mais de 40% de argila não apresentam diferença significativa entre o pico e a resistência residual (Skempton, 1985).

A resistência residual tende a diminuir com o aumento do índice da plasticidade (Xu *et al.*, 2018), devido à sua maior facilidade de deformação. Solos com baixo índice de plasticidade apresentam menor recuperação da resistência ao cisalhamento residual quando comparado aos altamente plásticos (Bhat *et al.*, 2014).

O limite de plasticidade é a umidade mínima em que o solo pode ser moldado sem se romper. Estudos indicam que o aumento do teor de umidade reduz a resistência ao cisalhamento residual (Suzuki *et al.*, 2002; Wang; Cong, 2019). Essa redução é independente das mudanças na tensão normal e da taxa de cisalhamento (Wang; Cong, 2019).

A relação entre a resistência residual e a tensão normal pode ser mais bem compreendida conforme ilustrado na Figura 7. Observa-se que, sob tensões normais inferiores a 100 kPa, o coeficiente de atrito interno do solo (τ_r/σ_n) e o ângulo de atrito residual (ϕ_r) apresentam variações mais significativas, indicando um comportamento não linear, conforme apontado por (Xu *et al.*, 2018).

Por outro lado, nota-se que as curvas tendem à estabilização a partir da tensão normal de 100 kPa, não exibindo variações significativas na resistência residual, sendo praticamente constantes. Essa tendência observada na Figura 7, embora inicialmente possa parecer contraditória em razão do intervalo de tensões normais em que a estabilização ocorre, é compatível com valores de referência encontrados na literatura — 100 kPa (Hawkins; Privett, 1985), 150 kPa (Xu *et al.*, 2018) e 200 kPa (Vasconcelos, 1992).

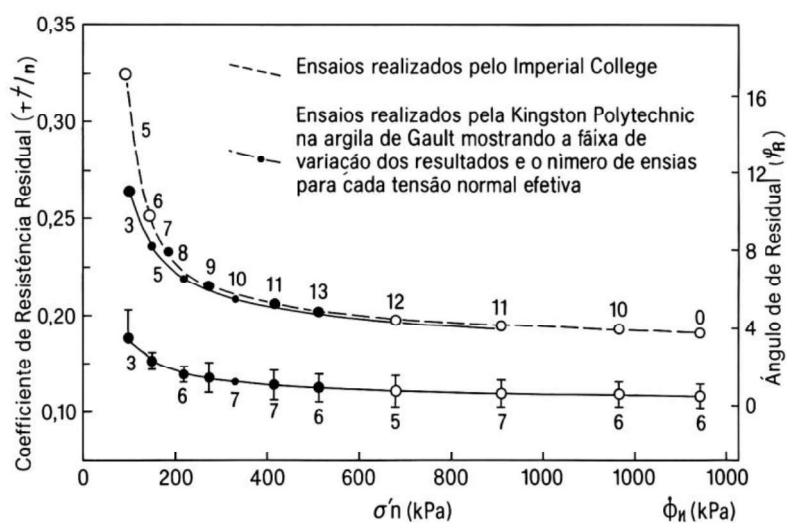


Figura 7 — Relação Entre o Coeficiente de Resistência Residual em Função da Tensão Normal (Bromhead, 1979).

Esse comportamento se deve ao fato de que, à medida que a tensão normal aumenta, o coeficiente de atrito do solo tende a diminuir. Essa redução está associada ao aumento do grau de orientação das partículas, influenciado pelo aumento das tensões normais, até que o ângulo de atrito atinja valores praticamente constantes (Feng, 2024).

A composição granulométrica afeta a resistência residual; quanto maior a fração de partículas finas, menor será essa resistência (Miao; Wang, 2022), o que sugere que a dependência dessa taxa pode ser influenciada pelas propriedades físicas do solo (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018; Li *et al.*, 2013).

A influência da taxa de cisalhamento na resistência residual foi investigada na literatura, buscando compreender como suas variações impactam essa resistência (Ma *et al.*, 2021). No entanto, os resultados relatados são variados: alguns autores observaram um aumento da resistência residual com o aumento da taxa de cisalhamento (Habibbeygi; Nikraz, 2018; Raj Bhat, 2022), enquanto outros observaram o efeito oposto: redução da resistência residual à medida que a taxa de cisalhamento aumentou (Meehan; Brandon; Duncan, 2007; Wang *et al.*, 2020). Há ainda estudos que indicam maior resistência residual em taxas de cisalhamento mais lentas (Ma *et al.*, 2021; Wang; Cong, 2019).

Em menores taxas de cisalhamento, a resistência residual é alcançada rapidamente, sendo necessário um deslocamento pequeno. Por outro lado, quanto

maior a taxa, maior o deslocamento necessário, além de ocorrer flutuações na resistência residual (Li *et al.*, 2017).

Taxas de cisalhamento mais lentas são utilizadas para garantir as condições de drenagem (Akis; Mekael; Yilmaz, 2020; Duong; Suzuki; Van Hai, 2018) e evitar a geração do excesso de poropressão (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018). Além disso, é necessário destacar que uma velocidade mais alta no ensaio de cisalhamento de anel pode levar a maiores flutuações na resistência residual, entretanto, estas não parecem apresentar efeito na resistência residual global (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018).

Durante o cisalhamento lento, o excesso de poropressão é dissipado tanto no estado de pico quanto no residual. Contrariamente durante o cisalhamento rápido, o excesso de poropressão não tem tempo suficiente para se dissipar e isso provoca uma redução da tensão normal efetiva e por consequência da resistência de pico e residual (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018; Feng, 2024).

A resistência residual de um solo argiloso, quando submetido a uma taxa de cisalhamento constante, revela a resistência viscosa. Em outras palavras, o aumento da taxa de cisalhamento provoca um aumento da resistência viscosa, que cresce proporcionalmente ao logaritmo dessa taxa, influenciando o aumento da tensão de cisalhamento (Ter-Martirosyan; Ermoshina; Anzhelo, 2024). Outro motivo do aumento rápido da resistência residual pode ser a mudança no modo de cisalhamento, de lento para turbulento (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018).

O efeito da taxa de cisalhamento na resistência residual pode estar associado a transições na zona de cisalhamento. Quanto maior a taxa de cisalhamento, maior é a amplitude das flutuações da tensão de cisalhamento (Li *et al.*, 2017). Em taxas de cisalhamento mais baixas, o modo de cisalhamento é deslizante permitindo um alinhamento das partículas do solo na superfície de cisalhamento. Por outro lado, quando o modo de cisalhamento é turbulento as partículas não têm tempo de se alinhar, o que provoca um aumento da resistência residual.

O aumento da resistência residual com o aumento da taxa de cisalhamento pode ser explicado pelas mudanças na estrutura das zonas de cisalhamento, onde ocorre a transição do modo de cisalhamento deslizante para o turbulento (Feng, 2024).

Essa influência pode ser atribuída a resistência viscosa, a mudança no modo de cisalhamento (Duong *et al.*, 2023; Raj Bhat, 2022), fração de argila, teor de água, tensão normal (Wang *et al.*, 2020; Wang; Cong, 2019), índice de plasticidade e

condutividade hidráulica (Meehan; Brandon; Duncan, 2007) e ao aumento das tensões normais que tornam mais evidentes o efeito da taxa de cisalhamento (Ma *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

A variação da temperatura afeta a viscosidade da água influenciando o contato entre as partículas do solo. Solos com maior teor de argila e maior plasticidade são mais afetados pela temperatura. Além disso, o ângulo de atrito induzido pela temperatura aumenta nos solos de maior plasticidade (Garcia *et al.*, 2023).

Na argila caulínica, observou-se um aumento da resistência residual com o aquecimento ou resfriamento (Ung; Zeinali; Abdelaziz, 2023). Esse comportamento pode justificar a influência da mineralogia na resistência residual, considerando que a illita e a montmorilonita desenvolvem maior quantidade de água adsorvida em comparação com o caulim.

A esmectita retém maior quantidade de água adsorvida em comparação à argila caulínica (Hueckel; Baldi, 1990). Ao contrário da argila caulínica, em solos esmectitas observou-se um efeito positivo da temperatura sob taxas de cisalhamento lentas (Shibasaki; Matsuura; Hasegawa, 2017).

Um aumento de resistência no caulim foi notado no aquecimento com uma taxa de 1,78 mm/min (Loche; Scaringi, 2023). Adicionalmente, a resistência parcialmente drenada do caulim pode ser expressa em taxas de cisalhamento superiores a 0,5 mm/min (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018).

O efeito positivo da taxa de cisalhamento reduziu com o aumento do grau de pré-adensamento (OCR) (Duong; Suzuki, 2021). Embora, em teoria, o grau de pré-adensamento (OCR) não interfira na resistência residual, uma análise na microestrutura pode indicar que solos com grau de pré-adensamento (OCR) maiores apresentam menor espaçamento entre as partículas. Inicialmente, seria esperado que isso gerasse um excesso de poropressão negativa, o que tenderia a aumentar a resistência residual. Mas o caulim apresentou comportamento contrativo, sugerindo que o efeito da poropressão negativa pode ser irrelevante (Duong; Suzuki, 2021).

Ao contrário do excesso de poropressão negativa, espera-se que, devido ao menor volume de água adsorvida, a resistência viscosa fosse menor em solos sobreadensados, o que de fato ocorre. Esse comportamento pode explicar por que o efeito positivo da taxa de cisalhamento se torna menos significativo à medida que o grau de pré-adensamento (OCR) aumenta.

2.4 Equipamentos para a Determinação da Resistência Residual dos Solos

Embora parte dos experimentos existentes relacionados às propriedades de resistência do solo concentraram-se em ensaios triaxiais ou de cisalhamento direto, esses métodos apresentam algumas limitações quanto a obtenção da resistência residual.

Para que um solo atinja a resistência residual, são necessárias grandes deformações. No entanto, o ensaio triaxial apresenta limitações para a determinação dessa resistência, pois não permite medir a resistência ao longo de uma superfície de deslizamento (Fang *et al.*, 2019).

Já para a obtenção da resistência residual na caixa de cisalhamento direto, utiliza-se o método de reversão, onde os deslocamentos são em sentidos opostos, prejudicando o alinhamento das partículas e resultando em valores de resistência residual maiores comparados ao equipamento de cisalhamento de anel (Stark; Eid, 1992). Desta maneira, o índice de resistência ao cisalhamento e suas propriedades podem não ser representadas com exatidão (Xu *et al.*, 2018).

A principal preocupação com o cisalhamento direto é a possibilidade de superestimar o ângulo de atrito residual do solo em relação ao “ring shear” (Silva, 2003; Stark; Eid, 1992). Além disso, quando uma amostra não está sujeita a uma deformação cisalhante contínua em uma direção, resulta em uma orientação parcial das partículas de argila (Stark; Eid, 1992).

Na busca por equipamentos que pudessem medir a resistência residual de forma efetiva, foram desenvolvidos diversos equipamentos ao longo do tempo (Bishop *et al.*, 1971; Bromhead, 1979; LaGatta, 1970). Esses equipamentos foram projetados para utilizar amostras anelares, o que representou uma vantagem já que a área da seção transversal do plano de cisalhamento permanece inalterada durante o ensaio, permitindo o deslocamento ininterrupto da amostra, tornando-o adequado para determinação da resistência residual em solos argilosos (Bishop *et al.*, 1971).

No início houve preocupação quanto à representatividade dos resultados e à correta utilização do solo, seja deformado ou indeformado. Entretanto, com a evolução das pesquisas, passou-se a admitir que o ângulo de atrito em resistência residual independe do estado original do solo (LaGatta, 1970; Petley, 1966).

Outras questões como o atrito metal-metal, tensões normais e cisalhantes não uniformes ainda eram um desafio. O equipamento de cisalhamento de anel modelo

Bishop trouxe soluções para reduzir essas incertezas. O formato anelar da amostra com dimensões adequadas permitiu que a distribuição das tensões fossem mais uniformes (Bishop *et al.*, 1971).

O equipamento foi projetado para que a resistência ao cisalhamento obtida fosse a mínima. Para isso, foi adotado um diâmetro interno suficientemente grande em relação ao externo, criando uma seção estreita para a moldagem da amostra, o que permitiu assumir que as tensões não uniformes foram reduzidas a níveis aceitáveis.

O equipamento possui diâmetro interno de 102 mm externo de 152 mm, e altura de 19 mm, com capacidade máxima de tensão normal de aproximadamente 979 kPa e tensão de cisalhamento de 489 kPa. A amostra é confinada lateralmente com uma tensão normal constante sob um deslocamento angular e o cisalhamento ocorre com a parte superior fixa enquanto a parte inferior é rotativa (Figura 8).

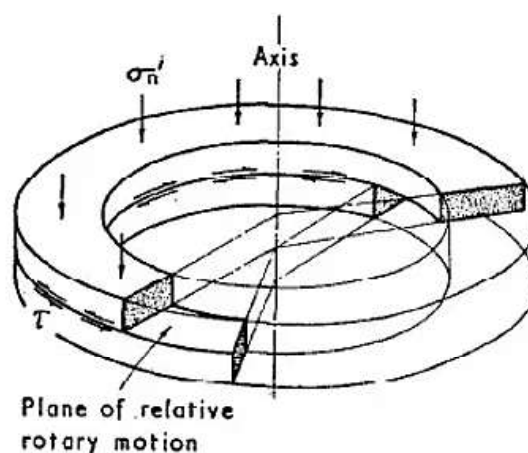


Figura 8 — Amostra de Teste em Cisalhamento de Anel (Bishop *et al.*, 1971).

Além disso, tanto a tensão normal quanto a força de cisalhamento eram recebidas do solo através do plano de cisalhamento angular, permitindo que ambas fossem determinadas com precisão. Ademais, o modelo Bishop possui controle de folga entre os anéis de confinamento, o que permite resolver, ou ao menos minimizar, problemas ligados ao atrito metal-metal (Bishop *et al.*, 1971).

Após os avanços do modelo Bishop, outro equipamento de cisalhamento de anel foi desenvolvido na década de 1970 por Bromhead (1979) que se tornou conhecido por ser um projeto simples e de baixo custo, permitindo que seu uso se tornasse rotina nos laboratórios.

O modelo foi projetado para acomodar uma amostra com seção transversal estreita, apresentando anel de moldagem com diâmetro externo de 100 mm, diâmetro interno de 70 mm e espessura de 5 mm. Uma vantagem deste equipamento é a presença de um volante de rotação lateral que possibilita aplicar grandes deformações no solo de forma manual. Outra vantagem é a visualização direta do deslocamento através de uma régua circular com medidas angulares, acoplada ao equipamento (Bromhead, 1979).

O plano de cisalhamento se desenvolve na interface solo/pedra porosa superior, ou em sua proximidade. Dessa forma, a pedra porosa contribui para a reorientação das partículas do solo durante o deslocamento contínuo, de modo que os resultados com esse equipamento apresentam boa representatividade com os casos históricos de campo independentemente da estrutura inicial da amostra (Stark; Eid, 1992).

Além disso, as técnicas simples na preparação da amostra e as maiores velocidades no equipamento, associadas à baixa espessura do corpo de prova contribuem para que o tempo de ensaio seja reduzido. Isso acontece porque a amostra é remoldada. Dessa maneira, é desnecessário preservar a estrutura original do solo. Levando em consideração tais características, o ensaio de cisalhamento em anel, realizado no equipamento modelo Bromhead, é capaz de fornecer resultados com precisão comparáveis aos obtidos por outros equipamentos (Bromhead; Curtis, 1983).

Ambos os equipamentos, tanto o modelo Bishop desenvolvido por Bishop et al. (1971), quanto o modelo Bromhead desenvolvido por Bromhead (1979) são utilizados em ensaios laboratoriais atualmente. A principal diferença entre esses modelos são as dimensões físicas. O modelo Bishop acomoda maior volume de solo, permitindo ensaios com solos de granulação maiores, enquanto o modelo Bromhead é indicado para solos com partículas de solo passantes na peneira #40.

Por fim, testes comparativos entre os modelos Bishop e Bromhead mostraram que os resultados de resistência residual eram similares, indicando que qualquer dispersão está mais associada a natureza do solo do que ao equipamento (Ramsey et al., 1998).

CAPÍTULO 3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

O capítulo descreve os procedimentos e técnicas aplicadas na realização dos experimentos para estudar a resistência residual ao cisalhamento do Solo Caulim Speswhite sob diferentes temperaturas. Os equipamentos, modificações, softwares que foram utilizados são apresentados e após os procedimentos padronizados escolhidos bem como sua justificativa.

A pesquisa desenvolvida foi de caráter experimental e envolveu a realização de ensaios com o equipamento Bromhead ring shear WF25850, que foi modificado para adequar-se aos objetivos da pesquisa. O método de ensaio padronizado visou garantir a qualidade dos resultados. Além disso, os procedimentos deste ensaio foram testados e refinados até que uma padronização eficaz fosse encontrada. Os métodos foram definidos com base nas normas ASTM (American Society for Testing and Materials) e na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), além do manual do equipamento.

Através deste ensaio serão obtidos parâmetros como: tensão normal; deslocamento de cisalhamento; tensão de cisalhamento; resistência residual e temperatura.

Para obtenção desses resultados, foram realizados ensaios no equipamento de cisalhamento de anel modelo Bromhead modificado neste trabalho, para controle de temperatura.

Os dados foram coletados por um sistema de aquisição desenvolvido especificamente para o equipamento usado neste trabalho. A modificação do equipamento e o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados são descritos detalhadamente neste capítulo.

3.1.1 Materiais

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro possui o equipamento de cisalhamento de anel apparatus modelo Bromhead ring shear WF25850 adquirido em 1995 (Figura 9).

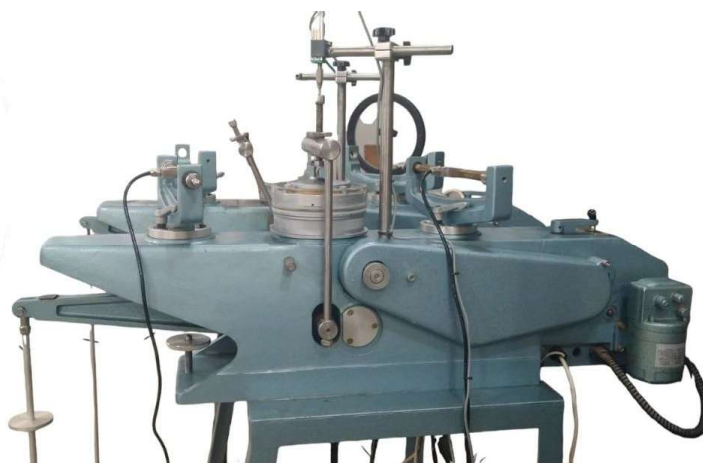


Figura 9 — Vista Lateral do Equipamento de Bromhead.

O aparelho convencional é utilizado para ensaios de resistência ao cisalhamento residual. O anel de moldagem possui espessura de 5 mm, diâmetro externo de 100 mm e interno de 70 mm, possuindo um volume (v) inicial de 20 cm^3 (Figura 10). A tensão normal é aplicada por meio de um braço de alavanca com relação igual a 1:10 e o corpo de prova é comprimido verticalmente entre a placa superior e o disco inferior (anel de moldagem), com interior de bronze poroso (Figura 11).



Figura 10 — a) Diâmetro Externo em Milímetros do Anel de Moldagem; b) Diâmetro Interno em Milímetros do Anel de Moldagem.



Figura 11 — a) Vista da área Externa da Placa Superior do Equipamento de Cisalhamento de Anel; b) Vista da Área Interior da Placa Superior do Equipamento de Cisalhamento de Anel.

As deformações verticais são medidas através de um sensor de deslocamento anexado na haste vertical. O disco inferior é acoplado a uma caixa de engrenagens e a um motor que permitem impor a taxa de cisalhamento escolhida para a rotação (Tabela 1).

Tabela 1 — Taxas de Cisalhamento do Equipamento de Cisalhamento de Anel Bromhead — 1979 .

Posição/ Engrenagens	Velocidade de Cisalhamento ⁽¹⁾									
	60-30		54-36		45-45		36-54		30-60	
	Graus	mm	Graus	mm	Graus	mm	Graus	mm	Graus	mm
A	60	44,52	45	33,39	30	22,26	20	14,84	15	11,13
B	12	8,90	9	6,68	6	4,45	4	2,97	3	2,23
C	2,4	1,78	1,8	1,34	1,2	0,89	0,800	0,59	0,600	0,45
D	0,480	0,36	0,360	0,27	0,240	0,18	0,160	0,12	0,160	0,12
E	0,096	0,07	0,72	0,53	0,48	0,36	0,032	0,024	0,024	0,018

Fonte: Manual do Equipamento de Bromhead (1979).

Nota (1): As velocidades de cisalhamento refere-se ao tempo em minuto para rotação.

O corpo de prova é cisalhado girando a parte inferior da caixa de cisalhamento, enquanto a placa superior permanece parada. Essa placa possui um braço de torque que reage contra um par de hastes transmissoras do torque, o que permite a aplicação de um momento binário ao corpo de prova, cujo valor é medido através das células de carga. Desta forma ocorre a ruptura do corpo de prova ao longo da superfície superior.

À medida que a placa superior é coberta por uma camada fina de partículas de argila e se move em relação às partículas abaixo, no anel de moldagem, o cisalhamento contínuo provoca a reorientação das partículas ao longo do plano de ruptura, levando à obtenção da resistência residual (Meehan; Brandon; Duncan, 2007).

Para a investigação dos efeitos da temperatura no comportamento do solo, foi necessário adaptar o equipamento de cisalhamento de anel para permitir o controle térmico. A modificação do aparelho incluiu a implementação de um sistema de aquecimento baseado em módulos peltier, localizadas sobre a placa superior. Isso possibilitou a simulação de condições térmicas específicas, permitindo a análise da resistência ao cisalhamento residual do solo Caulim Speswhite sob diferentes temperaturas. A Figura 12 apresenta o desenho esquemático das modificações realizadas, enquanto a Figura 13 exhibe a imagem real da modificação na placa superior. O equipamento de cisalhamento de anel modificado mantém a capacidade

de reproduzir todos os ensaios do aparelho tradicional, agora com o potencial de incremento de temperatura.

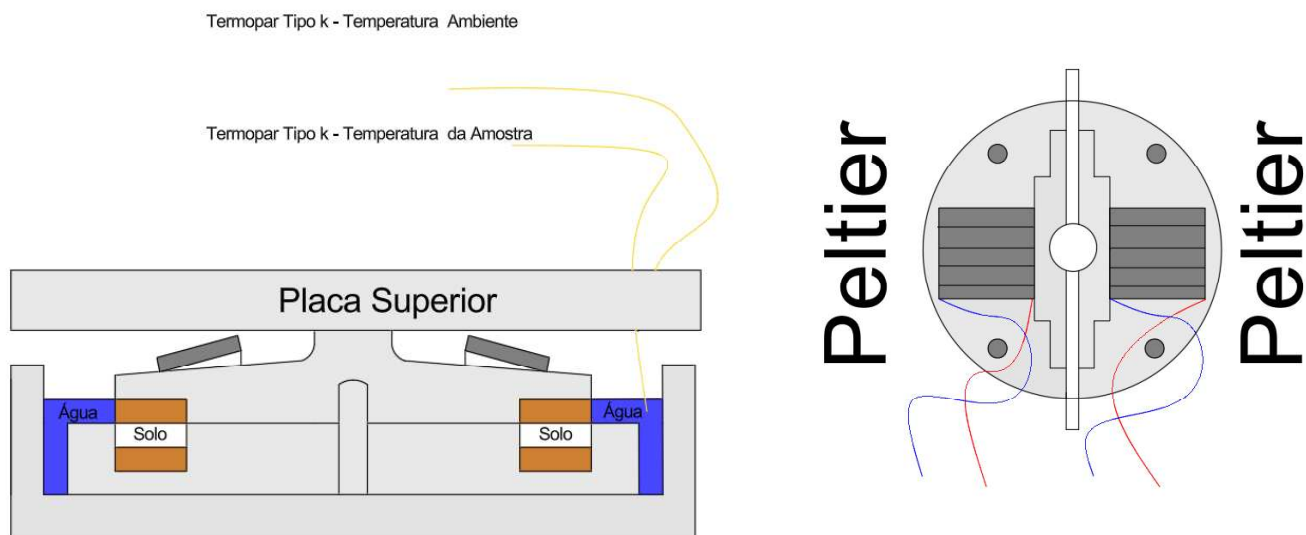


Figura 12 — Desenho Esquemático do Sistema para Controle de Temperatura.

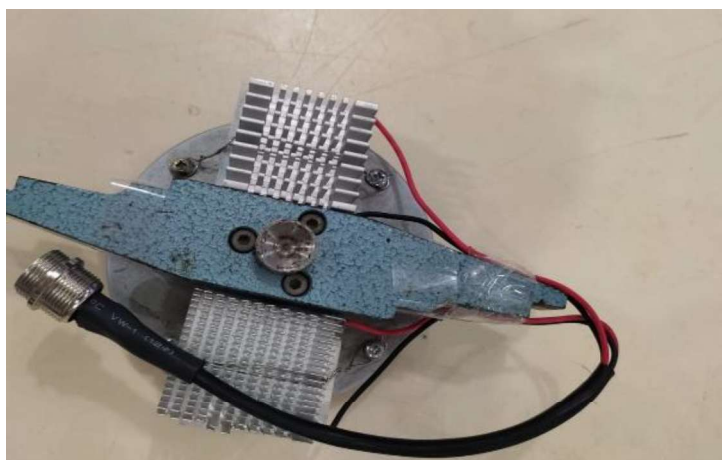


Figura 13 — Placa Superior Modificada para Mudança de Temperatura.

O aparelho foi equipado com dois termopares do tipo K: um para medir a temperatura da água e outro para a temperatura ambiente. Um sistema de bombeamento foi utilizado, uma vez que o aumento da temperatura provoca um aumento da evaporação da água (Figura 14). Uma bomba elétrica foi conectada a uma caixa d'água com capacidade de 300 ml e, através de uma mangueira com diâmetro de 1,75 mm, reabastecia o recipiente de acrílico.

O sistema utiliza um sensor capacitivo com detecção mínima de 1 mm, montado na haste vertical. Este sensor foi posicionado para monitorar o nível da água

no recipiente de acrílico e foi conectado a um sistema de controle que acionava uma bomba elétrica quando o nível de água diminuía (Figura 16).

Este método foi adotado para que o recipiente acrílico permanecesse constantemente preenchido com água, sem comprometer a temperatura estabelecida para o ensaio, uma vez que a adição da água era suficientemente pequena (Figura 15). Embora, à água não esteja em contato direto com a amostra, sua presença é fundamental para manter a umidade planejada, ou garantir que ela varie o minimamente durante todo o ensaio.

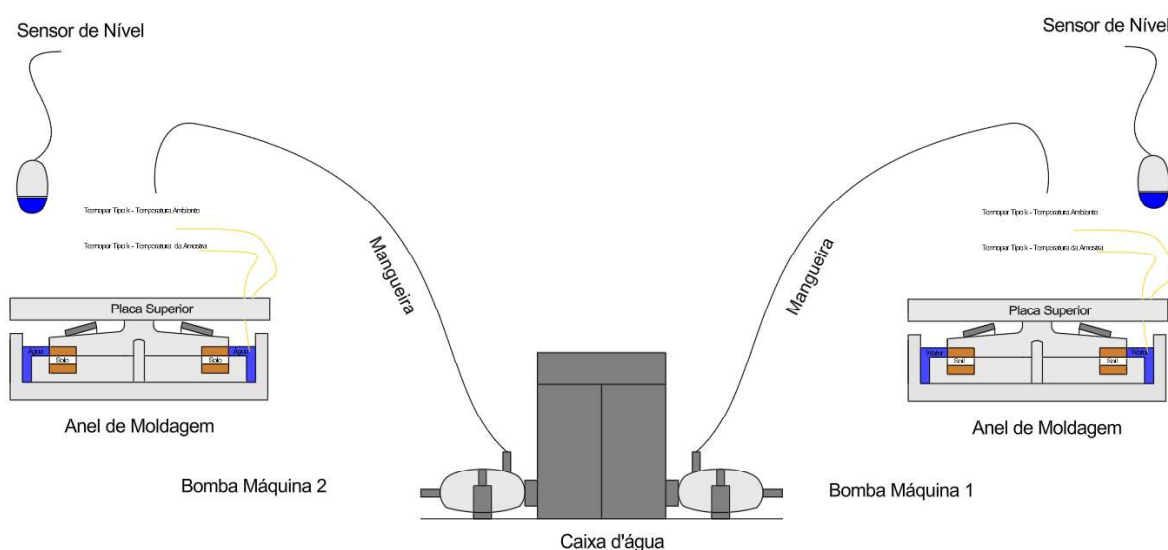


Figura 14 — Desenho Esquemático para Sistema de Bombeamento.



Figura 15 — Caixa d'água com Bombas para Controle do Nível d'água.

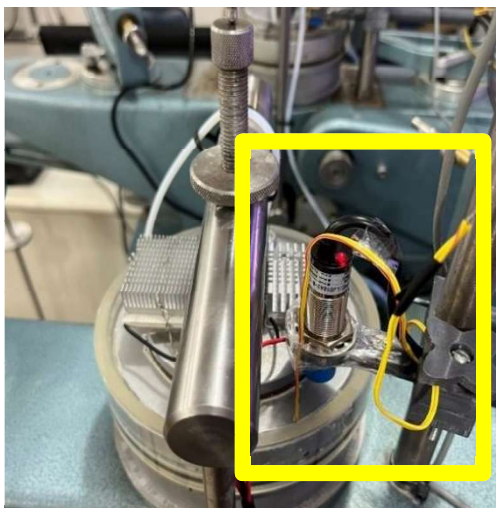


Figura 16 — Sensor de Temperatura e Sensor de Nível d'água.

O transdutor linear de posição (LVDT) foi utilizado para monitorar o deslocamento vertical da amostra. Os dados para medição do cisalhamento são adquiridos por meio de duas células de carga do tipo S (Figura 17), com capacidade de 50 kg cada. Essas células de carga são equipadas com strain gauges (extensômetros).

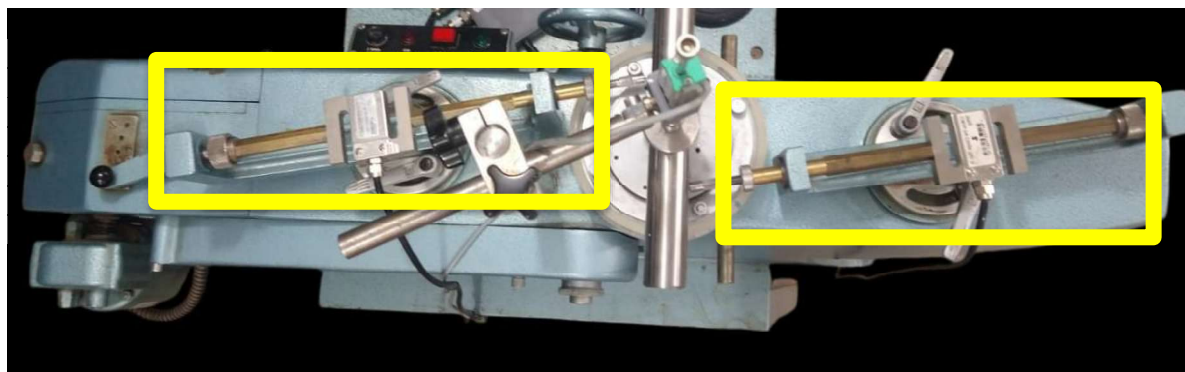


Figura 17 — Células de Carga Para Ensaios.

O programa utiliza uma placa de aquisição com dois conversores analógicos-digitais (ADCs), cada um operando a 5 volts. A placa conta com um chip (ADC) de 24 bits e outro com 10 bits (Figura 18). Essa configuração foi escolhida devido à necessidade de aquisição de dados dos sensores com comportamento linear, isso significa que a calibração dos sensores foi por meio de uma regressão linear. A explicação quanto ao procedimento de calibração dos sensores utilizados na pesquisa pode ser vista em APÊNDICE A — Calibração dos Sensores

As células de carga receberam o conversor de 24 bits, para capturar variações mínimas que pudessem ocorrer na medição de força, enquanto o LVDT, com 10 bits, foi suficiente, uma vez que a medida do deslocamento seria em milímetros.



Figura 18 — Sistema de Aquisição dos Dados.

A interface do programa foi desenvolvida para possibilitar o monitoramento em tempo real do comportamento do solo (Figura 19 a Figura 21). Com essa interface, foi possível acompanhar como o solo responde a mudanças específicas, como tensão normal, temperatura e taxa de cisalhamento. Essa funcionalidade permitiu identificar rapidamente possíveis problemas na aquisição de dados ou no comportamento da amostra, facilitando a identificação precisa da origem das falhas, seja de origem geotécnica (solo), mecânica (equipamento) ou de software (programa), o que tornou o processo de correção mais rápido e eficiente.



Figura 19 — Interface do Programa Controle de Temperatura.



Figura 20 — Interface do Programa Monitoramento dos Sensores de Carga e LVDT.



Figura 21 — Interface do Programa Monitoramento do Comportamento do Solo.

O solo em estudo, destinado à formação do corpo de prova para a realização dos ensaios, consistiu em um tipo de argila padrão, Caulim Speswhite. Trata-se de um solo padronizado para testes em laboratórios, vendido comercialmente e retirado dos depósitos no sudoeste da Inglaterra por meio de mineração a céu aberto, exibindo uma coloração branca.

A caracterização do Caulim Speswhite foi realizada em conformidade com as normas regulamentadoras da ABNT, visando a obtenção dos parâmetros físicos do solo para as avaliações e interpretações subsequentes. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos a partir dos ensaios de caracterização do solo, que abrangem a determinação dos limites de Atterberg, análise da densidade real dos grãos. A análise

química por metais (Tabela 3) e por óxido (Tabela 4). Já a Tabela 5 apresenta os valores de coeficiente de adensamento vertical do solo Speswhite obtidos por meio do ensaio de adensamento unidimensional.

Tabela 2 — Resumo das Propriedades Geotécnicas da Argila Caulim Speswhite — 2024.

Descrição	Parâmetros
Limite de Liquidez	59%
Limite de Plasticidade	27%
Índice de Plasticidade	32%
Índice de Consistência	0,54
Densidade dos Grãos	2,58g/cm ³
Atividade Coloidal	0,32
Umidade Higroscópica	0,94%

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A análise química do solo Caulim Speswhite estão apresentadas na Tabela 3 e Tabela 4. Os resultados das tabelas indicaram predominância de silício e alumínio e teores de dióxido de silício (SiO₂) de 50,51% e óxido de alumínio (Al₂O₃) de 44,42%.

Tabela 3 — Análise Química por Metais do Solo Caulim Speswhite por Metais — 2024.

Elemento	Símbolo	Percentual
Silício	Si	49,61%
Alumínio	Al	27,72%
Potássio	K	14,68%
Ferro	Fe	4,51%
Enxofre	S	2,53%
Írídio	Ir	0,39%
Cobre	Cu	0,17%
Rubídio	Rb	0,13%
Estrôncio	Sr	0,10%
Zinco	Zn	0,08%
Zircônio	Zr	0,05%
Ítrio	Y	0,03%

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 4 — Análise Química por Óxido do Solo Caulim Speswhite — 2024.

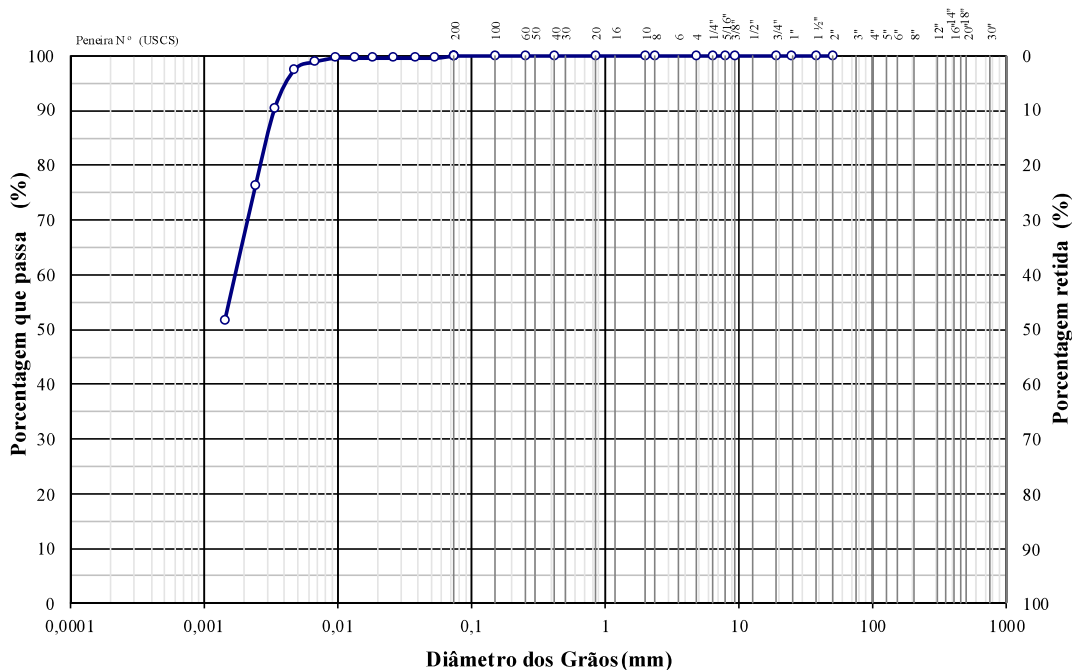
Composto Químico	Símbolo	Percentual
Dióxido de Silício	SiO ₂	50,51%
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	44,42%
Óxido de Potássio	K ₂ O	2,72%
Trióxido de Enxofre	SO ₃	1,52%
Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	0,7%
Óxido de Írídio	Ir ₂ O ₃	0,05%
Óxido de Cobre	CuO	0,04%
Óxido de Rubídio	Rb ₂ O	0,02%
Óxido de Estrôncio	SrO	0,01%
Óxido de Zinco	ZnO ₂	0,01%
Dióxido de Zircônio	ZrO ₂	0,005%
Óxido de Ítrio	Y ₂ O ₃	0,002%

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 5 — Coeficiente de Adensamento Vertical do Solo Caulim Speswhite — 2024.

Tensão Normal (kPa)	Cv do Solo ($\times 10^{-2}$ cm ² /s)
50	0,25
75	0,43
100	0,39
125	0,29

Fonte: Elaborada pela própria autora.



ABNT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho			Pedra	Matacão
			finas	média	grossa	finas	média	grossa		
USCS	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			finas	média	grossa	1	2	3	4	
MIT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			finas	média	grossa					

Figura 22 — Análise Granulométrica.

Conforme análise granulométrica (Figura 22), o solo em estudo teve 100% de suas partículas passantes na peneira #200, sendo 35% de suas partículas classificadas como silte e os outros 65% como argila. No sistema de classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), foi classificado como A7, indicando predominância de solos argilosos e um comportamento geral do subleito fraco ou pobre. Já no Sistema de Classificação dos Solos (SUCS), foi classificado como CH, caracterizando-se como uma argila de alta compressibilidade.

3.1.2 Métodos

O fluxograma da Figura 23 ilustra todas as etapas do ensaio utilizadas nesta pesquisa. A primeira etapa, referente à preparação do corpo de prova, incluiu a homogeneização, hidratação e arrasamento da amostra. Em seguida, iniciou-se a etapa de adensamento com uma tensão normal inicial de 3 kPa, aumentada gradualmente até atingir uma tensão normal de 50 kPa. As cargas foram aplicadas progressivamente até a estabilização dos deslocamentos verticais do solo, indicando que o solo atingiu a consolidação primária até completar 24 horas.

Após o adensamento, a tensão normal foi reduzida para 25 kPa, com o objetivo de obter uma tensão de pré-adensamento (OCR) igual a 2. A partir desse ponto, aguardou-se que o solo se ajustasse à nova condição de tensão (reconsolidado), permitindo que se estabilizasse antes da próxima etapa do ensaio, o método de pré-cisalhamento.

O método de pré-cisalhamento é responsável pela formação do plano de falha, promovido durante essa etapa, provocou grandes deformações no solo, condição necessária para se obter a resistência residual. A etapa de pré-cisalhamento foi conduzida com uma taxa de cisalhamento constante de $2,4^\circ/\text{min}$, o que permite completar uma rotação (360°) em 2 horas e 30 minutos. Essa taxa foi escolhida por otimizar o tempo de ensaio e minimizar a extrusão do solo — caracterizada pela expulsão do solo para fora do anel de moldagem, dificultando a continuidade do ensaio e até mesmo comprometendo os resultados, caso seja significativa. Conforme a norma [ASTM D6467-21](#), a taxa de cisalhamento deve ser inferior a $25^\circ/\text{min}$ e deve ao completar ao menos uma rotação (360°).

O método de pré-cisalhamento aplicado à amostra facilita os deslocamentos horizontais necessários para o desenvolvimento da superfície de cisalhamento, contribuindo para a obtenção da resistência residual (Stark; Vettel, 1992). Além disso, a formação do plano de falha reduz o tempo necessário para a conclusão do ensaio, permitindo a aplicação do método conhecido como multiestágio, que consiste na replicação do ensaio na mesma amostra, com aumentos progressivos de tensão normal aplicadas a cada novo estágio, fornecendo uma representação mais próxima das condições reais de campo (Santos, 2012).

Durante essa fase, observou-se uma variação significativa na altura da amostra, resultante do adensamento seguido de cisalhamento. Ensaio preliminares

demonstraram que, em solos normalmente adensados, essa variação leva à extrusão excessiva e à perda do ensaio. Assim, a adoção de uma tensão de pré-adensamento (OCR) igual a 2 visou aumentar a resistência à deformação do solo, reduzindo a extrusão do solo durante a formação do plano de falha.

Por fim, a fase de cisalhamento envolveu, em cada estágio, a aplicação de um incremento de carga, correspondente à tensão normal de 50 kPa, 75 kPa, 100 kPa e 125 kPa, cada uma seguida da consolidação primária e, em seguida, do cisalhamento. Esse processo foi repetido até atingir a tensão normal máxima definida para esta pesquisa.

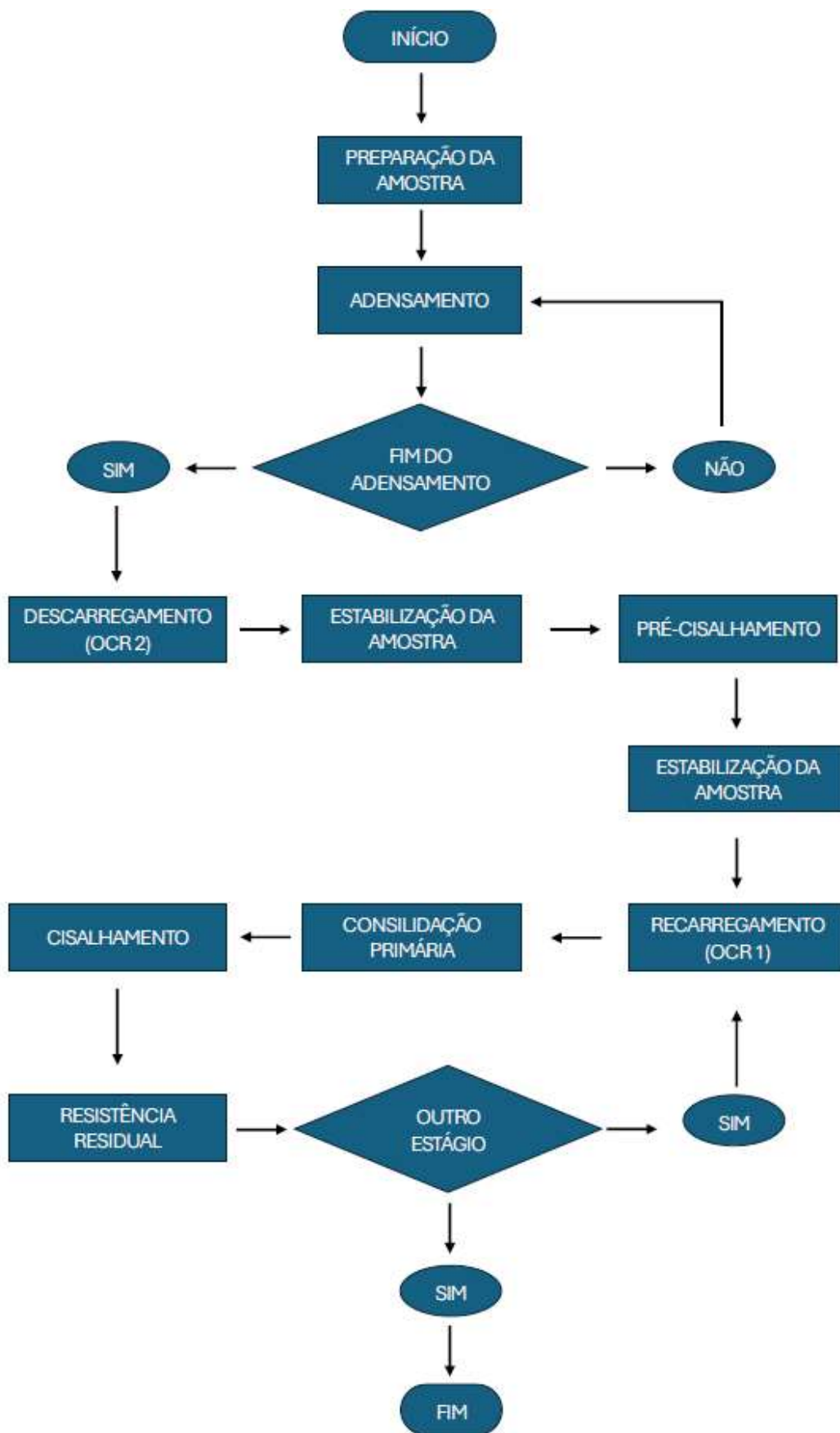


Figura 23 — Fluxograma da Metodologia Experimental Utilizada na Pesquisa.

As amostras utilizadas na pesquisa foram amolgadas, o que significa que sua estrutura original foi alterada. Este processo não influencia os resultados da resistência residual, pois, independentemente do estado original da amostra, a resistência residual é obtida após grandes deformações, nas quais ocorre a reorientação das partículas ao longo do plano de deslizamento (Kenney, 1977; Stark; Vettel, 1992; Vasconcelos, 1992).

Para a preparação das amostras de solo, optou-se pelo uso da fração passante na peneira #40 (425 μm), em conformidade com a norma [ASTM D6467-21](#), que estabelece que as partículas de solo não devem exceder a 10% da altura da amostra — no presente caso, 5 mm. Embora o solo utilizado seja passante na peneira #200, a escolha da peneira #40 foi realizada com o intuito de seguir a padronização exigida pela norma e garantir a consistência metodológica, alinhando-se também com práticas estabelecidas em estudos anteriores (Garcia *et al.*, 2023; Heidemann *et al.*, 2018; Meehan; Brandon; Duncan, 2007; Rigo, 2005).

Adicionalmente, testes preliminares realizados sem a aplicação dessa padronização resultaram na formação de aglomerados (grumos), devido à presença de partículas finas que, mesmo após a homogeneização realizada de forma padronizada, influenciaram os resultados. Essa metodologia permitiu minimizar esses efeitos, o que proporcionou amostras mais homogêneas.

A umidade de moldagem da amostra foi definida com base no limite de liquidez. Durante os testes, observou-se que amostras com a umidade acima desse limite tornavam-se excessivamente moles, facilitando a extrusão do solo. Por outro lado, amostras com umidade abaixo do limite de liquidez dificultavam a moldagem. Ademais, o limite de liquidez correlaciona-se melhor com o ângulo de atrito residual (Fang *et al.*, 2019). Por fim, um fator de correção de 2,5% foi adicionado para compensar a perda de umidade durante o manuseio.

A amostra foi homogeneizada por um tempo cronometrado para minimizar a variabilidade na perda de umidade entre os corpos de prova. Após a homogeneização, a amostra foi lacrada com papel filme e um saco plástico, permanecendo em hidratação por 24 horas para alcançar o equilíbrio de umidade.

O corpo de prova foi moldado no anel de moldagem, um dispositivo projetado para este fim (Figura 24). Este disco possui furos nas extremidades para fixação no equipamento através de parafusos e furos centrais que evitam a formação de vácuo no interior do anel. Antes da moldagem, esses furos foram cuidadosamente selados

com fita adesiva para evitar a entrada de solo. Posteriormente, o anel de moldagem foi saturado com água destilada e seu peso foi registrado. Após essa etapa, a amostra foi arrasada radialmente (Figura 25) e, em seguida, limpa com uma espátula. Acrescentou-se mais amostra e o processo foi repetido. Por fim, o anel de moldagem com a amostra, foi pesado e peso registrado.



Figura 24 — Disco de Moldagem com os Furos Lacrados.



Figura 25 — Arrasamento Radial da Amostra.

3.1.3.1 Índices Físicos

Complementando a descrição das etapas do ensaio e para garantir a padronização dos corpos de prova, apresenta-se na Tabela 6 os índices físicos das amostras utilizadas nos ensaios. A caracterização desses índices físicos é importante para registrar as condições iniciais dos corpos de prova.

Tabela 6 — Resumo dos Índices Físicos Obtidos nos Corpos de Prova — 2024.

N°	Símbolo	Temperatura	Umidade Inicial (%)	Índice de Vazios Inicial (e_0)
Bateria 1	CP1T22	22 °C	56	1,45
	CP2T22	22 °C	60	1,53
	CP3T22	22 °C	57	1,46
	CP4T22	22 °C	57	1,47
	CP5T22	22 °C	58	1,49
Bateria 2	CP1T32	32 °C	60	1,56
	CP2T32	32 °C	59	1,52
	CP3T32	32 °C	59	1,51
	CP4T32	32 °C	60	1,56
	CP5T32	32 °C	62	1,61
Bateria 3	CP1T40	40 °C	60	1,54
	CP2T40	40 °C	59	1,52
	CP3T40	40 °C	59	1,52
	CP4T40	40 °C	59	1,51
	CP5T40	40 °C	61	1,56

Fonte: Elaborada pela própria autora

O monitoramento da temperatura é importante em ensaios com solos de granulação fina, pois afeta a resistência viscosa nos poros, que, por sua vez, interfere na resistência ao cisalhamento. A mudança de temperatura altera a forma como a água interage com as partículas de solo. A equação empírica de Helmholtz contribuiu para a compreensão do impacto da temperatura na viscosidade da água. A viscosidade da água altera apenas 0,001 em unidade CGS (centímetro-grama-segundo) de 20 °C a 25 °C.

Com esta equação, é possível acompanhar as variações térmicas e como elas influenciam os parâmetros experimentais, facilitando a análise comparativa dos dados gerados e a confiabilidade dos testes no solo. Portanto, os cálculos foram realizados conforme a equação 2, onde η é a viscosidade da água e T é a temperatura em graus Celsius.

$$\eta = \frac{0,0178}{1 + 0,033T + 0,00022T^2} \quad 2$$

A Figura 26 observa-se uma redução gradual da influência da temperatura na viscosidade da água. O impacto da temperatura na redução da viscosidade entre 32 °C e 40 °C é de 40,29% menor em relação ao impacto observado entre 22 °C e 32 °C. Desta forma, a variação de temperatura, 22 °C a 40 °C adotada nesta pesquisa se mostrou adequada, pois contempla uma faixa de temperatura em que os seus efeitos

sobre a viscosidade são maiores. Em temperaturas superiores, a tendência é de redução gradativa desses efeitos até uma estabilização.

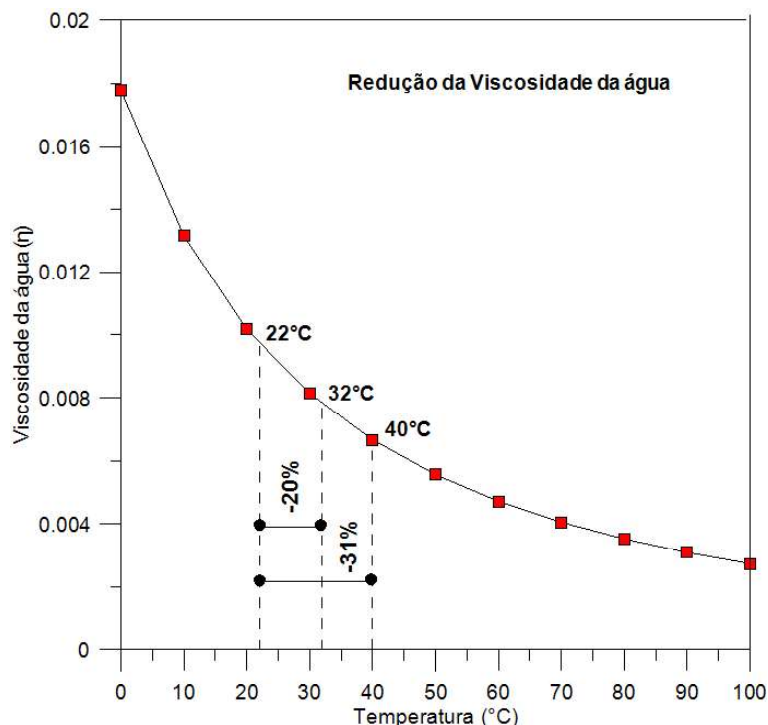
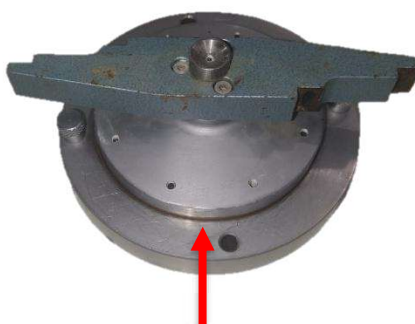


Figura 26 — Viscosidade da água em Função da Temperatura.

3.1.3.2 Adensamento

O adensamento unidimensional foi realizado com base nas normas ABNT NBR 16853/2020 e ASTM D6467-21. Este processo foi fundamental, pois o solo Caulim Speswhite é muito suscetível à extrusão, que ocorre quando o solo escapa entre o anel de moldagem e a placa superior (Figura 27). Essa condição observada pode ser melhor vista na página 113.



Área de Escape

Figura 27 — Escape entre o disco de moldagem do Corpo de Prova e a Placa Superior.

Nos primeiros testes, observou-se que o solo atinge o adensamento primário em aproximadamente 10 minutos. No entanto, devido à sua tendência a extrusão, saída do solo pela área de escape (Figura 27), optou-se por um período de adensamento de 24 horas com pequenos incrementos de carga para permitir que o solo se acomodasse adequadamente (Garcia *et al.*, 2023; Raj Bhat, 2022). Durante esse período, foram aplicados pequenos incrementos nas tensões normais, começando com 3 kPa e indo até 50 kPa. As tensões normais foram obtidas pela razão entre P , que representa o peso da placa superior (Figura 28) acrescido da carga aplicada no braço de alavanca, multiplicado pelo coeficiente 10 (comprimento do braço de alavanca), e $\pi(r_2^2 - r_1^2)$, onde r_2 é o raio externo e r_1 , o raio interno, conforme ilustrado na 3.

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad 3$$



Figura 28 — Peso da Placa Superior.

A primeira carga aplicada foi de 5 g, correspondente a uma tensão efetiva (σ'_n) de 3 kPa, seguindo o procedimento descrito na [ASTM D6467-21](#). Durante cada incremento de carga, houve um intervalo de aproximadamente uma hora, com o objetivo de permitir a estabilização das deformações verticais, até que uma tensão normal de 50 kPa fosse atingida. Essa tensão normal foi mantida até a conclusão do ciclo de adensamento (24 horas). Após esse período, a carga foi reduzida para uma tensão normal de 25 kPa, e a amostra foi deixada por 30 minutos para estabilização do adensamento (dilatação).

Esse procedimento foi adotado para que a amostra atingisse um grau de pré-adensamento (OCR) igual a 2, com o objetivo de reduzir as extrusões do solo durante

a formação do plano de falha, que ocorre quando o solo é submetido a grandes deformações.

Após a formação do plano de falha, procedeu-se ao novo carregamento com o aumento das tensões normais e o solo retornou à condição normalmente adensada. Os adensamentos foram realizados nas temperaturas de 22 °C, 32 °C e 40 °C. Para os ensaios com aquecimento, os corpos de prova foram mantidos sem carga, fixados pelo parafuso da alavanca até que a temperatura chegasse ao valor desejado.

3.1.3.3 Cisalhamento

O método de cisalhamento utilizado foi o multiestágio (Figura 29), uma técnica que permite avaliar a resistência ao cisalhamento residual do solo sob diferentes condições de carga vertical, otimizando o tempo do ensaio (Meehan; Brandon; Duncan, 2007).

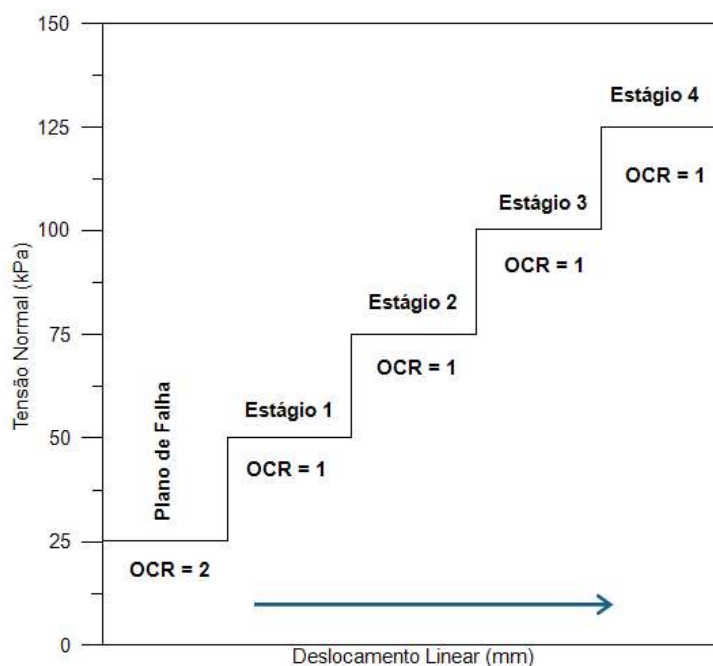


Figura 29 — Tensões Normais Aplicadas em Cada Corpo de Prova.

Antes da realização dos estágios de cisalhamento, foi necessário formar o plano de falha por meio do método de pré-cisalhamento. Essa etapa foi adotada em razão das limitações do equipamento associada a suscetibilidade à extrusão do solo estudado, fatores que comprometiam a execução do ensaio em taxas de cisalhamento mais elevadas. Com a aplicação desse método, foi possível utilizar taxas de

cisalhamento mais elevadas sem ocasionar a falha do ensaio e consequente perda da amostra.

Na formação do plano de falha, todos os corpos de prova foram cisalhados a uma mesma taxa de cisalhamento de 2,4°/min, de modo que as amostras passaram por uma grande deformação antes do início dos estágios subsequentes. Em razão da metodologia aplicada, não foi possível analisar os picos de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova.

Para avaliar a resistência residual do solo argiloso Caulim Speswhite sob diferentes temperaturas, foram realizadas três baterias de ensaio, cada uma composta por cinco corpos de prova. Cada bateria foi submetida a uma temperatura diferente: 22 °C, 32 °C e 40 °C. A resistência residual foi obtida nos estágios 1 a 4, com tensões normais de 50 kPa, 75 kPa, 100 kPa e 125 kPa, respectivamente.

Em seguida, cada corpo de prova foi submetido a uma taxa de cisalhamento distinta. As taxas foram definidas de forma a permitir uma avaliação abrangente do comportamento do solo, variando propositalmente entre a menor taxa disponível no equipamento, de 0,024°/min, e a maior, de 60°/min, conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7 — Corpos de Prova Moldados para Ensaio — 2024.

	Símbolo	Temperatura	Taxa de Cisalhamento (°/minuto)	Taxa de Cisalhamento (mm/minuto)
Bateria 1	CP1TA	22 °C	0,024	0,09
	CP2TA	22 °C	2,4	1,78
	CP3TA	22 °C	12	8,90
	CP4TA	22 °C	30	22,26
	CP5TA	22 °C	60	44,52
Bateria 2	CP1T40	32 °C	0,024	0,09
	CP2T40	32 °C	2,4	1,78
	CP3T40	32 °C	12	8,90
	CP4T40	32 °C	30	22,26
	CP5T40	32 °C	60	44,52
Bateria 3	CP1T50	40 °C	0,024	0,09
	CP2T50	40 °C	2,4	1,78
	CP3T50	40 °C	12	8,90
	CP4T50	40 °C	30	22,26
	CP5T50	40 °C	60	44,52

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A tensão cisalhante foi obtida conforme ilustrado na 4, pela razão entre a soma da carga aplicada, medida através das células de carga F1 e F2, multiplicada pela distância de torque (L) e a área da amostra, cujo r_2 é o raio externo e r_1 é o raio interno (Figura 30).

$$\tau = \frac{3(F1 + F2) * L}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad 4$$



Figura 30 — a) Distância de Torque, d) Raio Externo e Interno em Milímetros.

A taxa do coeficiente de atrito interno do solo foi determinada pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão normal efetiva ($\sigma'n$) aplicada. Essa relação pode ser expressa através da 5 ou pela razão entre a equação 4 e 3.

$$\frac{\tau}{\sigma'n} = \frac{3(F1 + F2) * (r_2^2 - r_1^2)L}{4 * (r_2^3 - r_1^3)P} \quad 5$$

O ângulo de atrito interno do solo (φ) foi calculado utilizando a 6. Para determinar o valor mais provável desse ângulo sob diferentes tensões normais em uma faixa de tempo, foi realizada uma análise estatística descritiva, adotando-se a mediana como medida representativa. A mediana foi escolhida pois forneceu um valor típico de um conjunto de dados e não foi afetada por valores extremos.

Esse procedimento mostrou-se particularmente relevante para análise dos ângulos de atrito obtidos em amostras submetidas a taxas de cisalhamento superiores a 2,4°/min, devido à turbulência provocada pelo aumento dessas taxas. Dessa forma, a mediana reflete o ponto central da distribuição dos dados, permitindo uma melhor compreensão das flutuações do ângulo de atrito nessas condições.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\tau}{\sigma'n}\right) \quad 6$$

O deslocamento horizontal foi calculado a partir da medição da taxa de rotação angular (T_a), expressa em graus, em função do tempo (t) aplicado em minutos (7). Esse deslocamento pode ser expresso como deslocamento angular (D_a), em graus, ou convertido para deslocamento linear (δ'), em milímetros. A conversão do deslocamento angular para linear foi realizada utilizando a 8, na qual a taxa angular (T_a), foi multiplicada pela constante de 0,742, de acordo com as especificações do manual do equipamento. O deslocamento linear foi então calculado utilizando a 9.

$$D_a = T_a * t \quad 7$$

$$T_{mm} = T_a * 0,742 \quad 8$$

$$\delta' = T_{mm} * t \quad 9$$

3.1.3.4 Teste de Atrito no equipamento

Como a variação de temperatura afeta as dimensões de peças em aço, foi necessário verificar o atrito da máquina sem o solo, e para isso foram realizados 30 ensaios. Foram realizadas três baterias de ensaios, cada uma submetida a uma temperatura específica: 22 °C, 32 °C e 40 °C. Cada bateria incluiu cinco testes sob diferentes taxas de cisalhamento, conforme descrito na Tabela 8.

Tabela 8 — Tabela dos Ensaios Realizados para Medição do Atrito — 2024.

N°	Símbolo	Temperatura	Taxa de Cisalhamento (°/minuto)	Taxa de Cisalhamento (mm/minuto)	Testes	Tempo por Estágio (minuto)
Bateria 1	CP1TA	22 °C	0,024	0,09	2	10
	CP2TA	22 °C	2,4	1,78	2	10
	CP3TA	22 °C	12	8,90	2	10
	CP4TA	22 °C	30	22,26	2	10
	CP5TA	22 °C	60	44,52	2	10
Bateria 2	CP1T32	32 °C	0,024	0,09	2	10
	CP2T32	32 °C	2,4	1,78	2	10
	CP3T32	32 °C	12	8,90	2	10
	CP4T32	32 °C	30	22,26	2	10
	CP5T32	32 °C	60	44,52	2	10
Bateria 3	CP1T40	40 °C	0,024	0,09	2	10
	CP2T40	40 °C	2,4	1,78	2	10
	CP3T40	40 °C	12	8,90	2	10
	CP4T40	40 °C	30	22,26	2	10
	CP5T40	40 °C	60	44,52	2	10

Fonte: Elaborada pela própria autora.

O teste de atrito foi realizado sem solo, com a placa superior em contato direto com o parafuso central, permitindo a medição do atrito no topo e lateral. Nos ensaios realizados com o solo, o parafuso central não entrou em contato com o topo da placa superior devido à presença de solo, que impediu esse contato (Figura 31 e Figura 32). Se houvesse esse contato, indicaria uma extrusão completa da amostra, caracterizando a falha do ensaio. Além disso, o parafuso central foi lubrificado com vaselina para minimizar o atrito lateral.



Figura 31 — a) Topo da Placa Superior; b) Parafuso Central.

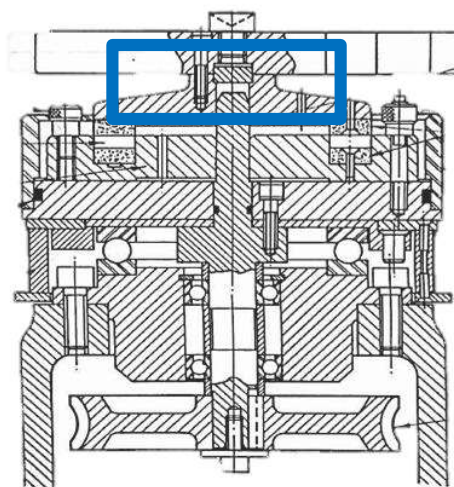


Figura 32 — Desenho Esquemático Modificado do Conjunto da Torre de Amostra (Bromhead, 1979).

No presente trabalho, o atrito medido no equipamento de cisalhamento de anel, foi expresso em termos de ângulo de atrito (ϕ), medido em graus com o objetivo de identificar a influência do atrito do equipamento sobre os resultados de resistência residual. A constância observada no ângulo de atrito (Figura 33 e Figura 34) de aproximadamente $0,03^\circ$, mesmo com variações nas taxas de cisalhamento e temperaturas, indica que o atrito gerado pelo equipamento permaneceu relativamente constante. Dessa forma, a influência do atrito mecânico do equipamento pode ser considerada desprezível.

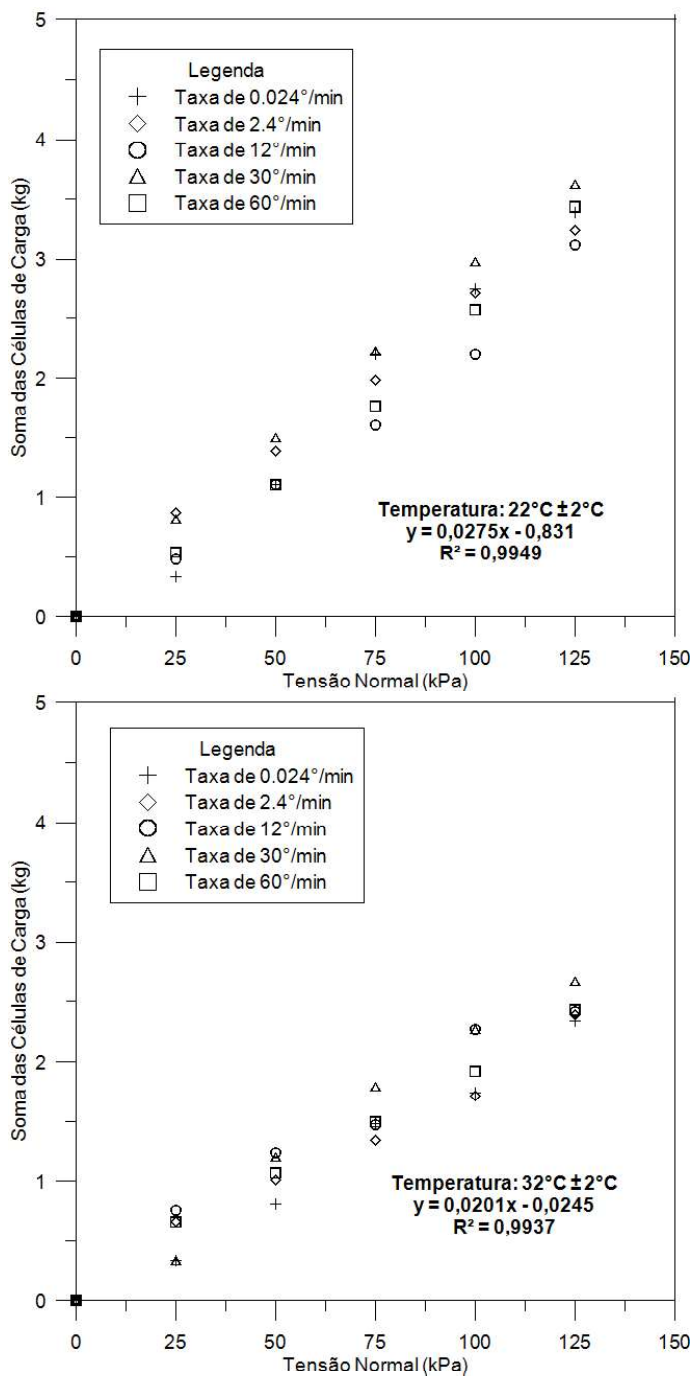


Figura 33 — a) Testes de Atrito Temperatura 22 °C; b) Testes de Atrito Temperatura 32 °C.

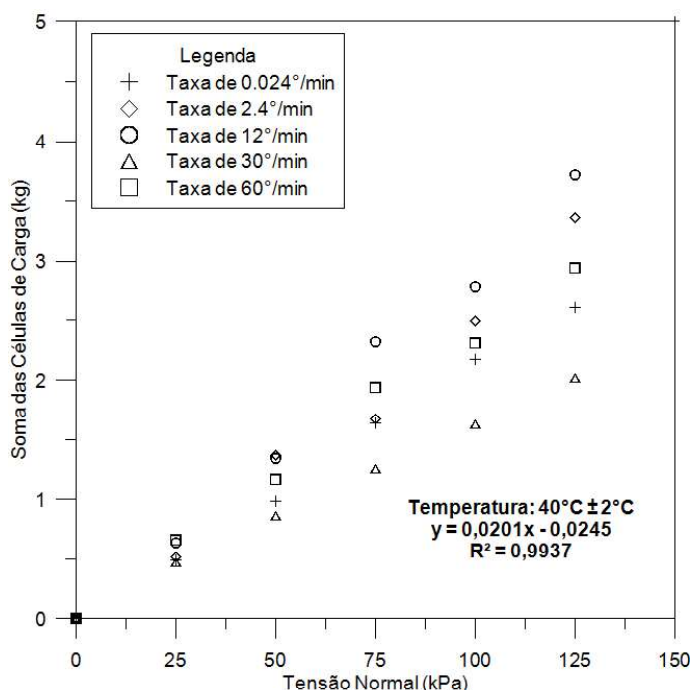


Figura 34 — Testes de Atrito Temperatura 40 °C.

3.1.3.5 Curva Backbone

A equação desenvolvida por Finnie e Randolph (1994) citada por García Martínez; Gottardi; Rocchi, (2016), para a avaliação das condições de drenagem do solo em relação à velocidade de cravação de ensaios de CPTu (García Martínez; Gottardi; Rocchi, 2016; Oliveira *et al.*, 2011; Schneider; Lehane; Schnaid, 2007) foi modificada para aplicação em ensaios de cisalhamento de anel. Para isso, os autores propuseram uma velocidade normalizada conforme ilustrado na 10, onde um valor acima de 100 indica que o carregamento foi de natureza não drenada.

$$V = \frac{\dot{v} \cdot d}{cv} \quad 10$$

Para avaliar o comportamento de drenagem do solo Caulim Speswhite no equipamento de cisalhamento de anel modelo Bromhead ring shear WF25850, foi adaptada a fórmula desenvolvida por Finnie e Randolph, (1994) citada por García Martínez; Gottardi; Rocchi, (2016), a qual introduz o conceito de velocidade normalizada. Nesta adaptação, \dot{v} (velocidade) de cravação foi substituída pela taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) aplicada no corpo de prova em mm/min, d (mm) correspondeu à

diferença entre os diâmetros externo e interno do anel de moldagem, e o c_v (cm^2/s), foi ajustado para unidade de medida (mm/min), de forma que a equação resultasse em uma grandeza adimensional, ajustando conforme cada tensão normal aplicada, como ilustrado na 11.

$$V = \frac{\dot{\gamma} \cdot d}{c_v} \quad 11$$

O coeficiente de consolidação vertical C_v foi estimado com os dados obtidos durante o adensamento da amostra, sob as diferentes temperaturas aplicadas conforme Tabela 10. O cálculo foi realizado com base no método de Taylor, que utiliza o método do logaritmo do tempo para a determinação de T_{90} . Este método baseia-se na Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi. A partir da 12, é possível calcular o coeficiente de consolidação vertical C_v , onde: $T_v = 0,848$, Hd representa a altura da camada do solo, e T_{90} corresponde ao tempo para atingir 90% de adensamento.

$$c_v = \frac{T_v \cdot Hd^2}{T_{90}} \quad 12$$

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Efeito das Taxas de Cisalhamento e Temperatura na Resistência ao Cisalhamento do Solo Caulim Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios analisados nesta dissertação. Esses ensaios foram conduzidos pela autora e descritos detalhadamente no capítulo 3.

As características do solo investigado encontram-se na caracterização da amostra e podem ser revisadas no subitem 3.1.1.

A Tabela 9 apresenta todos os ensaios realizados utilizando o equipamento de cisalhamento de anel — modelo Bromhead — utilizados nesta pesquisa. Foram conduzidas três séries de ensaios experimentais, cada uma composta por uma bateria de testes, sendo que, em cada bateria, foram utilizados cinco corpos de prova (CP).

Tabela 9 — Organização dos Ensaios de Cisalhamento de Anel: Séries, Baterias e Corpos de Prova — 2024.

Nº	Símbolo	Temperatura de Adensamento e Cisalhamento
Bateria 1	CP1T22	22 °C
	CP2T22	22 °C
	CP3T22	22 °C
	CP4T22	22 °C
	CP5T22	22 °C
Bateria 2	CP1T32	32 °C
	CP2T32	32 °C
	CP3T32	32 °C
	CP4T32	32 °C
	CP5T32	32 °C
Bateria 3	CP1T40	40 °C
	CP2T40	40 °C
	CP3T40	40 °C
	CP4T40	40 °C
	CP5T40	40 °C

Fonte: Elaborada pela própria autora.

O método de pré-cisalhamento reduziu os deslocamentos horizontais para atingir a resistência residual. A Figura 35 apresenta os deslocamentos verticais observados nos corpos de prova durante a formação do plano de falha. Verifica-se que os deslocamentos verticais se mantiveram aproximadamente constantes em cada faixa de temperatura, indicando que os corpos de prova atingiram uma condição de padronização adequada para as próximas etapas.

Observa-se, ainda, que os menores deslocamentos verticais ocorreram à temperatura de 32 °C, em comparação com os valores observados a 22 °C e 40 °C. Embora fosse esperado um aumento progressivo do deslocamento vertical com o aumento da temperatura, em razão da redução da viscosidade da água, os resultados a 32 °C indicaram um comportamento distinto. Com o aumento da temperatura, a água adsorvida, ligada às partículas de solo por meio de ligações intermoleculares, sofre agitação dessas moléculas devido ao aumento da energia cinética, o que enfraquece e pode romper essas ligações. Como consequência, parte da água antes adsorvida passa a ser livre e pode ser liberada do sistema. Essa redução da viscosidade pode ter sido parcialmente compensada pela expansão térmica da água e das partículas de solo.

Já à temperatura de 40 °C, a continuidade da redução da viscosidade da água não apenas facilitou a movimentação das partículas, como também favoreceu a eliminação da água, permitindo um deslocamento vertical maior que o observado a 32 °C. No entanto, esse valor ainda permaneceu inferior ao observado a 22 °C. Isso explica por que, apesar de uma maior eliminação da água a 40 °C, o deslocamento vertical foi menor que a 22 °C, mas ainda maior que a 32 °C, evidenciado que o comportamento do solo não segue uma tendência linear simples com o aumento da temperatura.

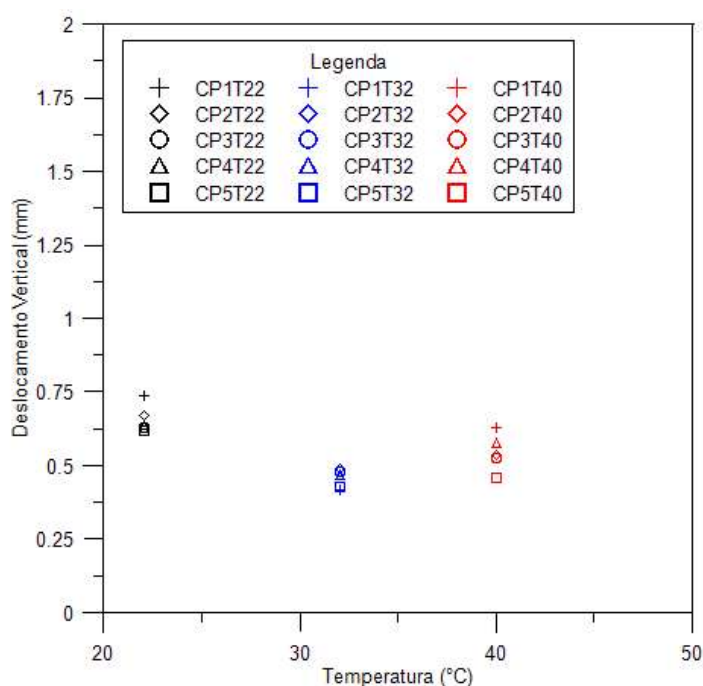


Figura 35 — Deslocamento Vertical Durante a Formação do Plano de Falha Sob Diferentes Temperaturas.

Conforme ilustrado na Figura 36, o coeficiente de atrito residual do solo diminuiu à medida que as tensões normais aumentaram independente da taxa de cisalhamento aplicada. Esse resultado não apenas confirma a influência da tensão normal na resistência residual do solo, como também indique que seu efeito tende a ser dominante em relação a taxa de cisalhamento

O coeficiente de atrito do solo na tensão normal de 25 kPa apresentou resultados semelhantes, pois todas as amostras foram submetidas à formação do plano de falha sob a mesma taxa de cisalhamento. A pequena dispersão notada deveu-se às diferentes temperaturas aplicadas o que evidencia o efeito da temperatura na resistência residual

À medida que a tensão normal aumentou, observou-se uma tendência de estabilização no coeficiente de atrito do solo a partir da tensão normal de 100 kPa. Esse resultado é consistente com a literatura, conforme discutido na revisão bibliográfica no item 2.3.2.

O aumento da tensão normal resultou na redução do coeficiente de atrito do solo em todas as temperaturas analisadas. Observou-se, no entanto, que a 22 °C, essa redução ocorreu de maneira menos acentuada, indicando uma maior estabilidade da resistência residual nessa temperatura. Por outro lado, nas temperaturas de 32 °C e 40 °C, notou-se uma redução mais acentuada com o aumento da tensão normal.

Adicionalmente, observou-se que o coeficiente de atrito do solo aumentou com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento está associado ao aumento da resistência viscosa que dificulta o movimento do fluido, enquanto o cisalhamento mais rápido promove um rearranjo aleatório das partículas de solo, resultando no aumento do coeficiente de atrito.

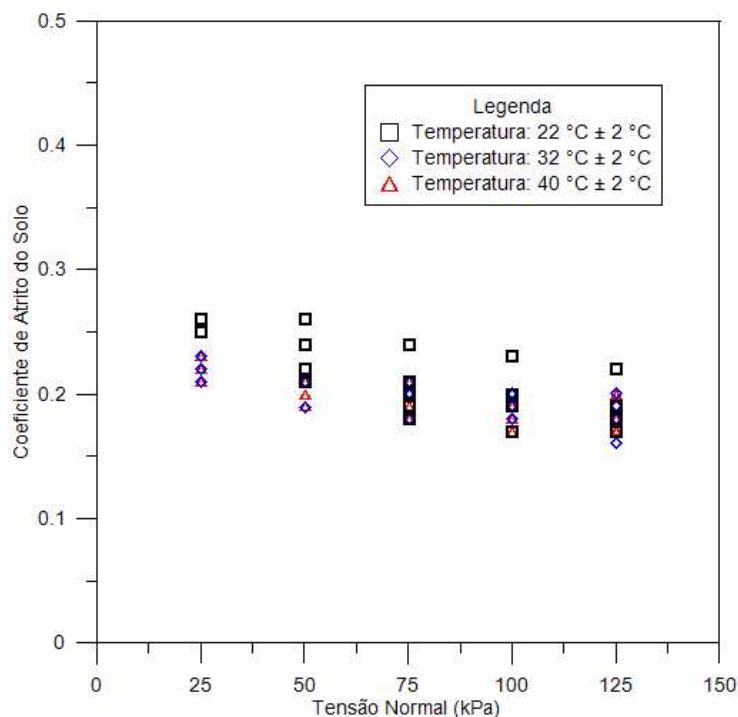


Figura 36 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função da Tensão Normal sob Diferentes Temperaturas.

Na Figura 37a, observou-se uma transição entre os modos de cisalhamento com o aumento das taxas de cisalhamento. Na taxa de $0,024^\circ/\text{min}$, a baixa velocidade favoreceu a acomodação das que as partículas de solo, resultando em um modo de cisalhamento lento. Nesse caso, o comportamento foi dominado pelas partículas de solo, o que pode explicar o baixo ângulo de atrito.

Entre as taxas de $2,4^\circ/\text{min}$ (Figura 37b) e $12^\circ/\text{min}$ (Figura 38a), notou-se uma ligeira flutuação, o que indicou um modo de cisalhamento transicional. Neste modo, as forças de cisalhamento podem variar entre cisalhamento lento e turbulento. Inicialmente, surgem oscilações em diferentes pontos ao longo do plano de cisalhamento e evoluem para progressivamente para flutuações mais intensas, até alcançar o cisalhamento turbulento.

É possível que o comportamento oscilatório ocorra em taxas de cisalhamento menores que $2,4^\circ/\text{min}$, momento em que começou a ser observado um aumento na resistência ao movimento do fluido, originando leves flutuações provocadas pela velocidade de cisalhamento. Na taxa $12^\circ/\text{min}$ a amostra continuou com uma ligeira flutuação, um pouco mais evidente do que na taxa $2,4^\circ/\text{min}$.

A partir da taxa $30^\circ/\text{min}$ (Figura 38b), observou-se maiores flutuações, indicando que as partículas se moveram de maneira caótica, devido à maior

resistência ao movimento do fluido. Esse comportamento também foi observado na taxa $60^\circ/\text{min}$ (Figura 39).

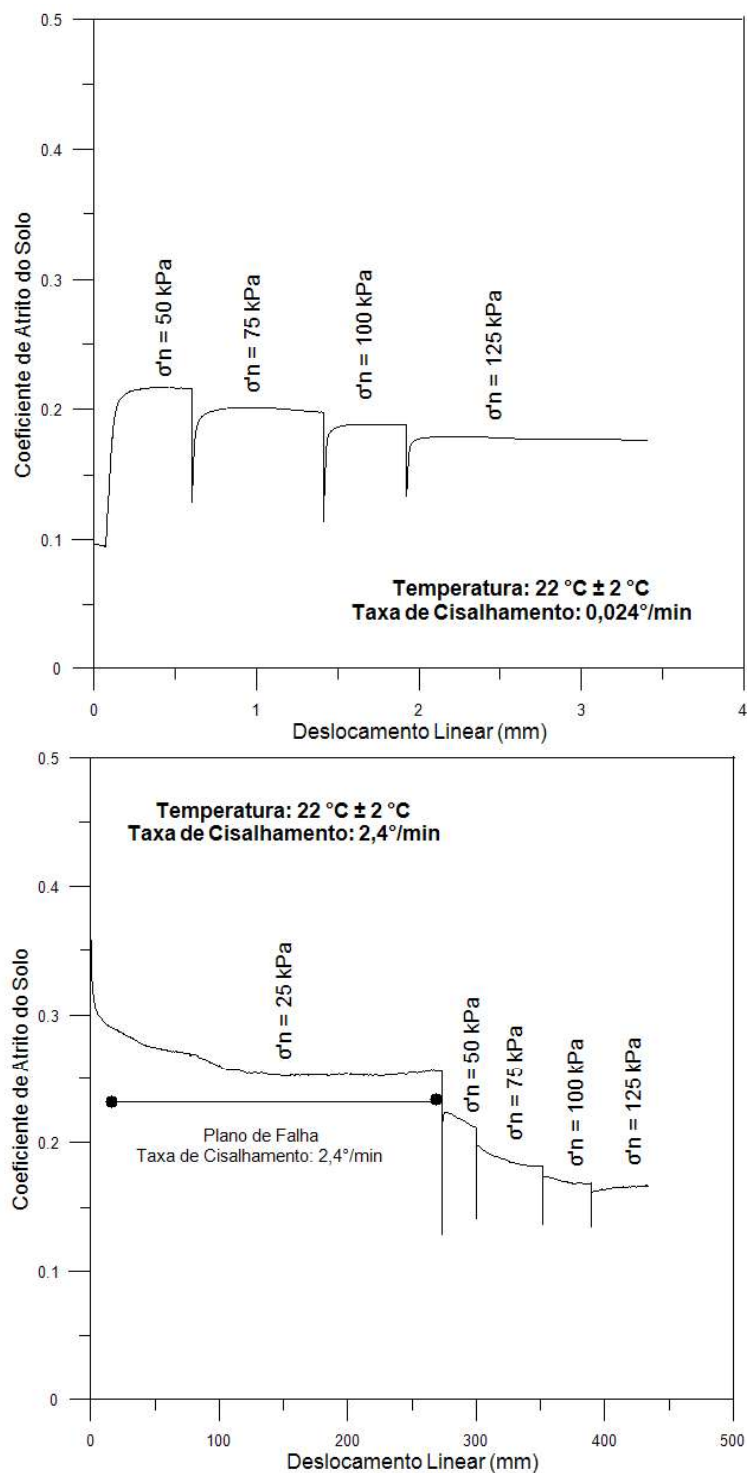


Figura 37 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$; b) Taxa de Cisalhamento: $2,4^\circ/\text{min}$.

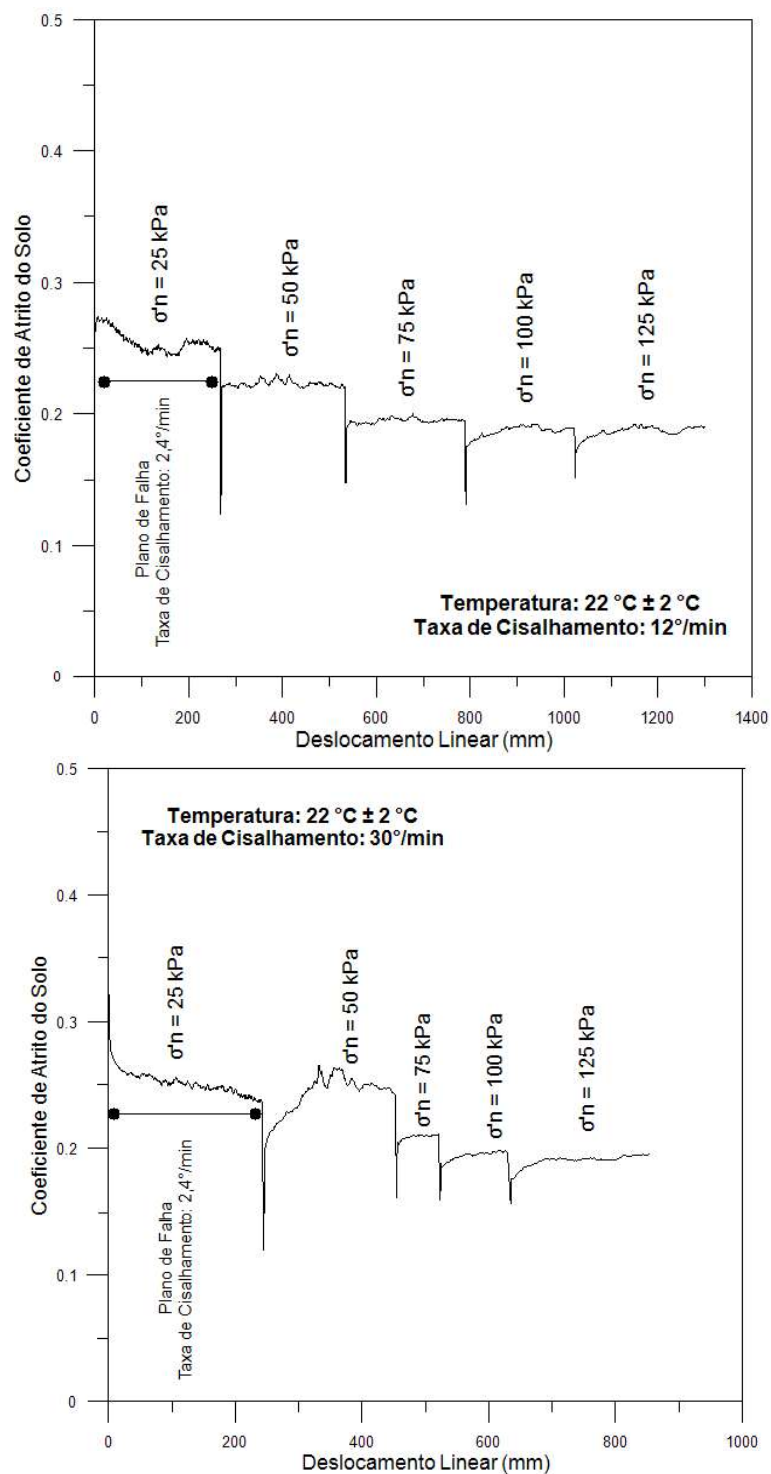


Figura 38 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.

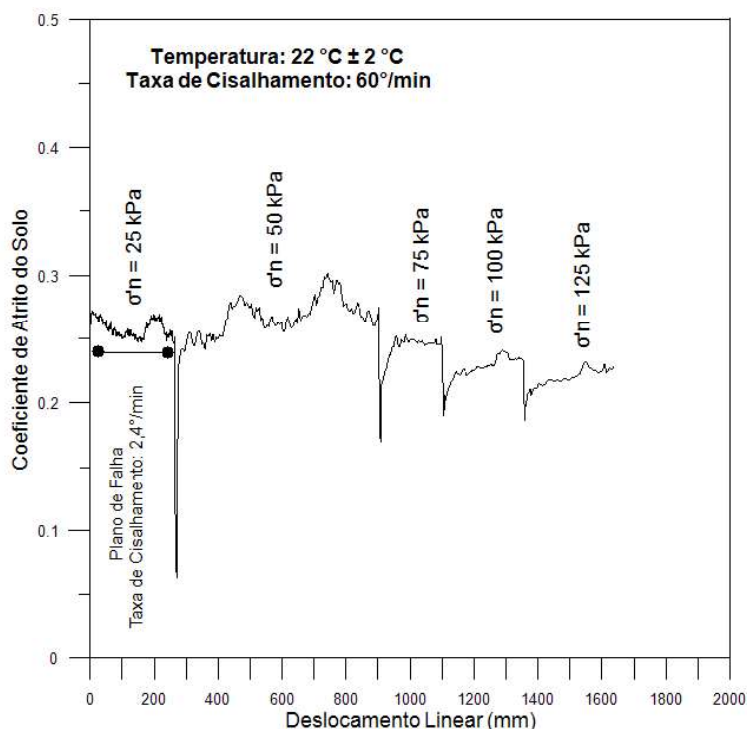


Figura 39 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento na Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

Para temperatura de 22 °C, conforme ilustrado da Figura 40 à Figura 42, a resistência ao cisalhamento estabilizou-se rapidamente, com as tensões de cisalhamento permanecendo constantes desde o início do deslocamento linear. Esse comportamento ocorreu devido à formação do plano de falha por meio do método de pré-cisalhamento, que submeteu a amostra a uma grande deformação, reduzindo o tempo necessário para o cisalhamento em todos os estágios.

A diferença no deslocamento linear observado entre os ensaios está diretamente relacionada à taxa de cisalhamento aplicada. A taxa de cisalhamento de 0,024°/min (Figura 40a), o deslocamento linear de 3 milímetros corresponde a aproximadamente 3 horas de ensaio, enquanto a taxa de 60°/min (Figura 42), com o deslocamento linear de 1700 mm corresponde aproximadamente 40 minutos de ensaio, o tempo precisou ser reduzido devido ao fator limitante de extrusão do solo. Esse aumento no deslocamento linear nas taxas mais altas não está associado ao tempo necessário para alcançar a resistência residual. Nessa forma, para uma melhor representação gráfica, o trecho correspondente à formação do plano de falha nos corpos de prova submetidos à taxa de 0,024°/min foi omitido (Figura 40a).

Esses outlets, caracterizados pelas flutuações na tensão de cisalhamento do solo — com aumentos e reduções sucessivas — foram observados à medida que a

taxa de cisalhamento aumentava, refletindo a transição do solo entre os modos de cisalhamento, de lento para transicional e turbulento.

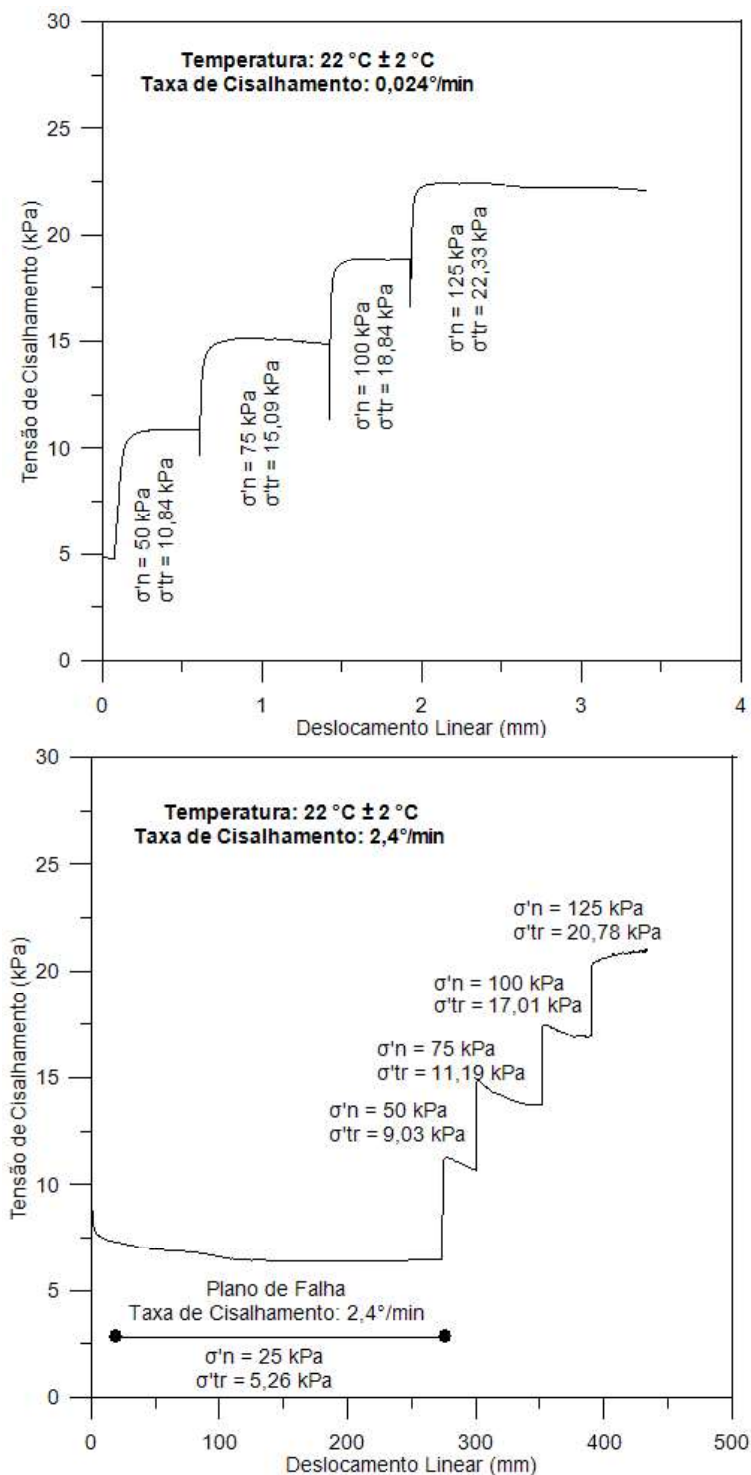


Figura 40 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento 2,4°/min

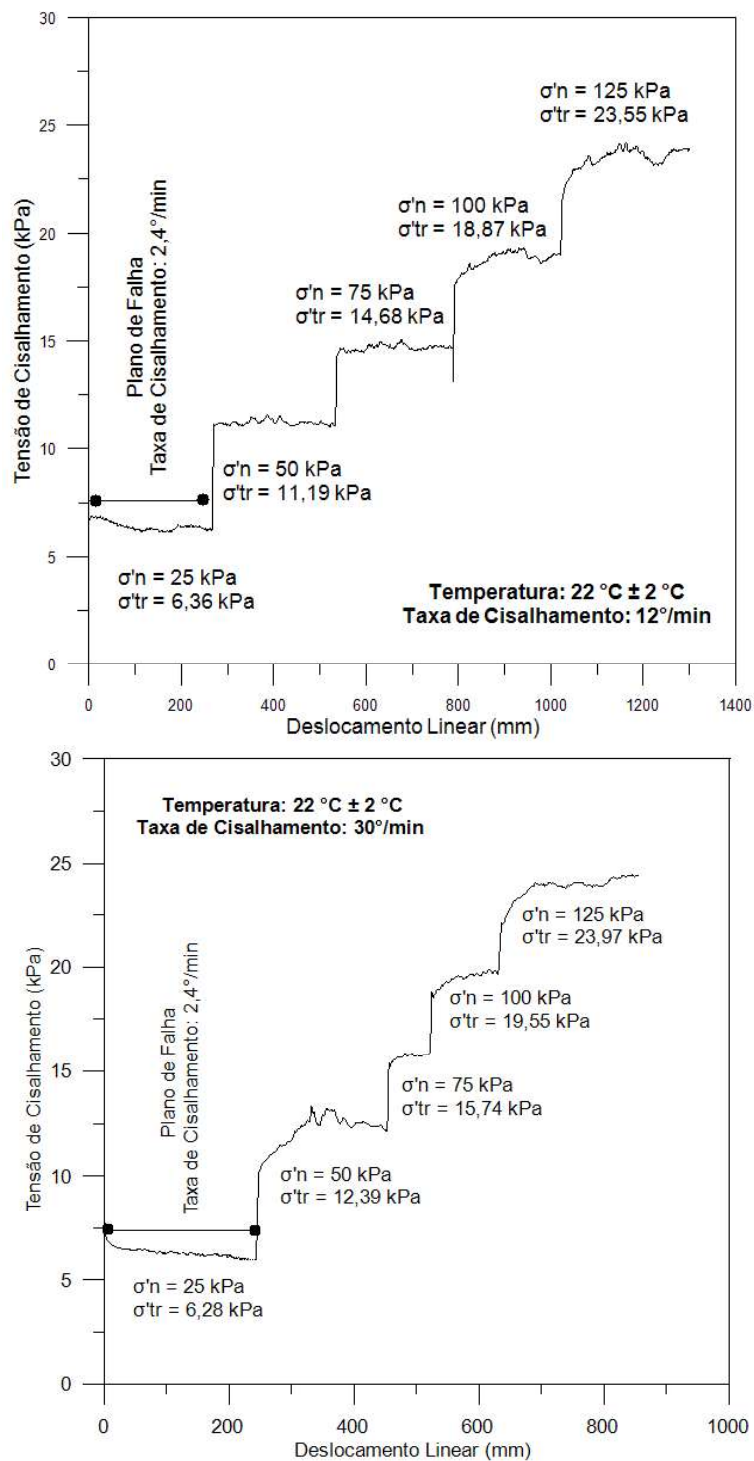


Figura 41 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente: a)Taxa de Cisalhamento 12°/min; b)Taxa de Cisalhamento 30°/min.

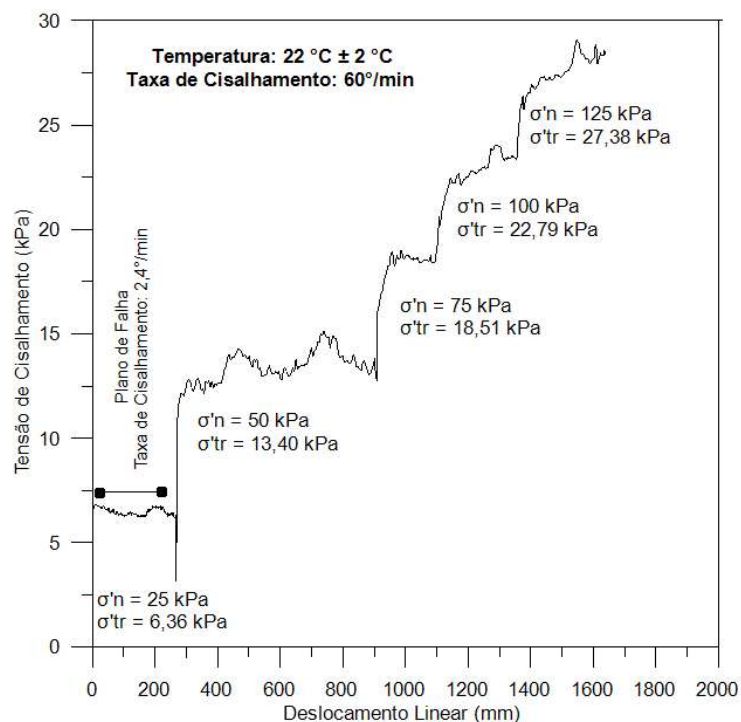


Figura 42 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura Ambiente a Taxa de Cisalhamento 60°/min.

Com base nos resultados obtidos a 22 °C, prossegue-se com a análise para as temperaturas de 32 °C e 40 °C. A Figura 43 à Figura 48 mostram o coeficiente de atrito do solo sobre as diferentes taxas de cisalhamento sob as temperaturas respectivamente 32 °C e 40 °C. Notou-se uma menor flutuação das tensões de cisalhamento conforme a temperatura aumentou, principalmente em taxas mais altas. Este comportamento pode ser atribuído à redução da resistência viscosa, a qual facilita o deslizamento das partículas, permitindo uma acomodação mais suave.

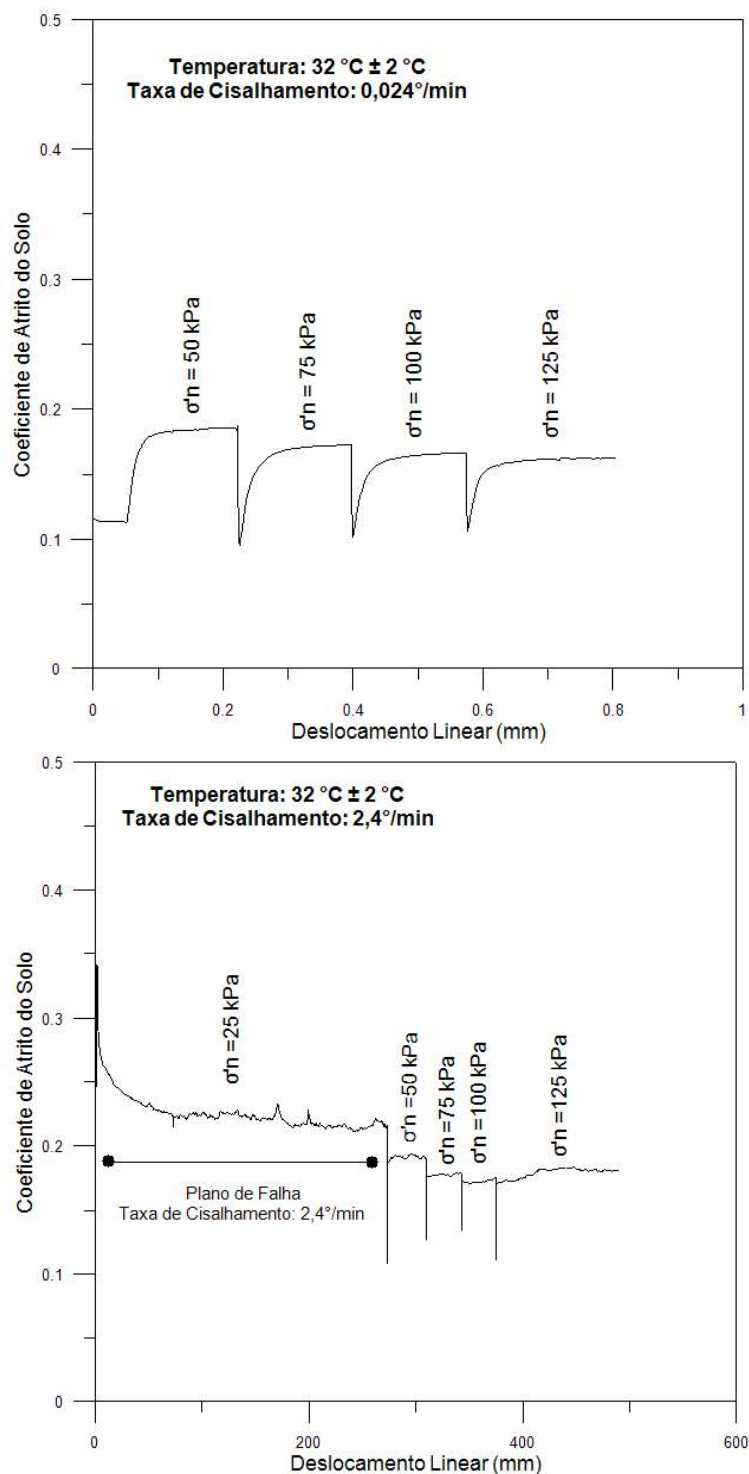


Figura 43 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min.

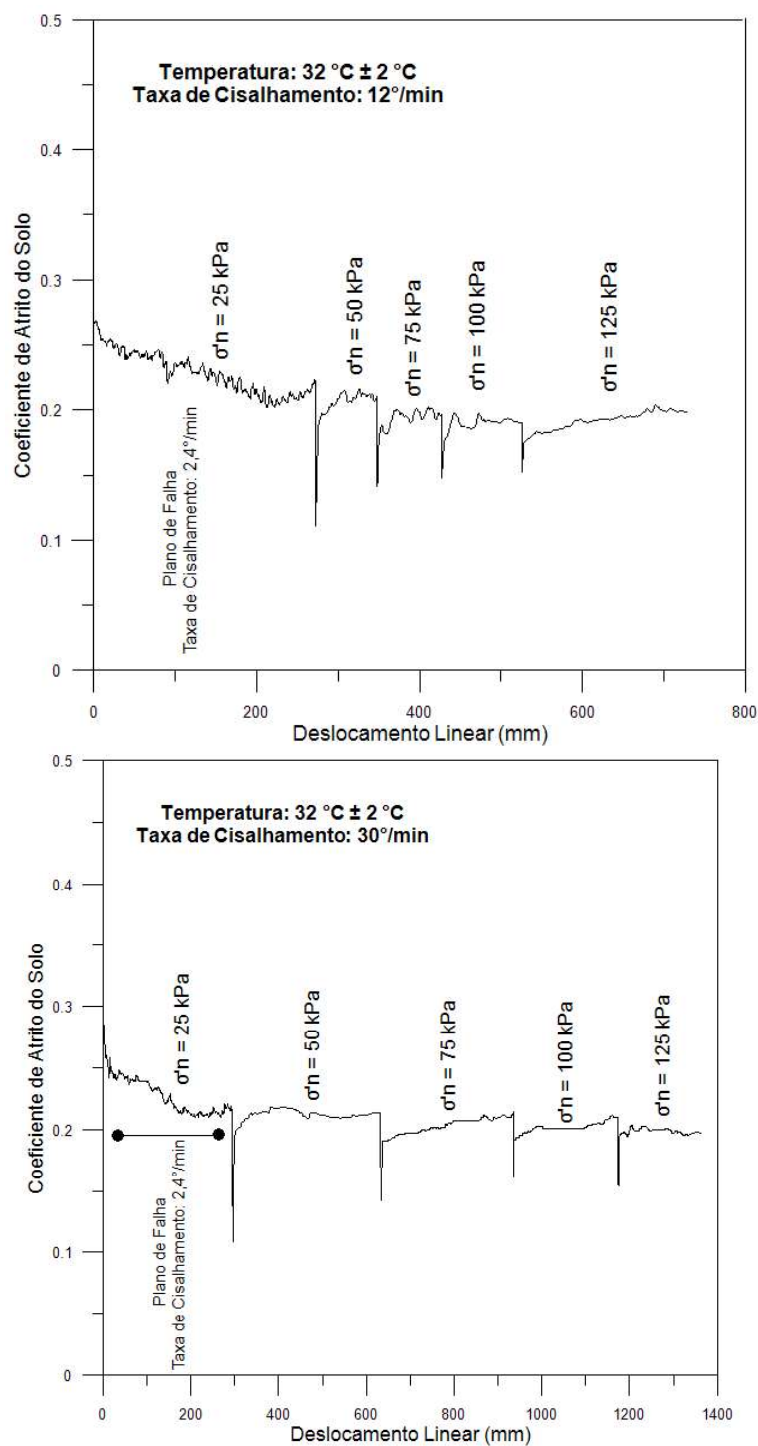


Figura 44 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 32 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.

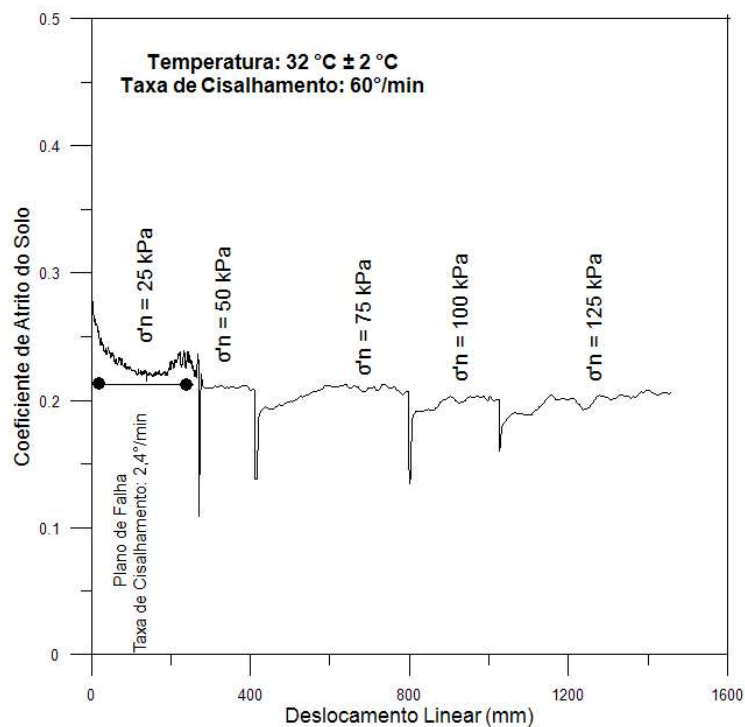


Figura 45 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob a Taxa de Cisalhamento de $60^\circ/\text{min}$.

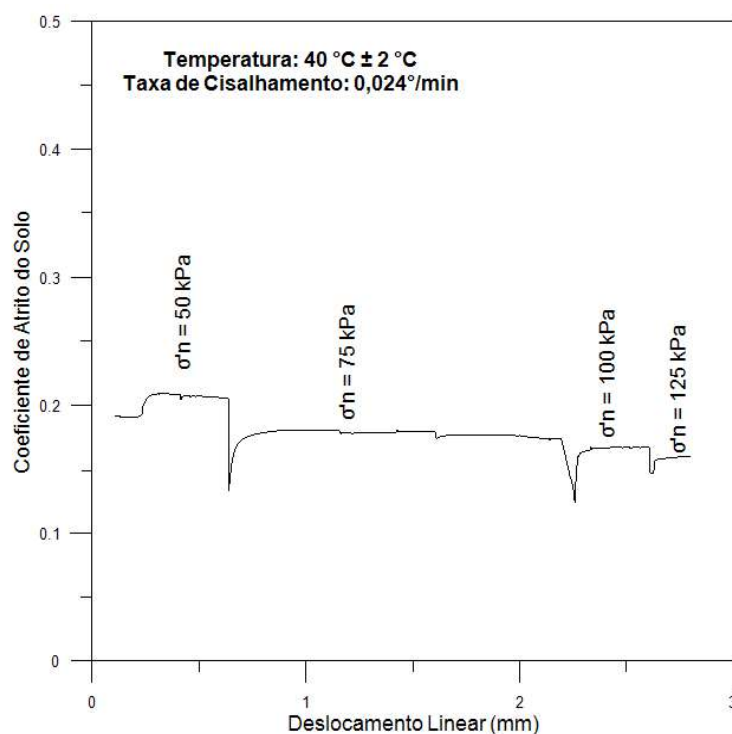


Figura 46 — Coeficiente de Atrito do Solo em Função do Deslocamento Linear sob a Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$ em Temperatura $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

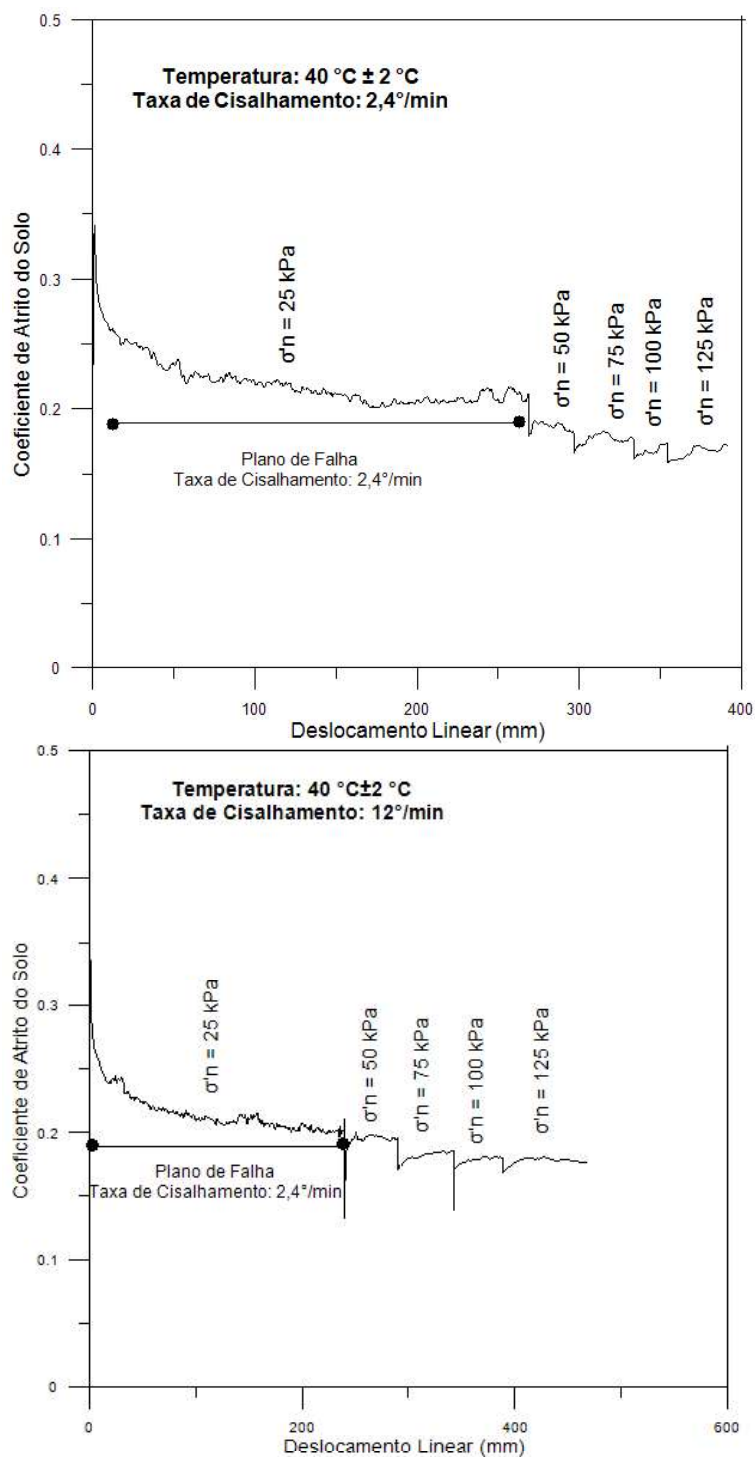


Figura 47 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.

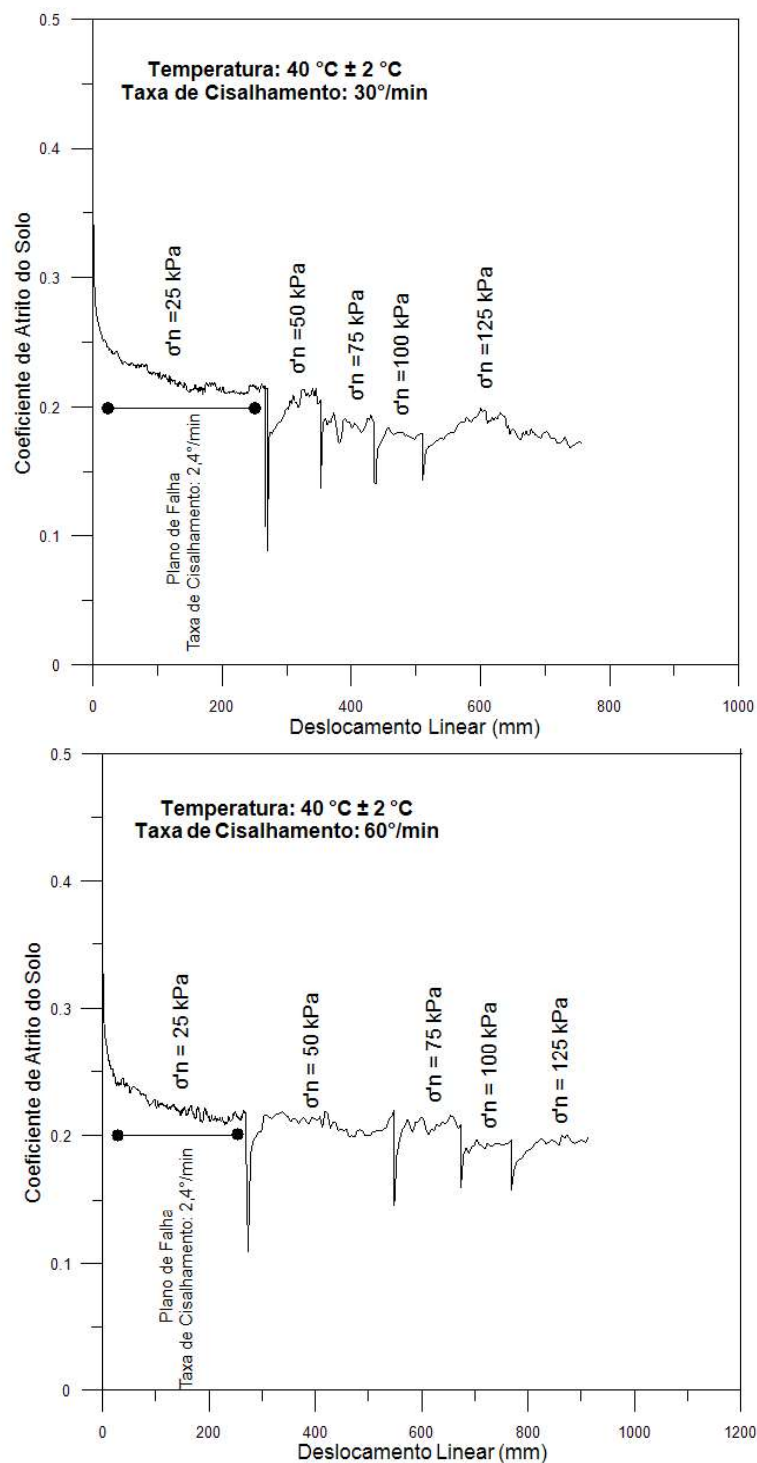


Figura 48 — Coeficiente de Atrito do solo em Função do Deslocamento Linear sob Diferentes Taxas de Cisalhamento em Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min

O método de pré-cisalhamento também é eficaz sob diferentes temperaturas reduzindo o tempo necessário para se obter os valores de resistência residual, independentemente da variação térmica conforme ilustrado da Figura 49 à Figura 54.

A diferença no deslocamento linear observado entre os ensaios está diretamente relacionada à taxa de cisalhamento aplicada. A taxa de cisalhamento de $0,024^\circ/\text{min}$ (Figura 49 e Figura 52a), um minuto de deslocamento linear corresponde a aproximadamente 0,017 milímetros, enquanto na taxa de $60^\circ/\text{min}$ (Figura 51b Figura 54b), ao mesmo tempo equivale a um deslocamento linear de aproximadamente 43,44 milímetros. Dessa forma, para uma melhor representação gráfica, o trecho correspondente à formação do plano de falha nos corpos de prova submetidos à taxa de $0,024^\circ/\text{min}$ foi omitido (Figura 49 e Figura 52a).

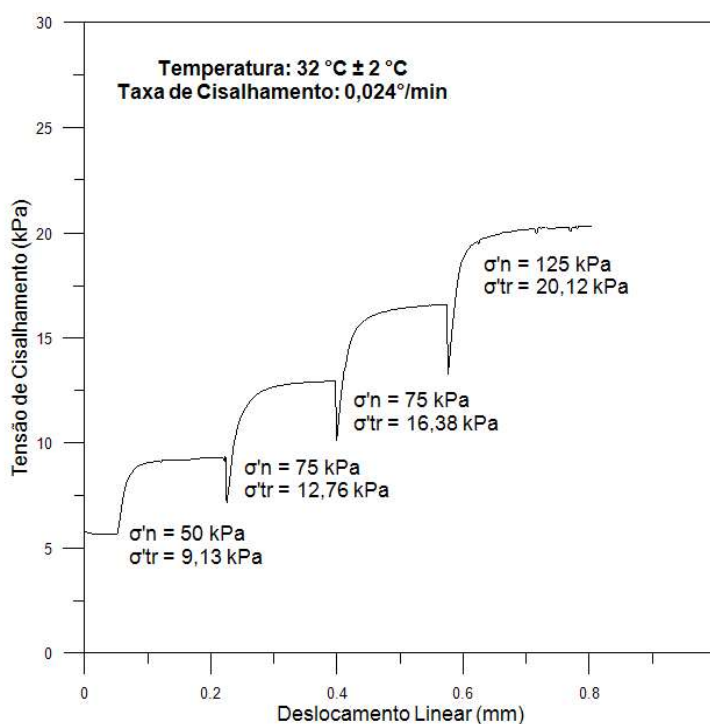


Figura 49 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32°C : Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$.

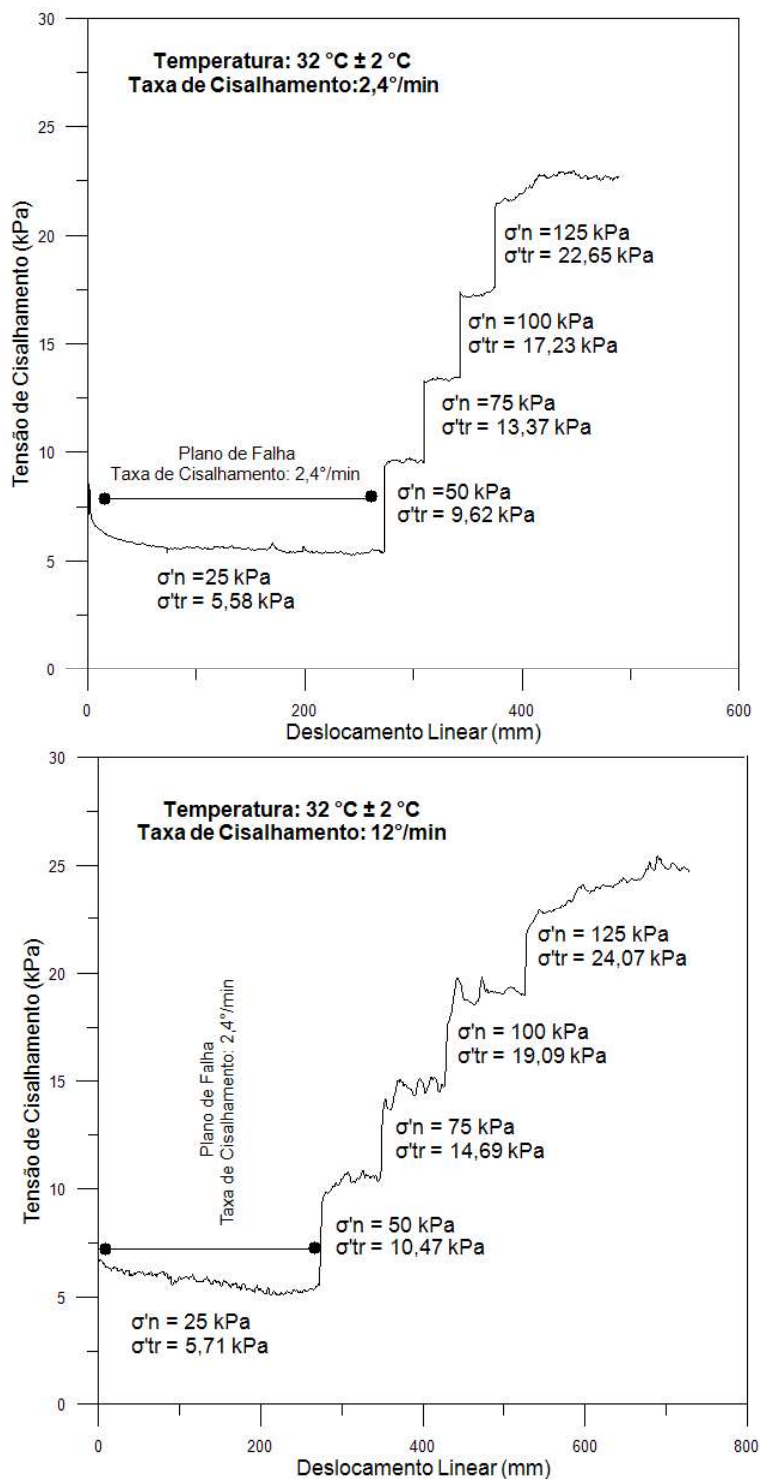


Figura 50 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32 °C:
a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.

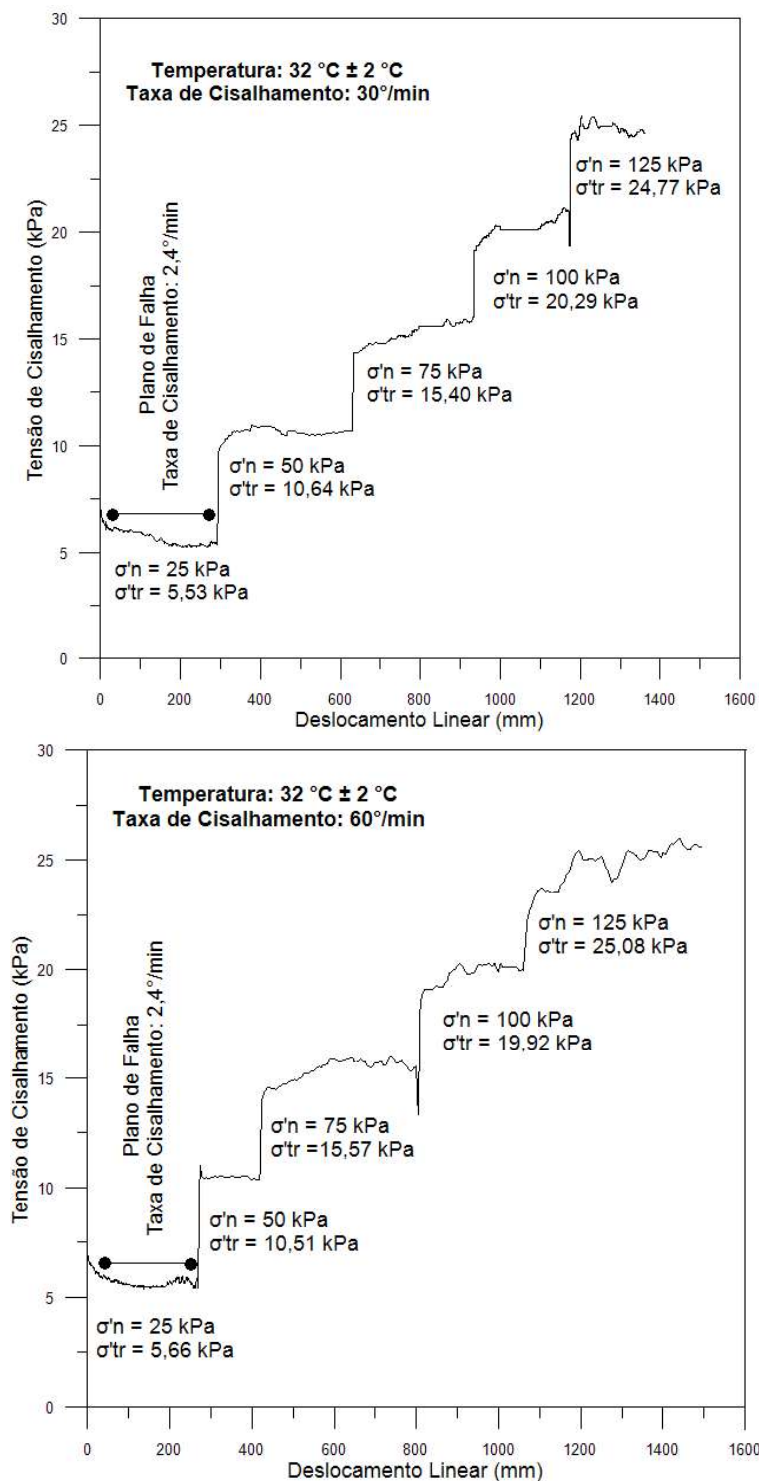


Figura 51 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 32 °C:
a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

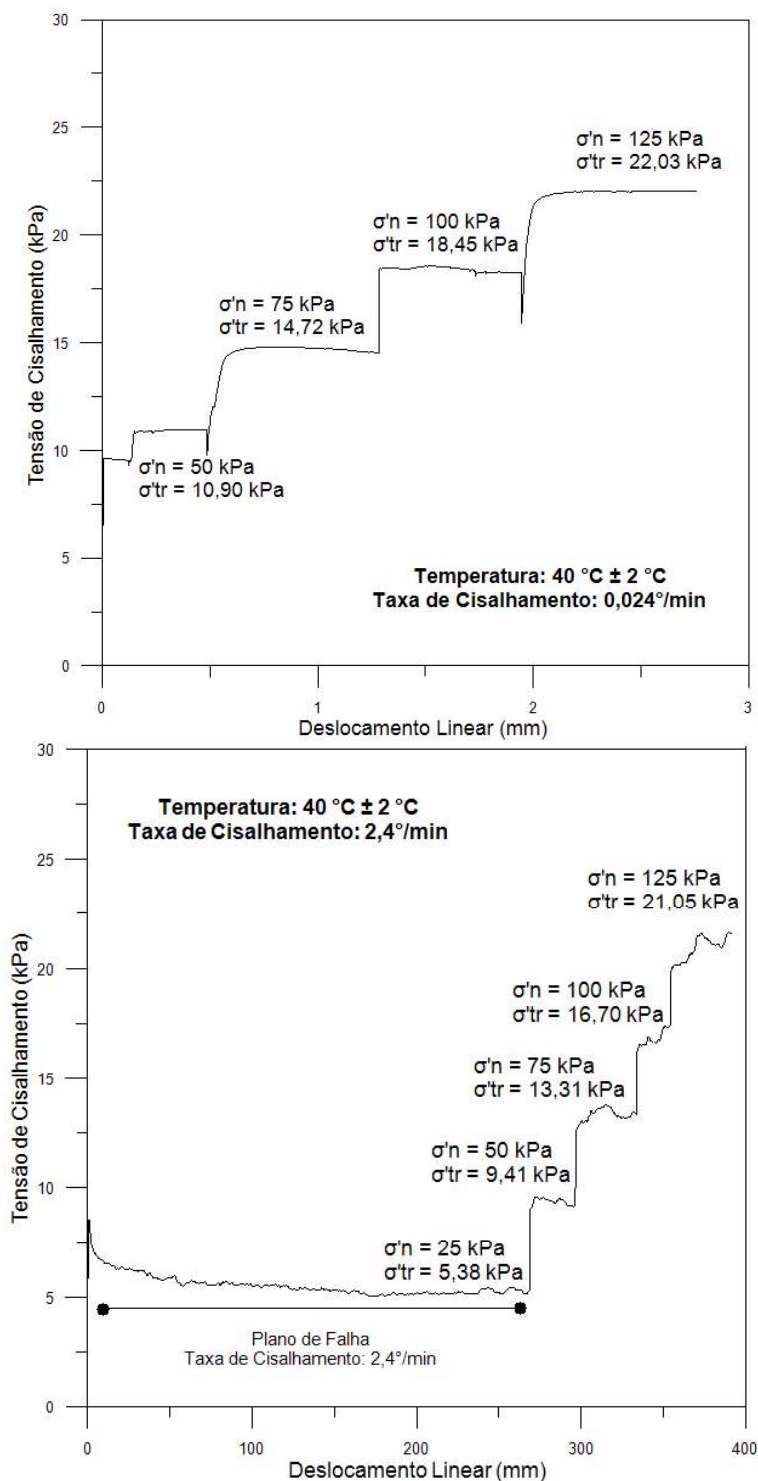


Figura 52 —Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura $40\text{ }^\circ\text{C}$: a) Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$; b) Taxa de Cisalhamento: $2,4^\circ/\text{min}$.

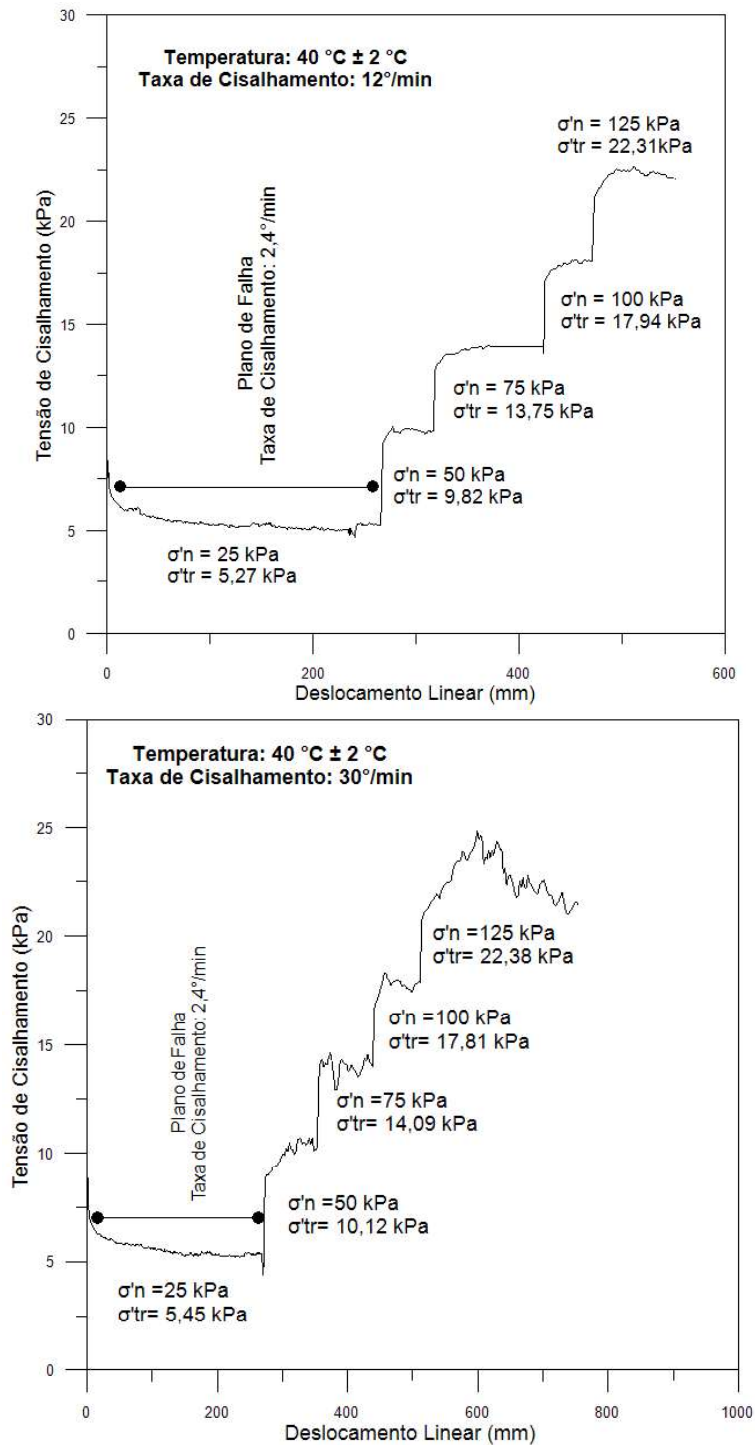


Figura 53 —Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 40 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.

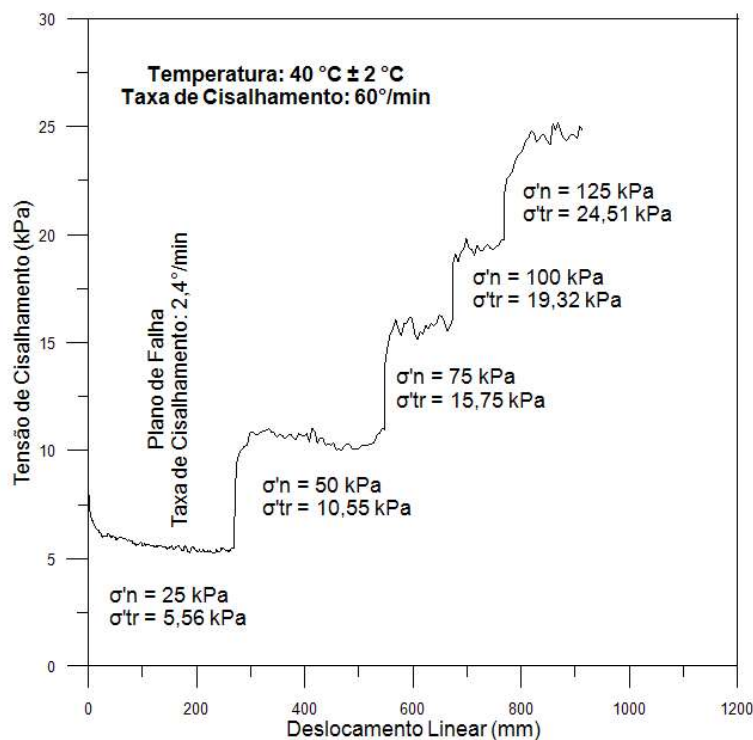


Figura 54 — Tensão de Cisalhamento em Função do Deslocamento Linear sob Temperatura 40 °C a Taxa de Cisalhamento a 60°/min.

Na Figura 49, à temperatura de 32 °C, observou-se início de oscilações mais em baixa taxa de cisalhamento e pareceu aumentar à medida que a tensão normal aumentou. Comportamento semelhante foi observado na Figura 52a, à temperatura de 40 °C. Ambas as figuras indicaram que o comportamento oscilatório se manifestou sob taxas de cisalhamento mais baixas, sugerindo que o aumento da temperatura contribuiu para o aparecimento do comportamento turbulento.

Esse comportamento pode ser explicado pela redução da resistência viscosa; a resistência ao movimento do fluido foi menor a essas taxas de cisalhamento mais baixas e temperaturas mais altas, o que facilitou o movimento das partículas e gerou as oscilações no comportamento de cisalhamento.

A Figura 55 ilustra a tensão de cisalhamento obtida em função da tensão normal sob as diferentes temperaturas aplicadas. Pode-se observar o efeito da taxa de cisalhamento independente da temperatura aplicada.

Neste caso, observou-se que a taxa de cisalhamento continua influenciando a tensão de cisalhamento mesmo com o aumento da temperatura. Esse comportamento ocorre porque, embora a resistência viscosa tenha diminuído devido à influência da temperatura — que transformou parte da água adsorvida em água livre —, a água adsorvida restante contribuiu para a resistência ao movimento do fluido. Dessa

maneira, observou-se um efeito acoplado: a tensão de cisalhamento diminuiu com o aumento da temperatura e cresce com a taxa de cisalhamento.

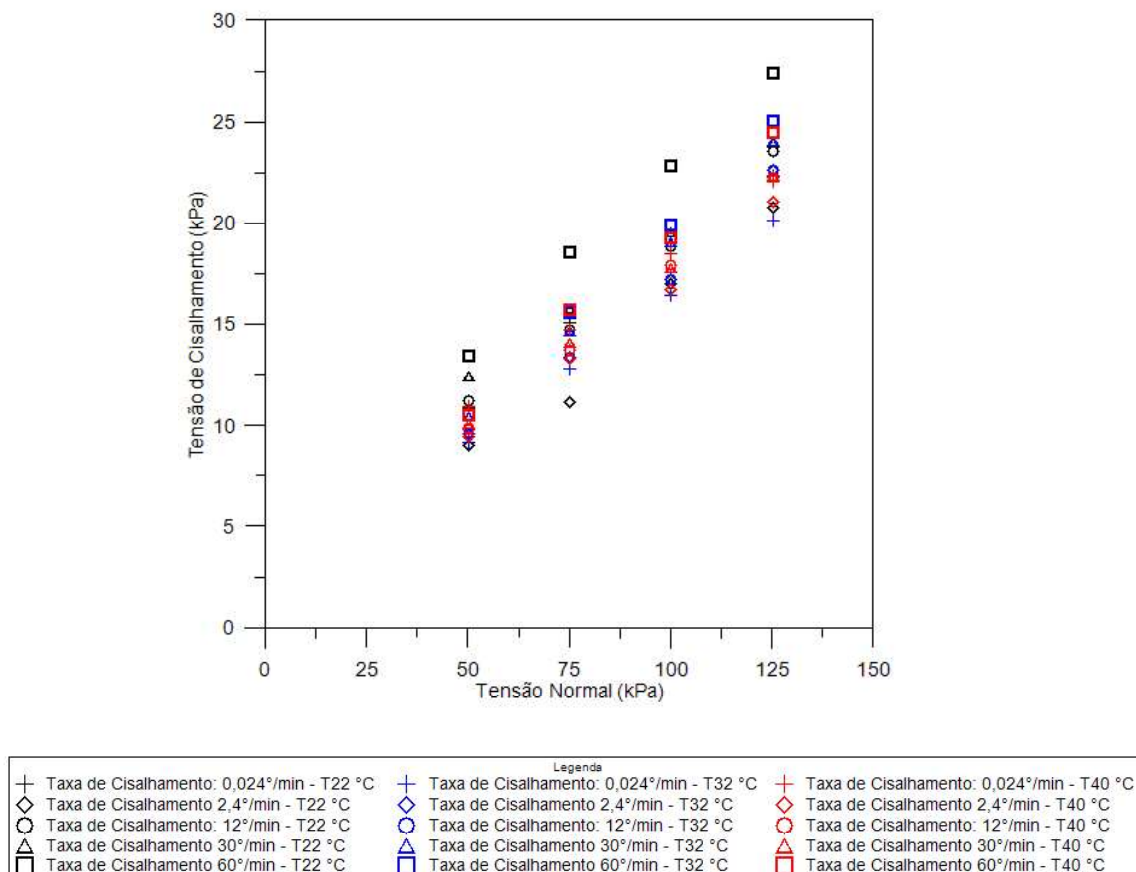


Figura 55 — Tensão de Cisalhamento em Função da Tensão Normal sob Diferentes Temperaturas.

A Figura 56, à temperatura de 22 °C, observa-se um aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da taxa de cisalhamento e da tensão normal. Esse comportamento sugere uma contribuição adicional da parcela viscosa à resistência ao cisalhamento.

Já na Figura 57a, a 32 °C, o efeito do aumento da taxa de cisalhamento na resistência ao cisalhamento continua sendo observado. Nas tensões normais de 50 kPa, os valores estão mais próximos, embora ainda se tenha observado um leve aumento da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento pode ser atribuído à diminuição da viscosidade da água em função do aumento da temperatura, o que favoreceu a mobilidade das partículas, principalmente sob uma baixa tensão normal.

A partir de 75 kPa, observou-se um efeito mais pronunciado da taxa de cisalhamento. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em tensões normais mais

altas, as partículas de solo teriam menor mobilidade, o que contribuiu para deixar a influência da taxa de cisalhamento mais evidente.

Por fim, a Figura 57b, à temperatura de 40 °C, a influência da taxa de cisalhamento é menos evidente até a tensão normal de 100 kPa, o que pode ser atribuído à redução da resistência viscosa, mais evidente comparada a 32 °C.

Por fim, concluiu-se que a taxa de cisalhamento perde parte de sua influência com o aumento da temperatura em razão a redução da parcela atribuída a resistência viscosa.

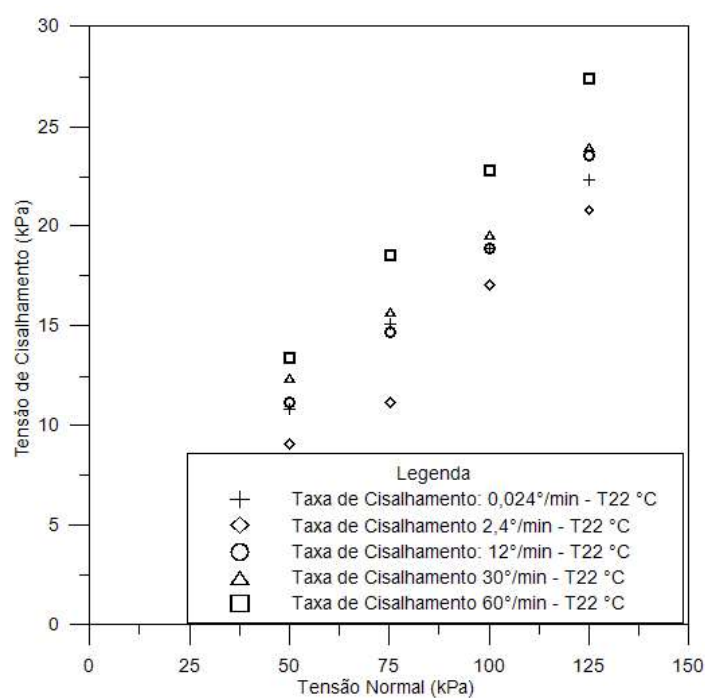


Figura 56 — Efeito da Taxa de Cisalhamento na Tensão de Cisalhamento do Solo Caulim Speswhite na Temperatura: 22 °C.

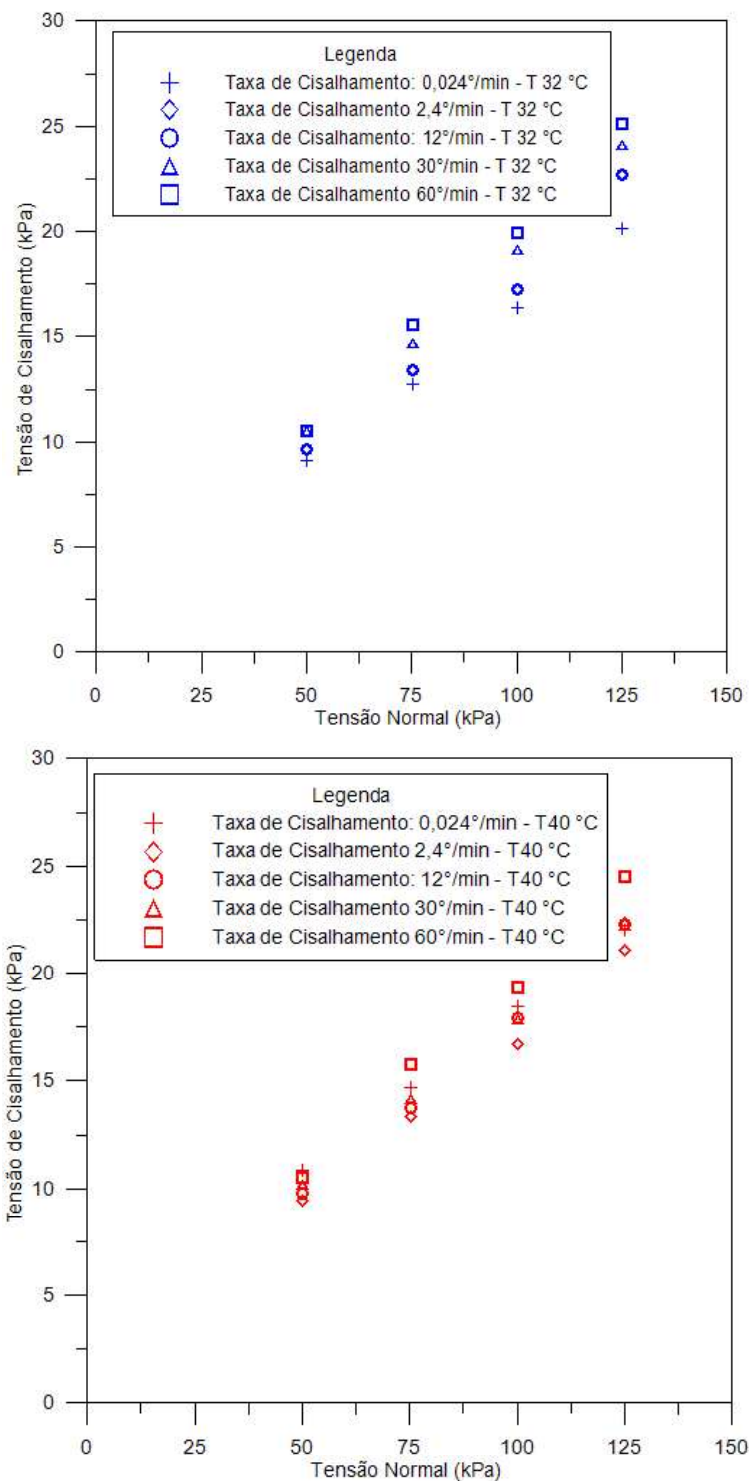


Figura 57 — Efeito da Taxa de Cisalhamento na Tensão de Cisalhamento do Solo Caulim Speswhite: a) Temperatura: 32 °C; b) Temperatura: 40 °C.

A Figura 58 a Figura 60 apresentam a relação entre o deslocamento vertical x horizontal em função da tensão normal sob temperatura ambiente. Essa análise permite verificar se o solo atingiu a resistência residual, quando o deslocamento vertical se mantém praticamente constante ao longo de um deslocamento horizontal.

A Figura 58 correspondente à taxa de cisalhamento de $0,024^\circ/\text{min}$. A baixa taxa de cisalhamento permitiu que o solo atingisse rapidamente o estado residual, sem grandes deslocamentos verticais. Na Figura 59a correspondente à taxa de cisalhamento de $2,4^\circ/\text{min}$, observou-se leves flutuações no início do ensaio, que posteriormente se estabilizam. Essas leves flutuações estão associadas a mudança no modo de cisalhamento. Esse comportamento pode ser atribuído ao modo de cisalhamento transicional. O deslocamento vertical não foi significativo, mostrando apenas as flutuações geradas pelo modo de cisalhamento, indicando que o solo também atingiu o estado residual. O mesmo comportamento ocorreu na taxa de $12^\circ/\text{min}$ (Figura 59b).

O aumento no deslocamento vertical observado nas taxas de cisalhamento de $30^\circ/\text{min}$ e $60^\circ/\text{min}$ (Figura 60), pode ser atribuído à extrusão do solo provocada pelo aumento da taxa de cisalhamento. Dessa forma, as amostras submetidas a essas taxas de cisalhamento atingiram o estado residual, porém devido a extrusão do solo ocorreu essa pequena variação do deslocamento vertical.

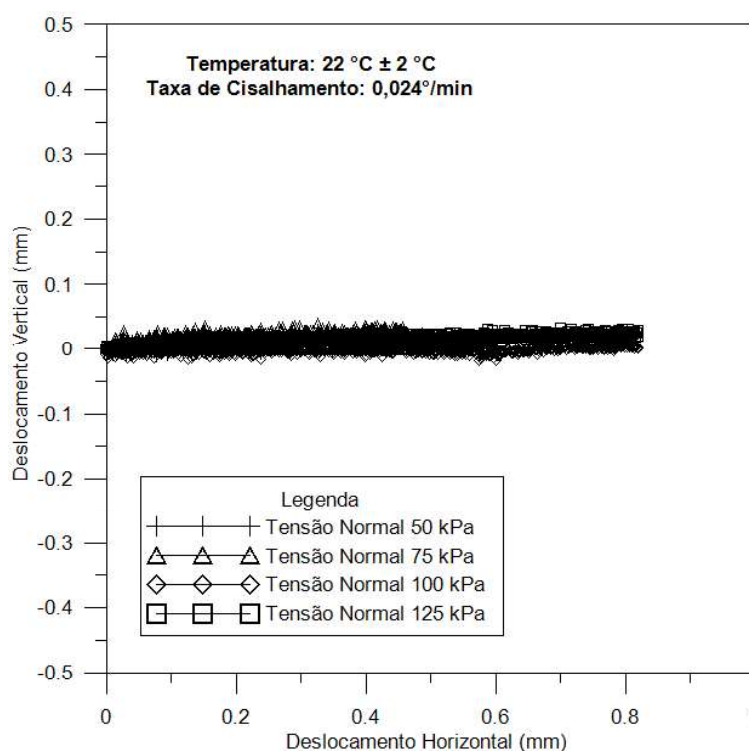


Figura 58 — Variação Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente sob a Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$.

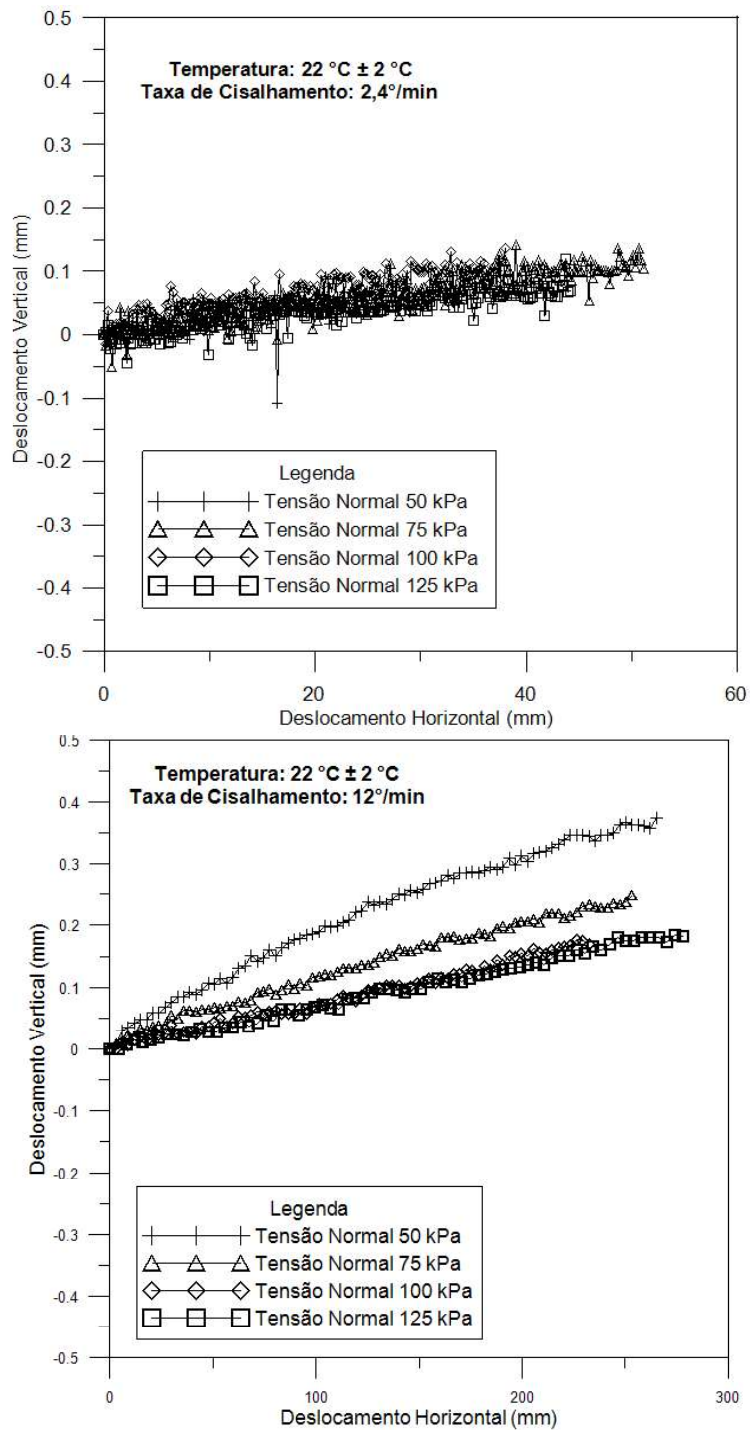


Figura 59 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.

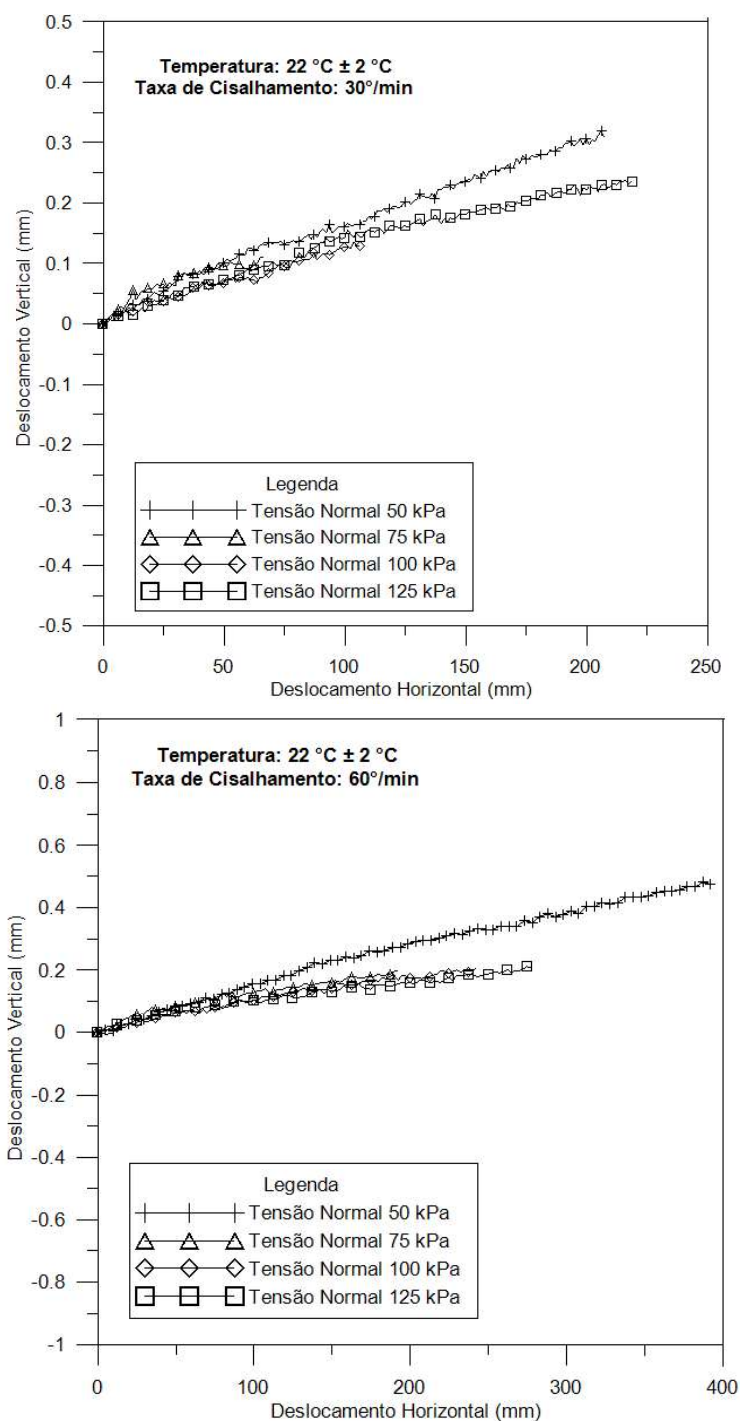


Figura 60 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal em Temperatura Ambiente: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

Os corpos de prova submetidos às temperaturas de 32 °C e 40 °C (Figura 61 a Figura 66) apresentaram deslocamento vertical versus horizontal semelhante à observada em temperatura ambiente, indicando que o solo atingiu a resistência residual em diferentes temperaturas. Foram observadas flutuações no deslocamento vertical, possivelmente decorrentes da expansão das partículas de solo e da água

adsorvida. Esse comportamento também foi observado em baixas taxas de cisalhamento, o que pode ser atribuído à antecipação do modo de cisalhamento, favorecida pela redução da resistência viscosa, que facilitou a movimentação das partículas de solo.

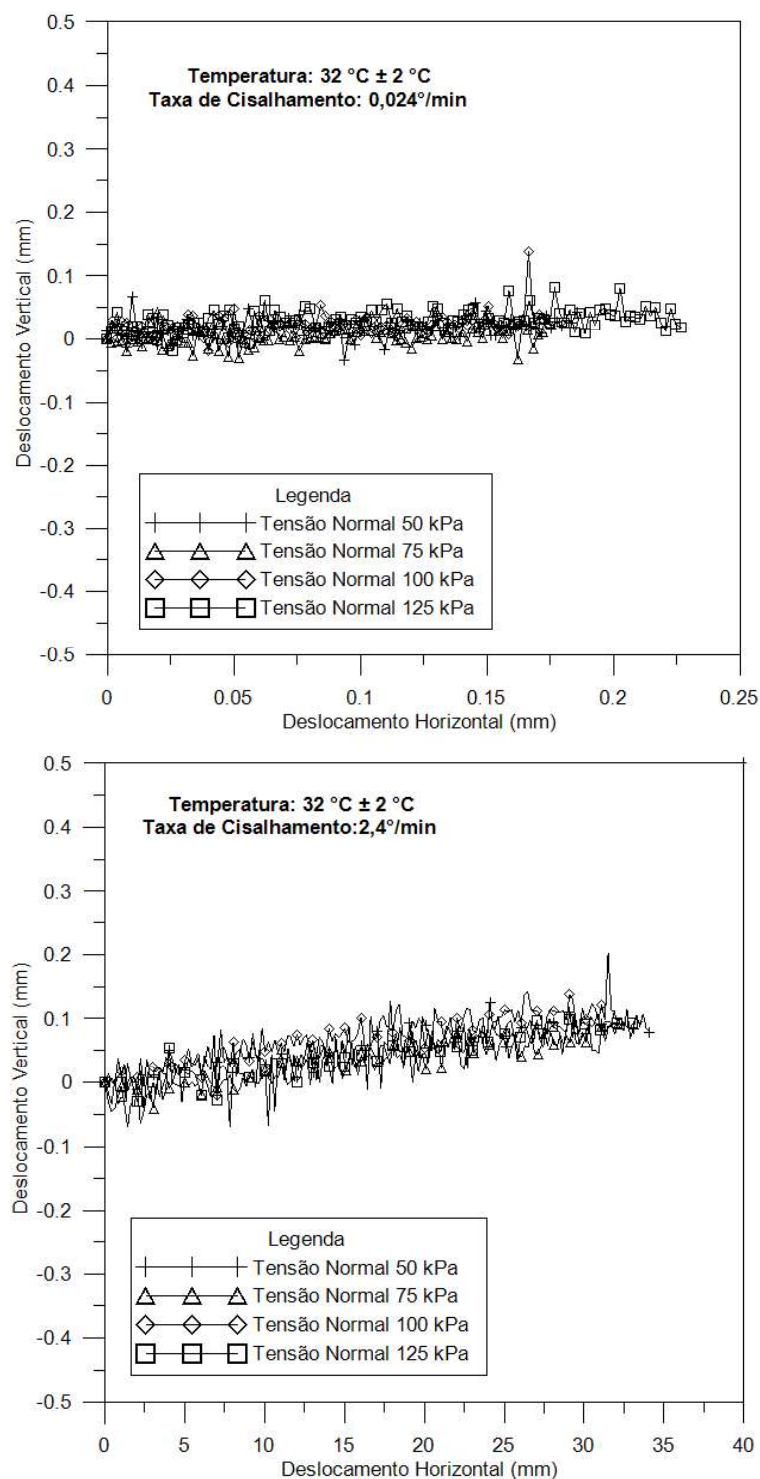


Figura 61 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura $32\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$: a) Taxa de Cisalhamento: $0,024^{\circ}/\text{min}$; b) Taxa de Cisalhamento: $2,4^{\circ}/\text{min}$.

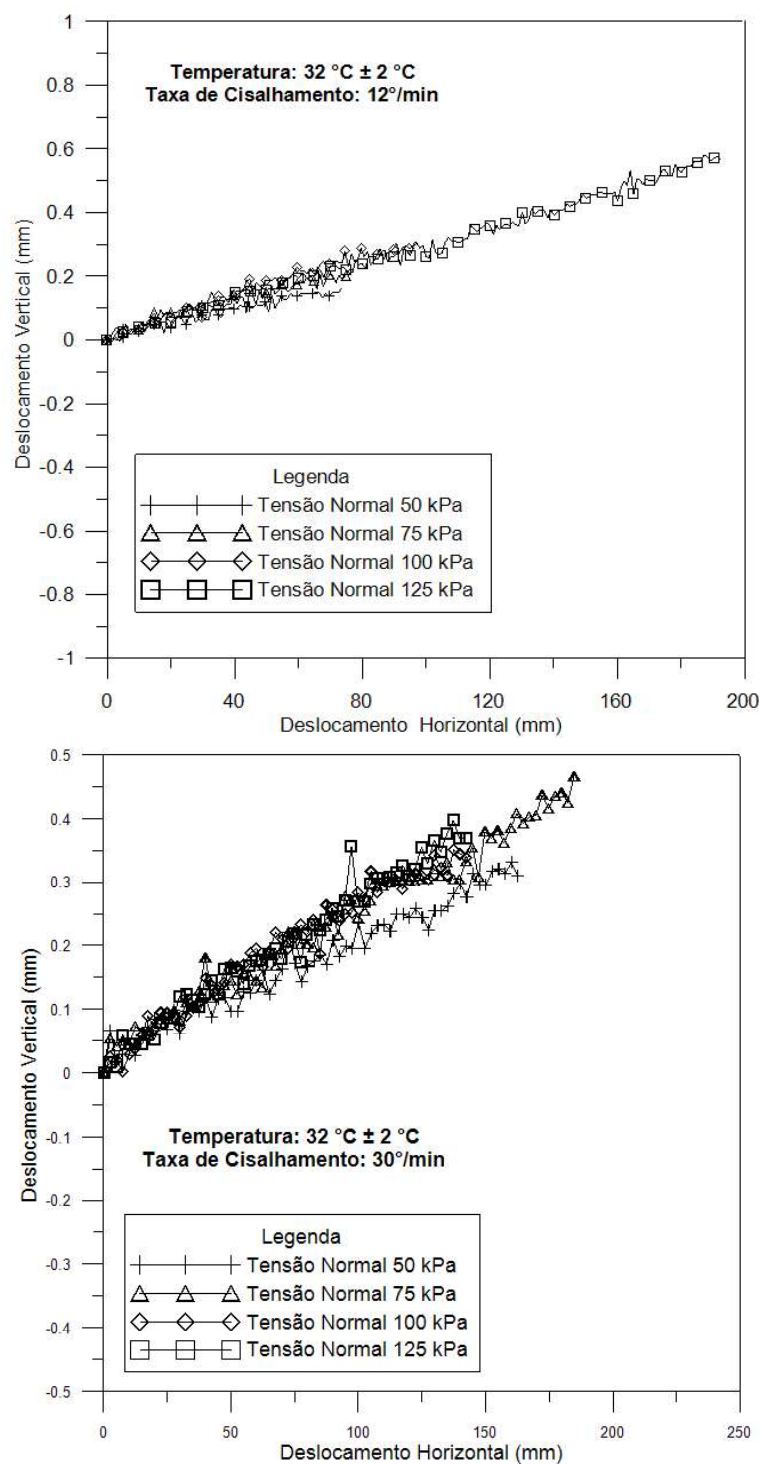


Figura 62 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 32 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 12°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 30°/min.

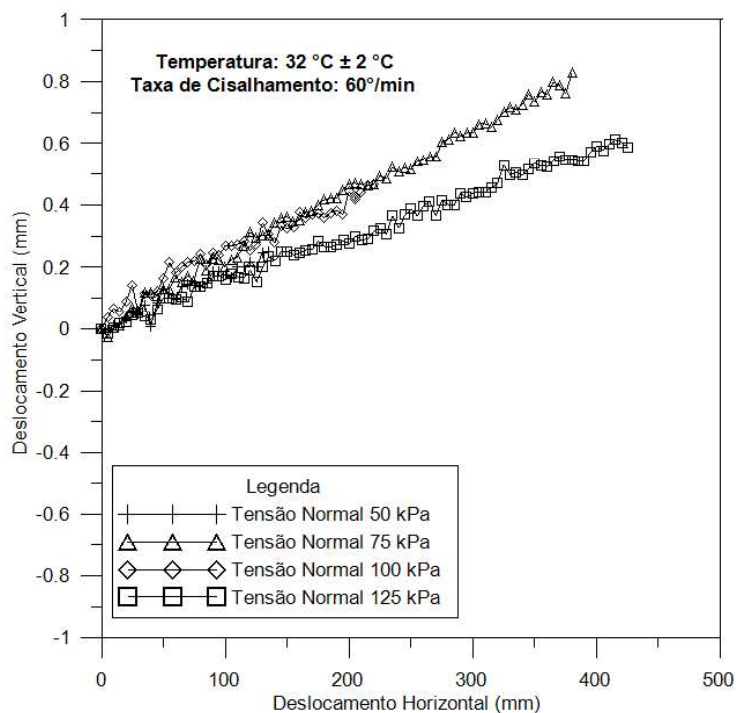


Figura 63 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura: 32 °C ± 2 °C; Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

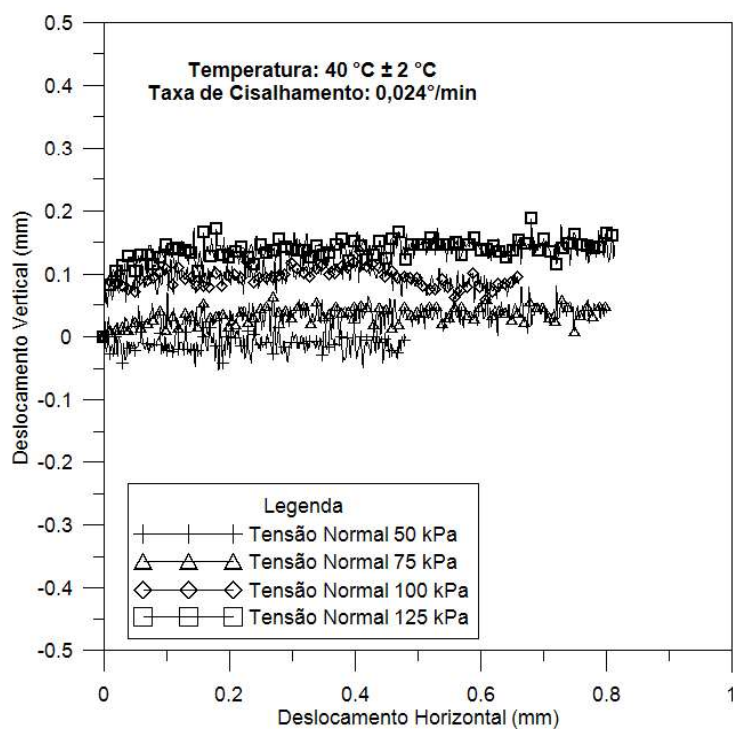


Figura 64 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C; Taxa de Cisalhamento: 0,024°/min.

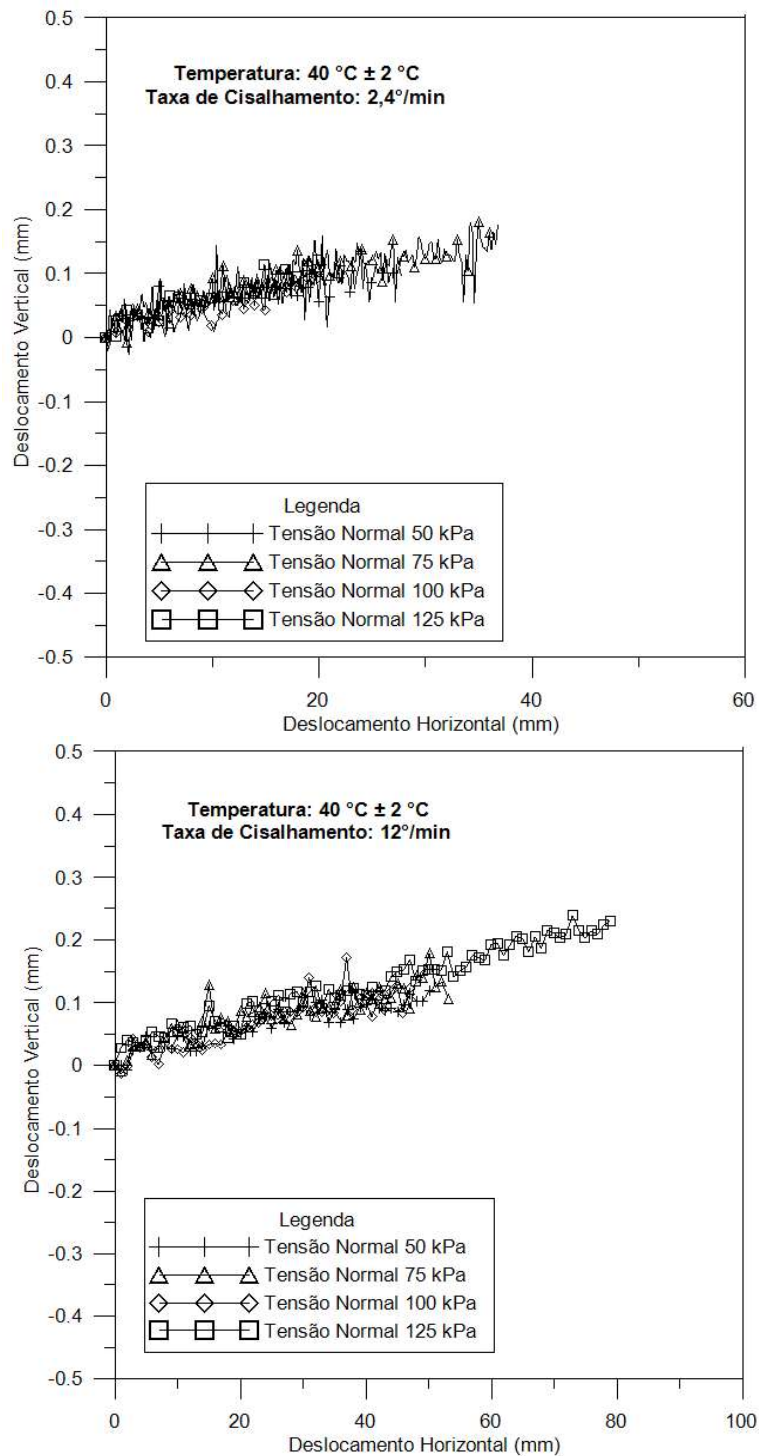


Figura 65 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.

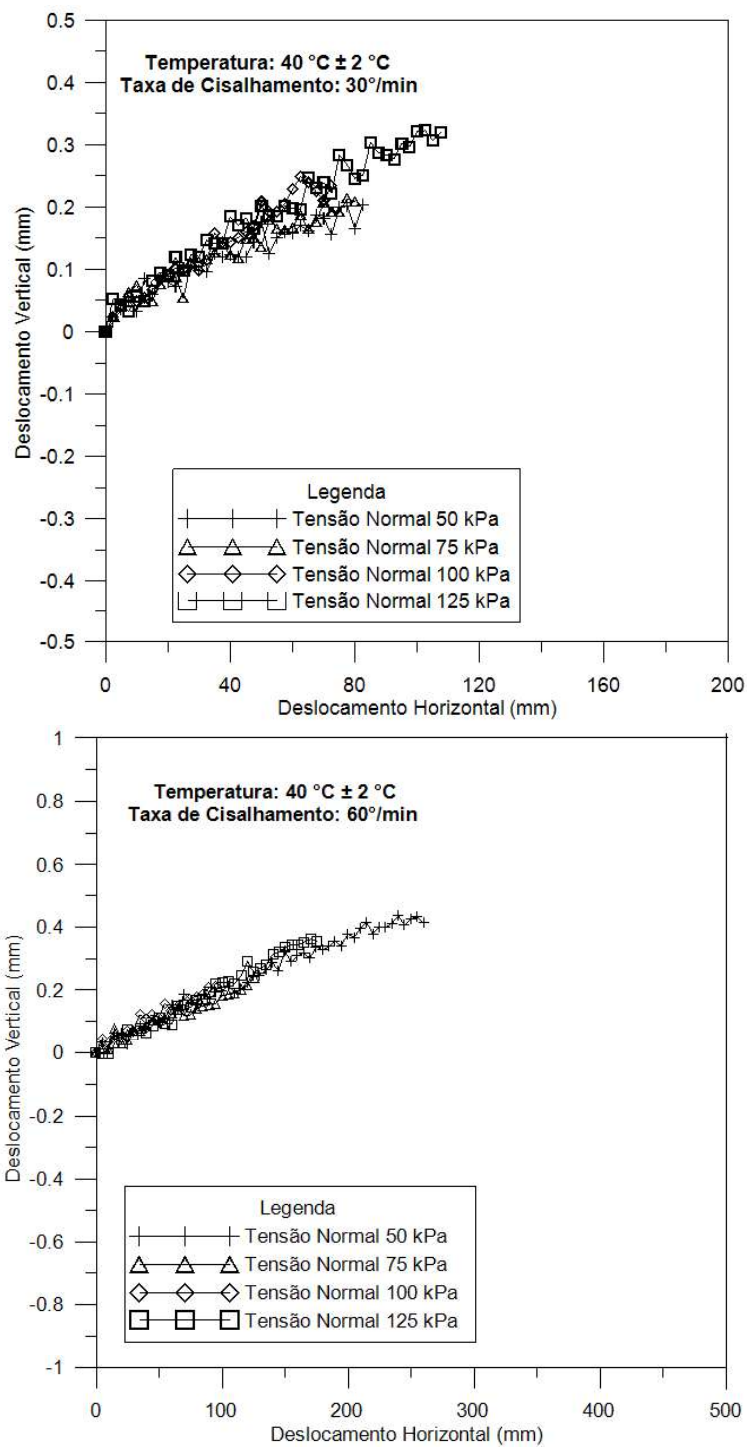


Figura 66 — Deslocamento Vertical x Horizontal em Função da Tensão Normal a Temperatura 40 °C ± 2 °C: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

4.2 Avaliação das Flutuações na Resistência Residual

O desvio padrão é uma medida de dispersão em torno de uma média populacional ou amostral. É utilizado para identificar padrões de mudança em diferentes amostras ou populações. Sua equação é a raiz quadrada da variância, que, por sua vez, é a soma da média dos quadrados da diferença entre o valor da população (x_i) e a média (μ), dividido pela soma do conjunto ou da amostra (N).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \quad 13$$

Na fórmula original do desvio padrão, utiliza-se a média, que calcula a soma de todos os valores de um conjunto de dados e divide pelo número total de elementos da população ou amostra analisada. Embora a média seja amplamente utilizada como medida de tendência central, ela é sensível a valores extremos (outliers), que poderia distorcer o valor real da resistência residual. Isso pode ocorrer porque, na resistência residual, o solo atinge um estado de equilíbrio.

Em ensaios de cisalhamento de anel, à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, podem surgir flutuações na resistência residual. Dessa forma, o uso da mediana se mostrou uma medida estatística mais apropriada para a análise da resistência residual, pois possui uma distribuição mais assimétrica de um conjunto populacional. A mediana, é menos sensível a valores extremos, oferecendo valores mais reais da resistência residual, refletindo o comportamento esperado do solo em um estado de equilíbrio. Por este motivo, a equação do desvio padrão foi modificada.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - Md)^2}{N}} \quad 14$$

Conforme argumentado por Duong; Suzuki; Van Hai, (2018), o aumento da velocidade no ensaio de cisalhamento de anel pode levar a maiores flutuações na resistência residual. Dessa forma, o uso da fórmula modificada do desvio padrão representa adequadamente a variação em torno da mediana, desconsiderando os valores extremos (outliers).

O conjunto de dados analisados foi representado abaixo (Tabela 10 a Tabela 13). Cada conjunto de dados representa uma tensão normal e uma taxa de cisalhamento sob uma mesma temperatura. O conjunto de dados foi dividido assim, pois o solo pode ter tendências diferentes dependendo da tensão normal, taxa de cisalhamento e temperatura.

Tabela 10 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 22 °C.

Conjunto de Dados	Tensão Normal (kPa)	Taxa de Cisalhamento
1	50	0,024°/min
2	75	0,024°/min
3	100	0,024°/min
4	125	0,024°/min
5	25	2,4°/min
6	50	2,4°/min
7	75	2,4°/min
8	100	2,4°/min
9	125	2,4°/min
10	50	12°/min
11	75	12°/min
12	100	12°/min
13	125	12°/min
14	50	30°/min
15	75	30°/min
16	100	30°/min
17	125	30°/min
18	50	60°/min
19	75	60°/min
20	100	60°/min
21	125	60°/min

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 11 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 32 °C.

Conjunto de Dados	Tensão Normal (kPa)	Taxa de Cisalhamento
23	75	0,024°/min
24	100	0,024°/min
25	125	0,024°/min
26	25	2,4°/min
27	50	2,4°/min
28	75	2,4°/min
29	100	2,4°/min
30	125	2,4°/min
31	50	12°/min
32	75	12°/min
33	100	12°/min
34	125	12°/min
35	50	30°/min
36	75	30°/min
37	100	30°/min
38	125	30°/min

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 12 — Continuação da Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 32 °C — 2024.

(conclusão)		
Conjunto de Dados	Tensão Normal (kPa)	Taxa de Cisalhamento
39	50	60°/min
40	75	60°/min
41	100	60°/min
42	125	60°/min

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 13 — Distribuição Populacional para Análise Estatística das Flutuações na Resistência Residual sob Temperatura 40 °C — 2024.

Conjunto de Dados	Tensão Normal (kPa)	Taxa de Cisalhamento
43	50	0,024°/min
44	75	0,024°/min
45	100	0,024°/min
46	125	0,024°/min
47	25	2,4°/min
48	50	2,4°/min
49	75	2,4°/min
50	100	2,4°/min
51	125	2,4°/min
52	50	12°/min
53	75	12°/min
54	100	12°/min
55	125	12°/min
56	50	30°/min
57	75	30°/min
58	100	30°/min
59	125	30°/min
60	50	60°/min
61	75	60°/min
62	100	60°/min
63	125	60°/min

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A Figura 67 e Figura 68 apresentam a relação entre a tensão normal e o desvio padrão para diferentes taxas de cisalhamento e temperaturas. O desvio padrão reflete as flutuações na tensão de cisalhamento observadas para cada tensão normal e taxa de cisalhamento. A taxa de 0,024°/min apresentou a menor variabilidade, o que sugere condições mais controladas e homogêneas. No entanto, os valores médios observados em 2,4°/min e 12°/min sugeriram um comportamento não linear do solo. Essas taxas intermediárias evidenciaram uma zona de transição, na qual os efeitos viscosos se tornaram mais evidentes, indicando um modo de cisalhamento transicional.

As taxas de 30°/min e 60°/min exibiram maiores flutuações, indicando um modo de cisalhamento turbulento, onde o comportamento do solo é dominado por efeitos

viscosos. O aumento do desvio padrão em taxas mais elevadas pode ser atribuído a maior variabilidade na tensão de cisalhamento em solos mais consolidados.

Observou-se que houve uma redução do desvio padrão à medida que a temperatura aumentou de 22 °C para 32 °C e 40 °C, principalmente em taxas mais altas 30°/min e 60°/min. Nas taxas intermediárias de cisalhamento 2,4°/min e 12°/min, notou-se um ligeiro aumento no desvio padrão nas tensões normais de 100 kPa e 125 kPa. Esse comportamento pode ser explicado pela transição dos modos de cisalhamento evidenciados nessas taxas. Por fim, o aumento da temperatura diminuiu a resistência viscosa tornando as flutuações menos evidentes. Esse efeito facilitou o deslizamento e a acomodação das partículas.

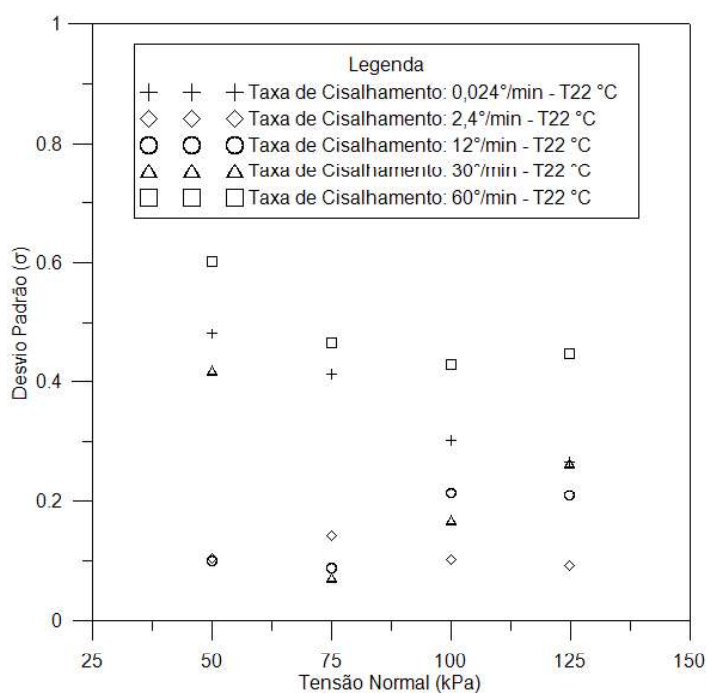


Figura 67 — Desvio Padrão das Variações da Tensão Cisalhante sob a Tensão Normal sob Temperatura de 22 °C ± 2 °C.

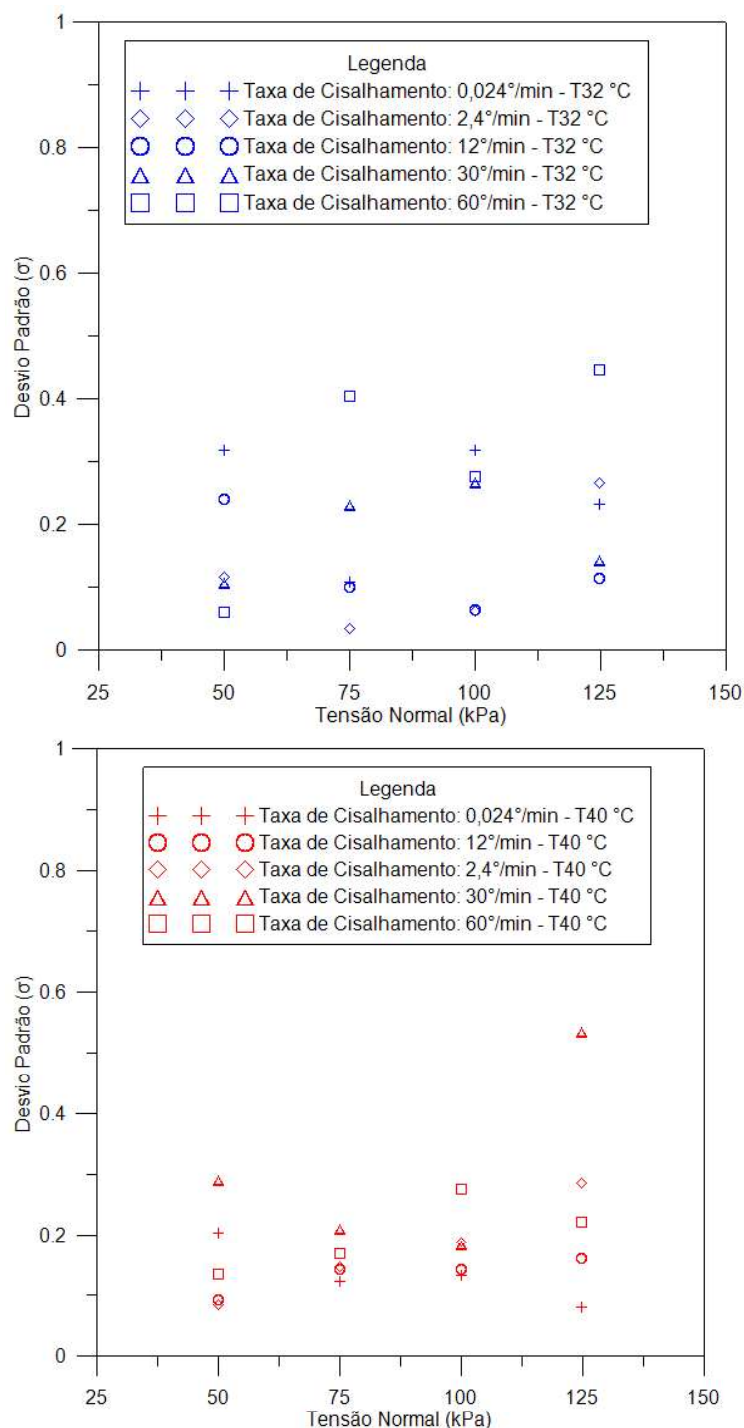


Figura 68 — Desvio Padrão das Variações da Tensão Cisalhante sob a Tensão Normal: a) Temperatura de 32 °C \pm 2 °C; b) Temperatura de 40 °C \pm 2 °C.

Conforme ilustrado na Figura 69 a Figura 70, o aumento da temperatura reduziu o ângulo de atrito, enquanto o efeito da taxa de cisalhamento continuou influenciando a resistência residual. Esse comportamento está associado à resistência viscosa, influenciada tanto pela temperatura quanto pela taxa de cisalhamento. Embora processos físicos e químicos possam ocorrer com o aumento da temperatura, como a transição da água adsorvida em água livre, a principal contribuição observada parece

resultar da diminuição da viscosidade. A redução da viscosidade da água, provocada pelo aumento da temperatura, reduz a resistência ao movimento do fluido e facilita o deslizamento entre partículas de solo; conseqüentemente, reduz a resistência ao cisalhamento residual.

Em temperatura ambiente, a maior quantidade de água adsorvida na amostra aumentou a resistência do fluido ao movimento, resultando em ângulos de atrito maiores (Figura 69).

Na taxa $0,024^\circ/\text{min}$, correspondente a uma velocidade normalizada entre 0,21 e 0,31), permitiu um comportamento drenado do solo e reorganização das partículas pois possuem mais tempo de se organizar, caracterizando um comportamento drenado a ângulos de atrito maiores comparados a taxa $2,4^\circ/\text{min}$. Já das taxas $12^\circ/\text{min}$, $30^\circ/\text{min}$ e $60^\circ/\text{min}$ independente da temperatura (Figura 70), os ângulos de atrito foram maiores devido à resistência viscosa associada ao movimento do fluido.

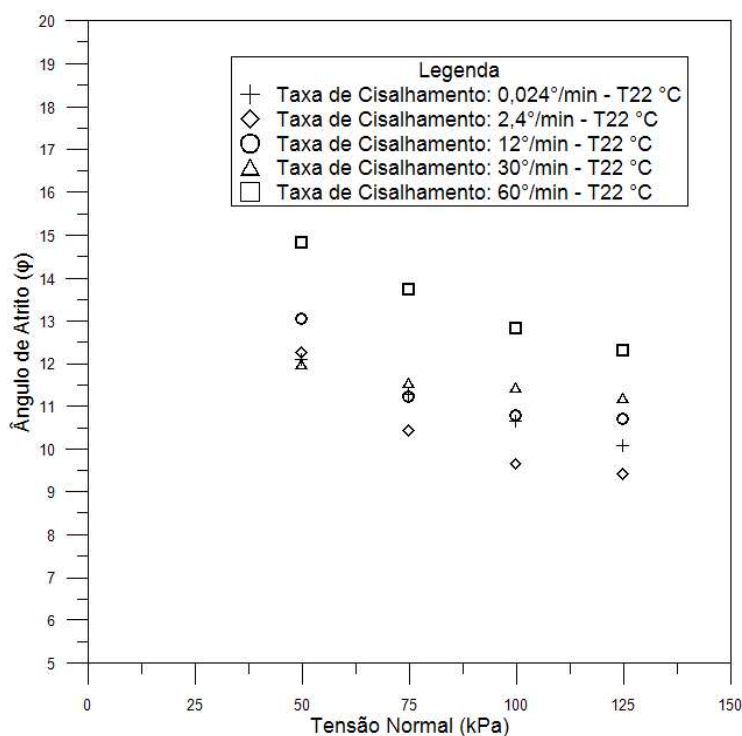


Figura 69 — Influência da Taxa de Cisalhamento no Ângulo de Atrito sob a Temperatura $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

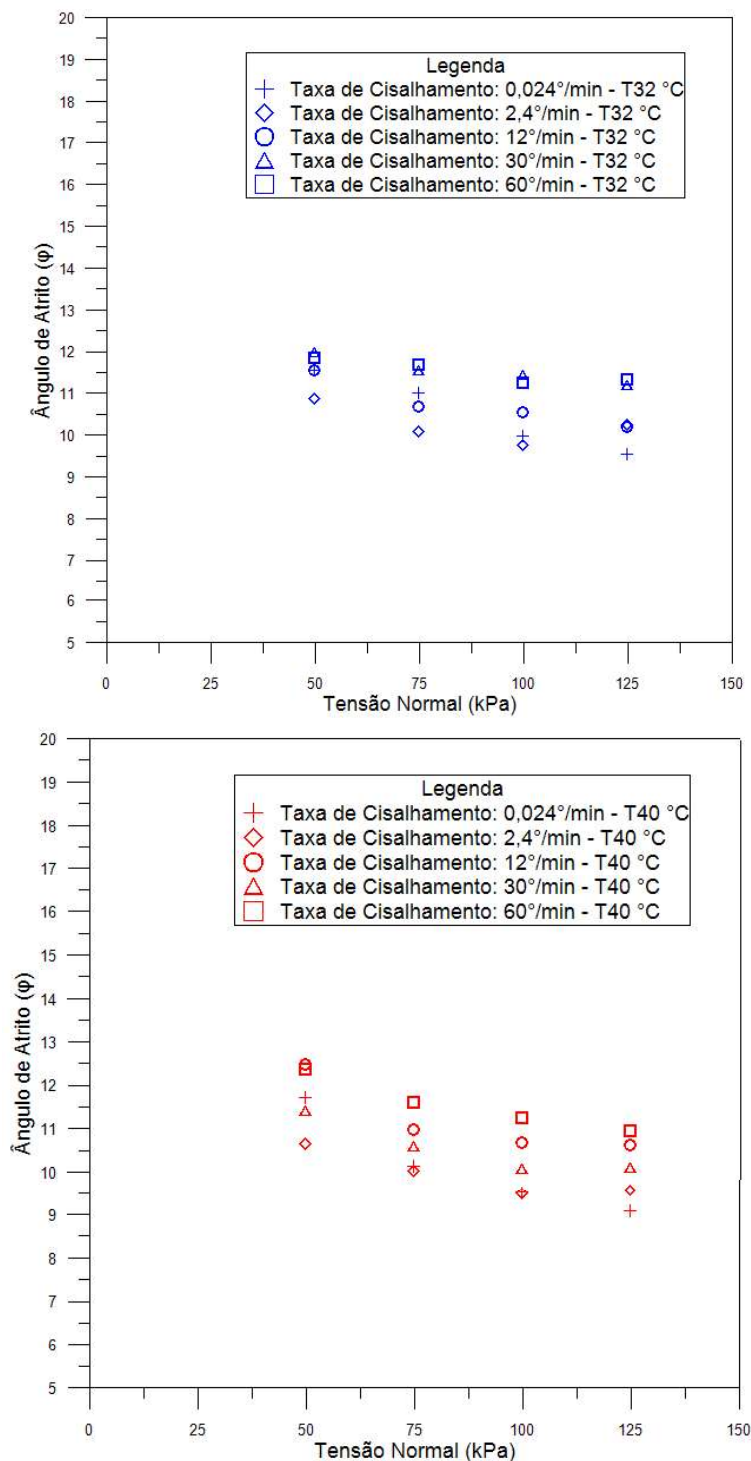


Figura 70 — Influência da Taxa de Cisalhamento no Ângulo de Atrito sob Cada Temperatura: a) Temperatura 32 °C ± 2 °C; b) Temperatura 40 °C ± 2 °C.

Notou-se que o impacto da temperatura no comportamento do solo é mais evidente ao se comparar de 22 °C com 32 °C, em relação a 32 °C com 40 °C, em todas as taxas de cisalhamento, conforme detalhado na Figura 71 a Figura 73. Este resultado é consistente com a literatura que prevê uma curva de influência da temperatura na viscosidade da água, conforme exemplificado na Figura 26.

A resistência viscosa continuou exercendo influência sobre o ângulo de atrito em todas as temperaturas. Na taxa de cisalhamento $0,024^\circ/\text{min}$ (Figura 71) indicou que as condições de cisalhamento lento permitiram um comportamento drenado e as partículas tiveram tempo suficiente para se rearranjar mobilizando maior resistência. Os ângulos de atrito maiores a 22°C sugerem que essa temperatura possui maior resistência viscosa comparada à temperatura de 32°C e 40°C .

Por outro lado, na taxa de cisalhamento $60^\circ/\text{min}$ (Figura 73b) os ângulos de atrito reduziram com o aumento da temperatura. O impacto da resistência viscosa foi mais evidente, resultando em uma redução percentual global do ângulo de atrito de 14,5% ao elevar a temperatura de 22°C para 32°C . No entanto, ao passar de 32°C para 40°C , essa redução foi de apenas 0,85%. Esse comportamento pode ser atribuído à alta resistência viscosa gerada nessa taxa em razão da alta velocidade de cisalhamento. Com o aumento da temperatura, a expulsão de água do corpo de prova aproximou as partículas do solo, como consequência o efeito da resistência viscosa em função da velocidade foi reduzindo gradativamente. No entanto, os ângulos de atrito continuaram maiores em comparação à taxa de $0,024^\circ/\text{min}$, evidenciando um comportamento mais viscoso.

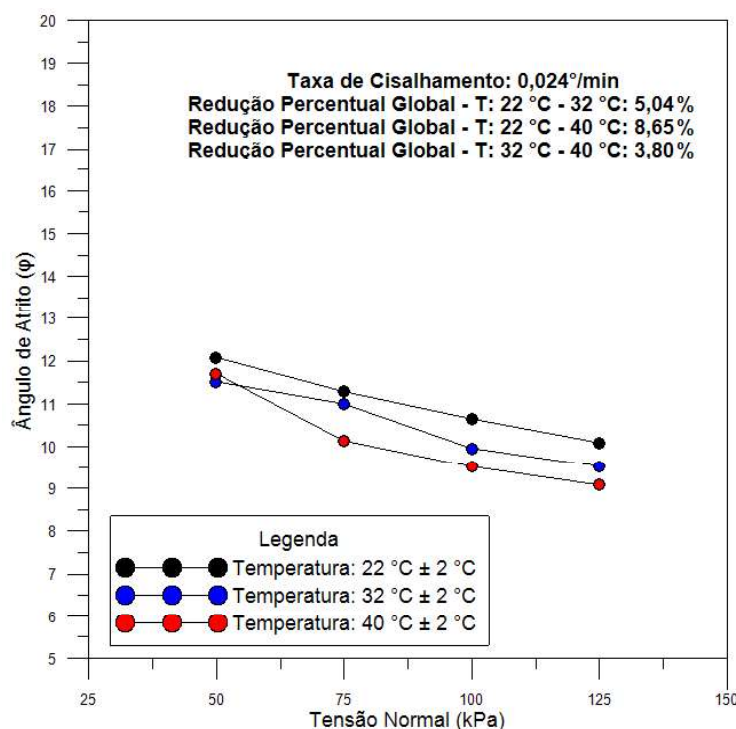


Figura 71 — Influência da Temperatura na Taxa de Cisalhamento: $0,024^\circ/\text{min}$.

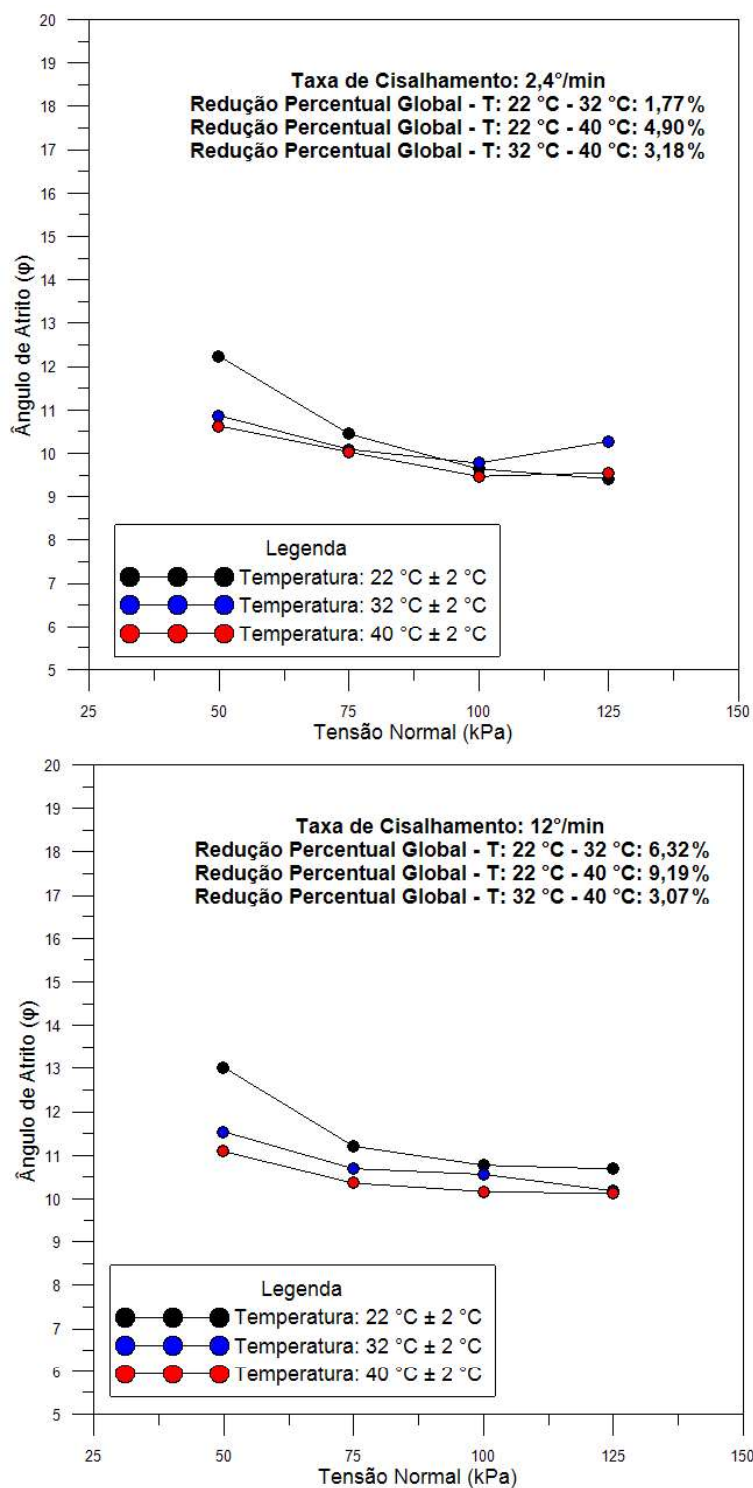


Figura 72 — Influência da Temperatura em Cada Taxa de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: 2,4°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 12°/min.

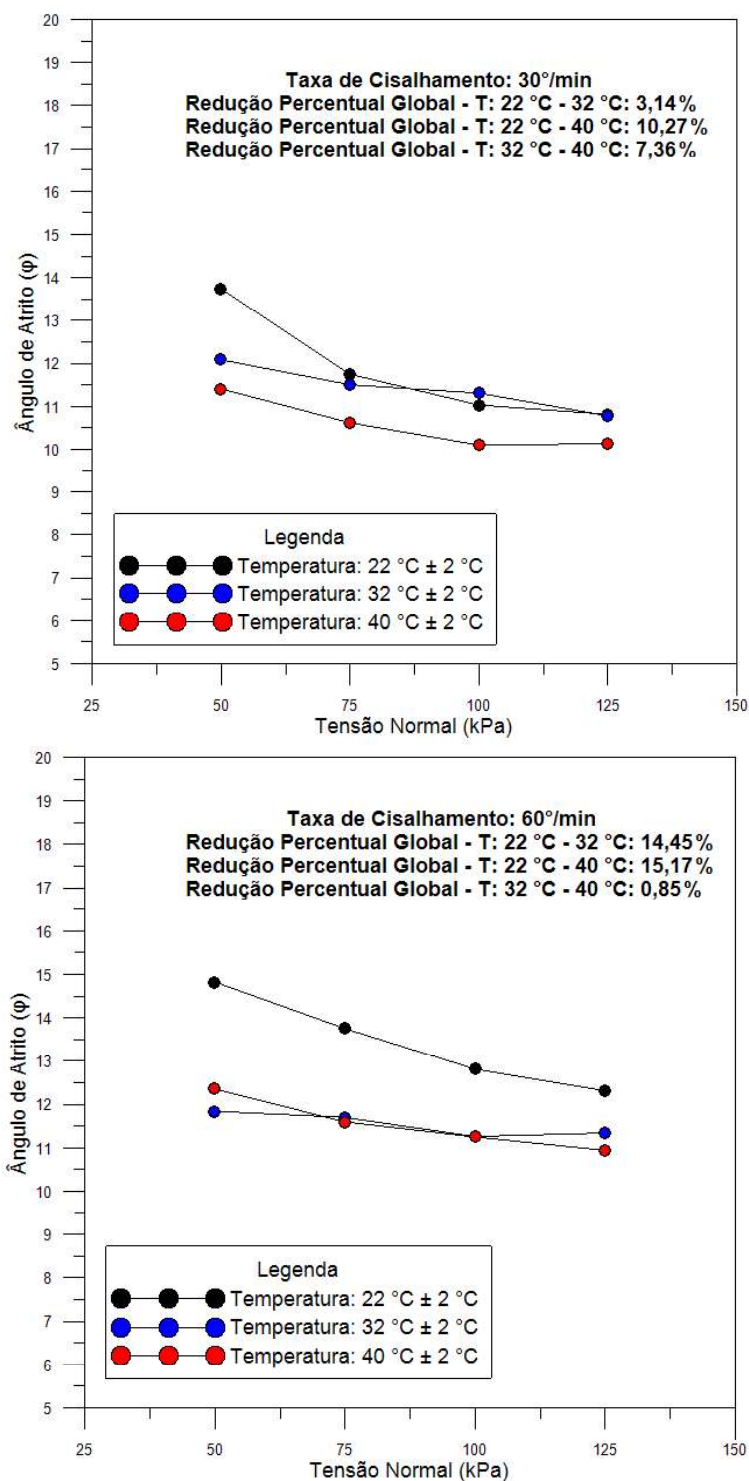


Figura 73 — Influência da Temperatura em Cada Taxa de Cisalhamento: a) Taxa de Cisalhamento: 30°/min; b) Taxa de Cisalhamento: 60°/min.

4.3. Curva Backbone

A análise da curva backbone foi realizada com base nos ensaios conduzidos sob as tensões normais de 50, 75, 100 e 125 kPa, em diferentes taxas de

cisalhamento, respectivamente 0,024°/min, 2,4°/min, 12°/min, 30°/min e 60°/min. Os resultados obtidos foram organizados considerando a variação da resistência residual em função da taxa de cisalhamento, a qual foi normalizada por meio da fórmula descrita na metodologia.

A Tabela 14 apresenta os dados utilizados para a construção das curvas backbone, e os respectivos valores de velocidade normalizada.

Tabela 14 — Dados Experimentais para Construção das Curvas Backbone e Suas Respectivas Velocidades Normalizadas — 2024.

Tensão Normal (kPa)	Taxa de Cisalhamento (°/min)	Resultados da Curva Backbone	Velocidade Normalizada
50	0,024	12,18	0,36
50	2,4	12,24	35,62
50	12	13,14	178,08
50	30	13,42	445,20
50	60	14,94	890,40
75	0,024	11,35	0,21
75	2,4	10,45	20,71
75	12	11,28	103,53
75	30	11,83	258,84
75	60	13,83	517,67
100	0,024	10,65	0,23
100	2,4	9,64	22,83
100	12	10,79	114,15
100	30	11,04	285,38
100	60	12,32	570,77
125	0,024	10,10	0,31
125	2,4	9,64	30,70
125	12	10,70	153,52
125	30	10,84	383,79
125	60	12,32	767,59

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Conforme detalhado na Figura 74 e Figura 75, a curva backbone indicou comportamento drenado até a taxa de cisalhamento de 2,4°/min. As velocidades normalizadas correspondentes a essa taxa de cisalhamento, obtidas para as tensões normais de 50, 75, 100 e 125 kPa, foram, respectivamente 35,62, 20,71 22,83 e 30,70. De acordo com a literatura, o comportamento não drenado ocorre quando a velocidade normalizada ultrapassa o valor de 100, o que não foi verificado nestas condições. Nessa faixa de taxas mais baixas a resistência residual foi dominada pelas interações entre as partículas sólidas, o que resultou em um comportamento mais estável em todas as tensões normais observadas.

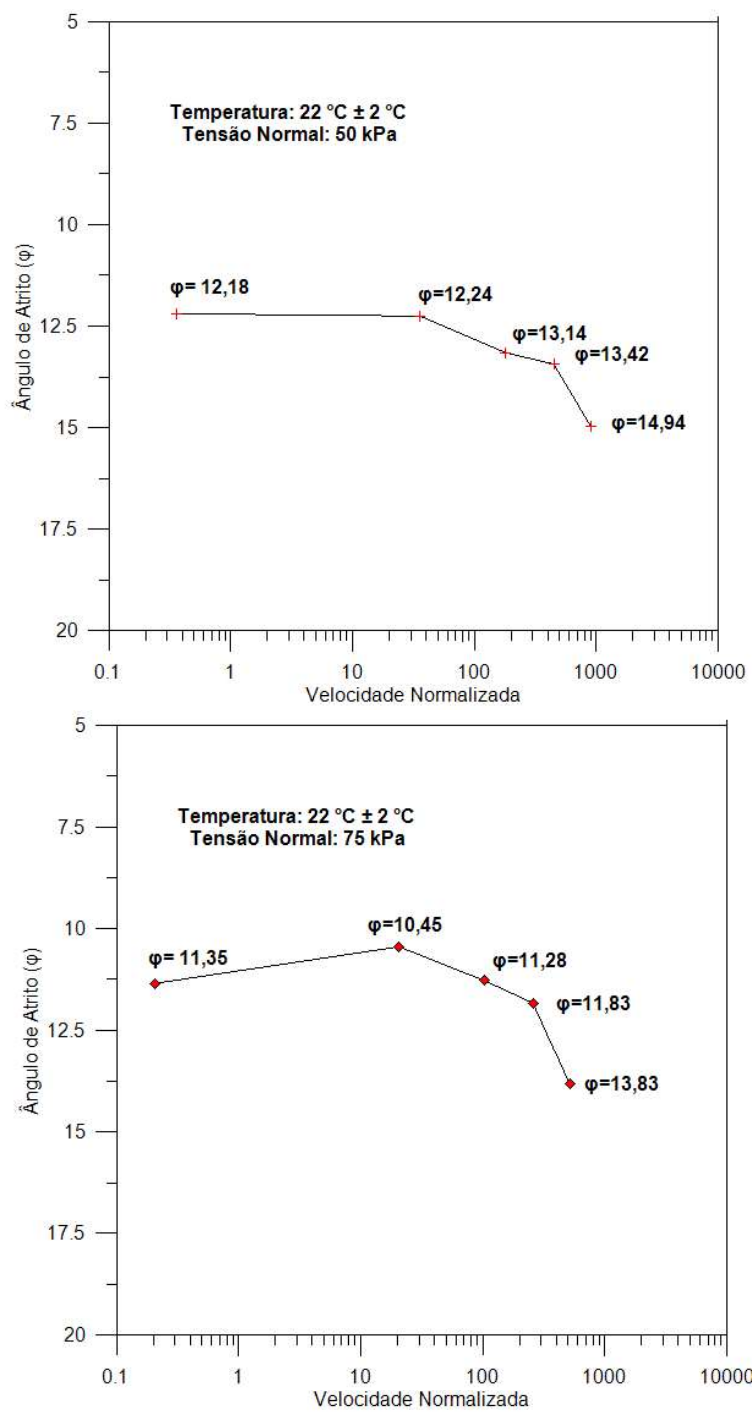


Figura 74 — CurvaBackBone em cada Tensão Norma: a) Tensão Normal 50 kPa; b) Tensão Normal 75 kPa.

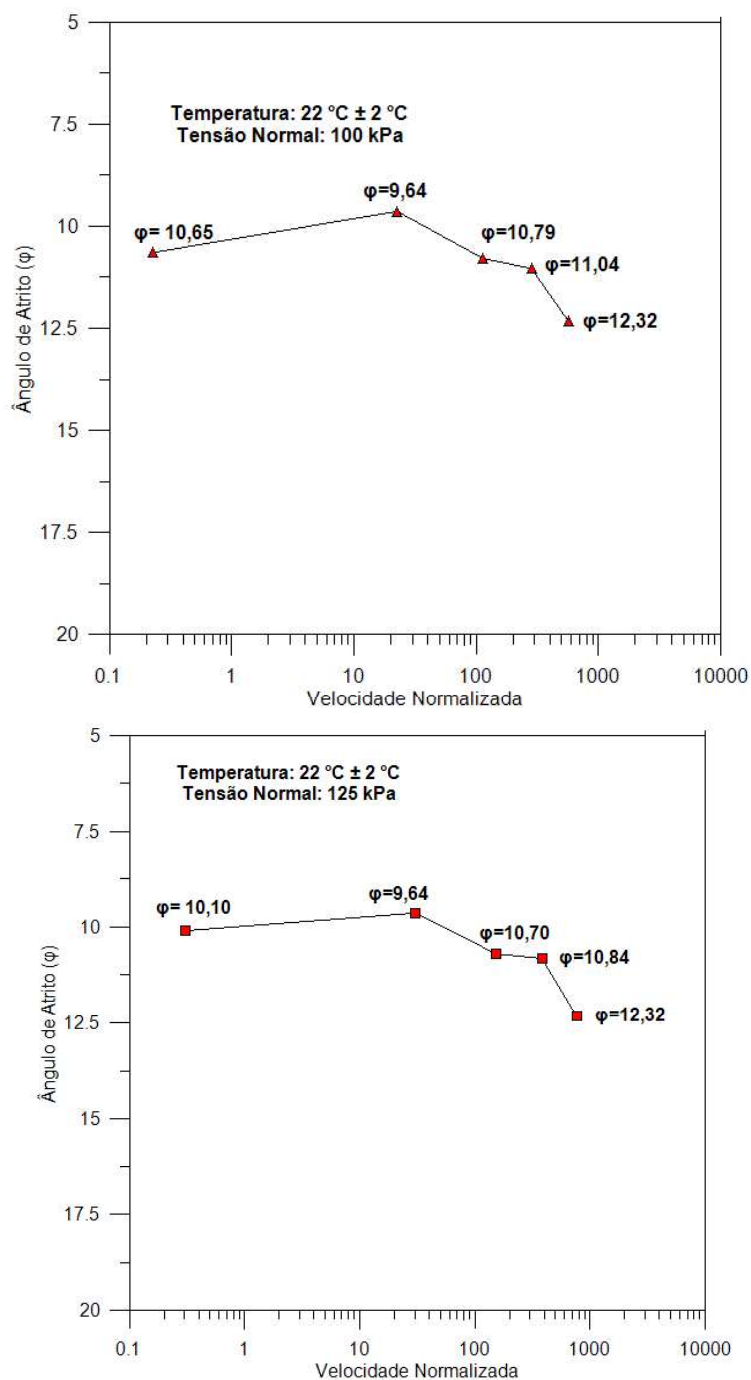


Figura 75 — CurvaBackBone em cada Tensão Norma: a) Tensão Normal 50 kPa; b) Tensão Normal 75 kPa.

Entre a taxa de cisalhamento 2,4°/min (velocidade normalizada de 20,71 a 35,62) e 12°/min (velocidade normalizada de 103,53 a 178,08), apresentou comportamento parcialmente drenado. A redução do ângulo de atrito, um pouco mais acentuada, pode ser atribuída ao acúmulo de poropressão positiva gerada na taxa de 2,4°/min.

Entre as taxas de cisalhamento 12°/min e 30°/min (velocidade normalizada de 103,53 a 445,20), os ângulos de atrito apresentaram valores relativamente estáveis. Embora a geração da poropressão positiva fosse esperada, o aumento da taxa de cisalhamento parece ter provocado maior resistência viscosa, resultando em um equilíbrio entre esses fatores, o que gerou um comportamento parcialmente drenado.

Embora se esperasse que o comportamento não drenado fosse obtido até a taxa de 60°/min (velocidade normalizada de 517,67 a 890,40), o solo continuou apresentando comportamento parcialmente drenado. À extrusão do solo facilitou o rearranjo das partículas. Com extrusão de 0,97 mm para taxa de 30°/min e de 1,45 mm para taxa de 60°/min. À medida que a extrusão ocorreu, uma parte do volume desse solo foi deslocado para fora alterando o plano de cisalhamento, favorecendo a drenagem (Figura 77 a Figura 79).

Adicionalmente, o equipamento de cisalhamento de anel utilizado apresenta uma taxa de cisalhamento máxima de 60°/min, o que impossibilitou a realização de velocidades superiores. Portanto, o comportamento parcialmente drenado pode ser atribuído a uma limitação do equipamento e não ao comportamento do solo.

4.4. Contribuições Científicas desta Pesquisa

Embora diversos estudos tenham abordado a resistência residual de solos, poucos investigaram a influência da temperatura nesse comportamento (Dhokal *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2023; Loche; Scaringi, 2023). Os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para preencher essa lacuna, ao demonstrar a influência da temperatura com a interação das taxas de cisalhamento e variações de tensão normal.

Observou-se que, sob baixas tensões normais, a resistência residual apresentou tendência não linear, comportamento também observado por (Hawkins; Privett, 1985; Vasconcelos, 1992; Xu *et al.*, 2018). Contudo, sem considerar os efeitos da variação da temperatura. Nesta pesquisa, os resultados demonstram que essa tendência se mantém mesmo com a variação de temperatura, assim como a estabilização observada em tensões normais mais elevadas, nas quais a resistência residual tende à estabilização, mantendo-se praticamente contante, evidenciando o efeito dominante da tensão normal.

A extrusão do solo durante o ensaio em equipamento de cisalhamento de anel é reconhecida como um fator limitante. Uma maneira de minimizar esse efeito é conduzir os ensaios em solos superadensados (Dhakal *et al.*, 2025; Loche; Scaringi, 2023; Ung; Zeinali; Abdelaziz, 2023), aplicar taxas de cisalhamento mais baixas (Dhakal *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2023) ou realizar a reposição do solo (Loche; Scaringi, 2023).

Nesta pesquisa, a adoção do método de pré-cisalhamento com solo levemente adensado mostrou-se eficaz para minimizar a extrusão, permitindo a realização de ensaios em solos normalmente adensados em todas as faixas de temperatura estudadas, incluindo ensaios as condições de altas taxas de cisalhamento. Além disso, essa técnica possibilitou a utilização do mesmo corpo de prova do início ao fim do ensaio, garantindo resultados técnicos padronizados.

Embora a literatura indique que o grau de pré-adensamento não tenha influência sobre a resistência residual (Loche; Scaringi, 2023; Zheng *et al.*, 2022) porém esses estudos foram conduzidos em solos superadensados (Garcia *et al.*, 2023; Loche; Scaringi, 2023; Ung, 2023).

Os resultados evidenciaram um efeito positivo da taxa, um aumento progressivo da resistência residual à medida que a velocidade de cisalhamento aumenta, comportamento também observado na literatura (Duong; Suzuki, 2021; Habibbeygi; Nikraz, 2018; Raj Bhat, 2022). Argilas com maiores viscosidades submetidas a maiores taxas de deformação, apresentam tensões viscosas mais elevadas (Alexandre; Martins, 2014).

Esse comportamento pode ser explicado em razão do aumento da resistência ao movimento do fluido com o aumento da velocidade de cisalhamento. A maior resistência viscosa contribui para a transição do modo de cisalhamento de deslizante para turbulento, fenômeno que Miao; Wang (2022) relacionaram ao aumento da resistência residual. Em maiores velocidades de cisalhamento, as partículas de solo têm menos tempo para se reorganizar, resultando em um arranjo aleatório. Nos resultados desta pesquisa (Figura 37), essa transição foi identificada pelo aumento dos outlets com o crescimento da taxa de cisalhamento, indicando que também ocorreu mecanismos viscosos em razão da resistência ao movimento do fluido.

Adicionalmente, na revisão realizada nesta pesquisa, não foram encontrados estudos que analisassem esse comportamento em diferentes temperaturas. Embora estudos anteriores (Duong; Suzuki; Van Hai, 2018; Miao; Wang, 2022) já tenham

levantado a hipótese do aumento da resistência residual a essa mudança no modo de cisalhamento, seus experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente.

Neste trabalho, demonstrou-se que esse comportamento ocorreu em diferentes temperaturas. Esse processo ocorre porque as partículas de argila encontram-se ligadas por forças eletrostáticas as moléculas de água. Com o aumento da energia cinética em razão da elevação da temperatura, parte dessas ligações são rompidas e a água adsorvida se transforma em água livre, a uma certa distância. Mesmo com a redução da resistência viscosa com o aumento da temperatura, o efeito da taxa de cisalhamento permanece atuante. Observou-se ainda uma antecipação do modo de cisalhamento em função do aumento da temperatura, possivelmente em razão da maior mobilidade das partículas com a redução da viscosidade.

Quando comparada os resultados à mesma temperatura, mas em diferentes taxas de cisalhamento, observou-se que a taxa de cisalhamento parece exercer um efeito dominante, provocando um acréscimo progressivo da resistência residual (Figura 55). Esse comportamento pode ser explicado porque o sistema mantém parte da água permanece adsorvida às partículas de solo, de modo que a redução da viscosidade é semelhante à mesma temperatura.

Por outro lado, ao comparar os efeitos obtidos à mesma taxa de cisalhamento em diferentes temperaturas, a temperatura possui um efeito dominante (Figura 69 e Figura 70). Neste caso a viscosidade assume maior influência. O aumento progressivo da temperatura promove a redução da viscosidade (Figura 26), o que explica seu efeito relevante comparada a taxa de cisalhamento.

Esses efeitos reforçam a influência da viscosidade no comportamento do solo em resistência residual. Além disso, foi observado uma antecipação na transição do modo de cisalhamento: Com o aumento da temperatura essa transição ocorreu em taxas de cisalhamentos menores. Essa antecipação pode ser atribuída à redução da resistência viscosa que facilita o movimento das partículas, porém também favorece a reorganização aleatória das partículas de solo.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO

Uma série de testes com um solo Caulim Speswhite foi realizada no equipamento de cisalhamento de anel modelo Bromhead com o objetivo de investigar o efeito da temperatura na resistência residual. Foram analisados o comportamento do solo nas diferentes temperaturas, taxas de cisalhamento e tensões normais. Com base nos resultados obtidos identificou-se o efeito da temperatura na resistência residual do solo Caulim Speswhite.

Dessa maneira os resultados obtidos podem contribuir para análise da resistência residual do comportamento do solo submetidos a melhoramento térmico, técnica que vem sendo estudada para fundações offshore. Além disso, esses resultados podem auxiliar na análise da resistência residual do solo em diversas obras, tais como dutos enterrados que transportam óleos em altas temperaturas, estacas geotérmicas e movimentação de taludes induzida por aquecimento.

Adicionalmente, este estudo forneceu interpretações para preenchimento das lacunas na literatura, pois se tratou de um ensaio novo e com poucos resultados publicados, fornecendo base de estudos para pesquisas futuras referente a resistência ao cisalhamento residual através das mudanças na velocidade da taxa de cisalhamento e da variação da temperatura. Por fim, os resultados revelaram que:

- I. A temperatura afeta a resistência residual do solo em todas as tensões normais analisadas. Observou-se uma redução da resistência residual à medida que a temperatura aumentou, o que pode ser atribuído a mudança da resistência viscosa. Adicionalmente, embora a poropressão não tenha sido medida nesta dissertação, é possível que tenha ocorrido um excesso de poropressão positiva, o que pode ter contribuído para a redução da resistência ao cisalhamento e resistência residual.
- II. A taxa de cisalhamento influencia a transição entre os modos de cisalhamento do solo, como o lento, transicional e turbulento. A 22 °C, quanto maior a taxa de cisalhamento, mais evidente se torna essa transição, pois o aumento da velocidade aumenta a resistência ao movimento do fluido, obrigando as partículas a se rearranjarem de forma aleatória. Além disso, o aumento da

temperatura, favoreceu essa transição, mesmo em taxas de cisalhamento mais baixas, reduzindo a resistência viscosa através da quebra das ligações intermoleculares, o que facilitou o deslizamento das partículas de solo.

- III. A resistência viscosa é diretamente afetada pelo aumento da temperatura influenciando no modo como as partículas de solo deslizam e se acomodam.
- IV. O solo Caulim Speswhite apresentou comportamento drenado até a taxa de $2,4^\circ/\text{min}$. O comportamento parcialmente drenado observado até a taxa de $60^\circ/\text{min}$ está associado à limitação do equipamento, que não permite aplicar taxas superiores e não ao comportamento do solo.
- V. Os resultados demonstraram que o aumento da taxa de cisalhamento resultou em acréscimos nas tensões de cisalhamento, refletindo a influência da resistência viscosa no comportamento do solo. Esse comportamento se deve à parcela de resistência viscosa ligada ao movimento do fluido, indicando que apenas uma parte da água adsorvida foi transformada em água livre. A parcela restante permaneceu contribuindo para a resistência viscosa, que tende a aumentar com a taxa de cisalhamento.
- VI. A geração de poropressão positiva durante o cisalhamento, embora não avaliada nesta dissertação, pode ter contribuído para a redução da tensão de cisalhamento, explicando os menores ângulos de atrito observados na taxa de $2,4^\circ/\text{min}$ em todas as temperaturas testadas.
- VII. A pesquisa apresentou de forma integrada os efeitos da temperatura e das taxas de cisalhamento na resistência residual em solos normalmente adensados, condição pouco explorada na literatura. Além disso, a técnica de pré-cisalhamento associado a uma maior tensão de pré-adensamento contribuiu para mitigar a extrusão do solo, permitiu a condução de ensaios com taxas de cisalhamento mais altas e impondo uma condição técnica que poderá ser utilizada para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos nesta dissertação, algumas linhas de pesquisa podem ser exploradas para aprofundar o conhecimento sobre a resistência residual de solos moles argilosos. Entre elas, destaca-se a investigação de como a geração e a dissipação da poropressão em solos moles durante os ensaios de cisalhamento de anel influenciam a resistência residual sob diferentes taxas de cisalhamento e tensões normais. A inclusão de estudos sobre a poropressão durante os ensaios de cisalhamento de anel poderá fornecer informações adicionais valiosas sobre o comportamento dos solos moles argilosos em condições adversas.

Outro ponto relevante é a análise da resistência residual do solo Caulim Speswhite em temperaturas mais baixas. Este estudo indicou que o aumento da temperatura influencia na resistência residual, e investigar os efeitos de temperaturas mais baixas pode contribuir para projetos geotécnicos em regiões com condições térmicas adversas.

Ademais, destaca-se a relevância de se considerar o índice de plasticidade na resposta térmica dos solos. A literatura aponta que a resistência residual pode variar em função do índice de plasticidade. No entanto, ainda são escassos os estudos que investigaram a influência da temperatura na resistência residual. Avançar nessa linha de pesquisa pode contribuir para ampliação do conhecimento sobre a resistência residual sob diferentes temperaturas, considerando sua interação em solos com diferentes índices de plasticidade.

Adicionalmente, os estudos sobre como os ciclos térmicos influenciam a resistência residual de solos moles, sobretudo em contextos em que o solo é submetido a variações de temperatura ao longo do tempo. A investigação desses ciclos térmicos pode fornecer uma análise mais profunda da resposta do solo em condições de campo, onde a temperatura não se mantém constante.

Além disso, a influência da temperatura na resistência residual de solos moles com água salgada. Considerar os efeitos da salinidade e da temperatura pode representar avanços na previsão do comportamento desses solos, inclusive porque a resistência residual, contribuindo para fundações offshore, taludes marinhos e dutos enterrados.

Por fim, investigar a resistência residual do solo Caulim Speswhite sob tensões normais superiores a 100 kPa, é importante para compreender melhor os fatores que influenciam a resistência residual além das tensões normais, já que neste estudo, observou-se que a partir de 100 kPa, a resistência residual tende a ter valores similares.

Por fim, este estudo contribuiu para a compreensão dos fatores que governam a resistência residual de solos moles, e as pesquisas futuras sugeridas visam expandir o conhecimento com diferentes tipos de solos e variáveis adicionais, permitirá uma análise ainda mais robusta da resistência residual de solos moles em diferentes condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo — Ensaio de adensamento unidimensional - ABNT NBR - 16853/2020**. Rio de Janeiro: [S.n.].

ABREU, Priscila Pessanha; JR, Fernando Saboya; TIBANA, Sérgio. Análise experimental do comportamento térmico de argilas moles com variação da velocidade de cisalhamento. *In: Balneário Camboriú/SC: 27 set. 2024.*

ABUEL-NAGA, Hossam M.; BERGADO, Dennes T.; BOUAZZA, Abdelmalek. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay. **Engineering Geology**, v. 89, n. 1–2, p. 144–154, 12 jan. 2007.

ABUEL-NAGA, Hossam M.; BERGADO, Dennes T.; LIM, Bee Fong. Effect of Temperature on Shear Strength and Yielding Behavior of Soft Bangkok Clay. **Soils and Foundations**, v. 47, n. 3, p. 423–436, jun. 2007.

AKIS, Ebru; MEKAEL, Ahmad; YILMAZ, Mustafa Tolga. Investigation of the effect of shearing rate on residual strength of high plastic clay. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 2, p. 66, 9 jan. 2020.

ALEXANDRE, Gilberto *et al.* Application of a simple viscous model to the cyclic behavior of clays at small strains. p. 1, 2 jul. 2014.

ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM) - D6467. **Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Fine-Grained Soils. ASTM-D6461-21** West Conshohocken, PAASTM International, , 1 set. 2021.

AZHAR, Md *et al.* Effect of temperature on the mechanical properties of fine-grained soils - A review. **Geothermics**, v. 116, p. 102863, 1 jan. 2024.

BAI, Bing; GUO, Lanjie; HAN, Song. 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**, v. 25, n. 4, p. 807–825, 1988.

BENTIL, Obed Takyi; ZHOU, Chao. Effects of Temperature and Thermal Cycles on the Elastic Shear Modulus of Saturated Clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 148, n. 7, jul. 2022.

BHAT, D. R. *et al.* Strength Recovery from Residual-State of Shear on Soils. **Indian Geotech**, n. 03/2014, p. 94–100, 2014.

BI, Gang *et al.* Creep behavior of cohesive soils associated with different plasticity indexes. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 5, p. 151, 23 mar. 2022.

BISHOP, A. W. *et al.* A New Ring Shear Apparatus and Its Application to the Measurement of Residual Strength. **Géotechnique**, v. 21, n. 4, p. 273–328, dez. 1971.

BROCHARD, Laurent *et al.* Nanoscale origin of the thermo-mechanical behavior of clays. **Acta Geotechnica**, v. 12, n. 6, p. 1261–1279, 30 dez. 2017.

BROMHEAD, E. N. A simple ring shear apparatus. **Ground Engineering**, v. 12, n. 5, p. 40–44, 1979.

BROMHEAD, E. N.; CURTIS, R. D. A comparison of alternative methods of measuring the residual strength of London Clay. **Ground Engineering**, v. 16, n. 4, p. 39–41, 1983.

BUDHU, M. **Soil Mechanics and Foundations**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons inc, 2010.

BURGHIGNOLI, A.; DESIDERI, A.; MILIZIANO, S. Discussion on volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests (Towhata and al. 1993). **Soils and Foundations**, v. 35, n. 3, p. 122–124, 1995.

BURGHIGNOLI, A.; DESIDERI, A.; MILIZIANO, S. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 4, p. 764–780, 1 ago. 2000.

BURGHIGNOLI, A.; DESIDREI, A.; MILIZIANO, S. Deformability of clays under non isothermal conditions. **Rivista Italiana di Geotecnica**, v. 92, n. 4, p. 227–236, 1992.

CAMPANELLA, Richard G.; MITCHELL, James K. Influence of temperature variations on soil behavior. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 94, n. 3, p. 709–734, 1968.

CASAGRANDE, Brunella *et al.* Investigation of a field-scale energy micropile in stratified soil under cyclic temperature changes. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 29, p. 100–263, 1 mar. 2022.

CASTELLANOS, Bernardo A.; BRANDON, Thomas L.; KINGREY, Jenna. Estimating fully softened and residual shear strength parameters of fine-grained soils. *In*: Sydney: Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering– Rahman and Jaksa (Eds) , 5 maio 2022.

CHEN, Zhengfa; XU, Zhifan; XIA, Pingxin. Pore-Water Pressure and Shear Characteristics of Lateritic Clay under Different Temperature Paths. **International Journal of Geomechanics**, v. 24, n. 12, dez. 2024.

DEMARS, K. R.; CHARLES, R. D. Soil volume changes induced by temperature cycling. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 19, n. 2, p. 188–194, 1 maio 1982.

DHAKAL, Om Prasad *et al.* Influence of temperature on the residual shear strength of landslide soil: role of the clay fraction. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 84, n. 8, p. 394, 5 ago. 2025.

DI MAIO, C.; SCARINGI, G.; VASSALLO, R. Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: influence of pore fluid composition. **Landslides**, v. 12, n. 4, p. 657–667, 26 ago. 2015.

DONATTI, Camila I. *et al.* Global hotspots of climate-related disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 108, p. 104488, jun. 2024.

DUONG, Nguyen Thanh; SUZUKI, Motoyuki. Rate Effects on Peak and Residual Strengths of Overconsolidated Clay in Ring Shear Tests. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 13 dez. 2021.

DUONG, Nguyen Thanh; SUZUKI, Motoyuki; VAN HAI, Nguyen. Rate and acceleration effects on residual strength of kaolin and kaolin–bentonite mixtures in ring shearing. **Soils and Foundations**, v. 58, n. 5, p. 1153–1172, 1 out. 2018.

DUONG, Thanh Nguyen *et al.* Effect of pore water chemistry on the ring shear. **Journal of Mining and Earth Sciences**, v. 64, n. 6, p. 90–98, 2023.

EM-DAT EMERGENCY EVENTS DATABASE. **2023 Disasters in Numbers: A significant Year of Disaster Impact.**

FANG, Chen. *et al.* Predicting residual frictional angle by Atterberg limits for reservoir embankment soils. **International Journal of Geomate**, v. 17, n. 63, p. 111–118, 2019.

FENG, Xiangrui. Effect of Shear Rate on the Residual Strength of Clayey Soils. **Journal of Electrical Systems**, v. 20, n. 3, p. 1835–1841, 25 abr. 2024.

FIALHO, Arivelto B. **Automação Hidráulica - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2019.

GAO, Hongbei; SHAO, Mingan. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties. **Soil and Tillage Research**, v. 153, p. 145–154, 1 nov. 2015.

GARCIA, Luis M. *et al.* Influence of temperature on residual strength of clayey soils. **Engineering Geology**, v. 323, p. 107220, 20 set. 2023.

GARCÍA MARTÍNEZ, M. F. L.; GOTTARDI, G. T.; ROCCHI, I. Influence of penetration rate on CPTU measurements in saturated silty soils. *In*: LEHANE, B.; ACOSTA-MARTÍNEZ, P.; KELLY, R. (Orgs.). **Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5**. [S.l.]: Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, 2016. p. 473–478.

GHAADOWD, Ismaail; SABOYA, JR, Fernando A.; MCCARTNEY, John S. Centrifuge modeling of temperature effects on the pullout capacity of jacked-in energy piles in

saturated soft clay. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 41, p. 100638, 1 mar. 2025.

HABIBBEYGI, Farzad; NIKRAZ, Hamid. Effect of shear rate on the residual shear strength of pre-sheared clays. **Cogent Geoscience**, v. 4, n. 1, p. 1453989, 1 jan. 2018.

HAWKINS, AB; PRIVETT, KD. Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils. **Ground Eng**, v. 18, n. 8, p. 22–29, 1985.

HEIDEMANN, Marcelo. *et al.* On the Behavior of Residual Soils of Granite-Biotite Associated to a Landslide in Florianopolis Region. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, p. 1–16, jun. 2018.

HUANCOLLO, Hiden Jaime M. **Melhoramento de Solos Moles Através da Técnica de Adensamento Térmico**. Dissertação de Mestrado—Campos dos Goytacazes - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 28 out. 2020.

HUANCOLLO, Hiden Jaime Machaca *et al.* Thermal Triaxial Tests to Evaluate Improvement of Soft Marine Clay through Thermal Consolidation. **Geotechnical Testing Journal**, v. 46, n. 3, p. 579–597, 1 maio 2023.

HUECKEL, T.; BALDI, G. Thermoplasticity of Saturated Clays: Experimental Constitutive Study. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1778–1796, dez. 1990.

KENNEY, T. C. Residual strength of mineral mixtures. *In*: Tokyo: 1977.

KOHLER, Marc; HOTTIGER, Stephanie; PUZRIN, Alexander M. Rate, Water Pressure, and Temperature Effects in Landslide Shear Zones. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 128, n. 9, 20 set. 2023.

KUNTIWATTANAKUL, Pisit *et al.* Temperature Effects on Undrained Shear Characteristics of Clay. **Soils and Foundations**, v. 35, n. 1, p. 147–162, 1 mar. 1995.

LAGATTA, Daniel P. **Residual Strength of Clays and Clay-Shales by Rotation Shear Tests**. Cambridge: [S.n.].

LAHOORI, Mojdeh; ROSIN-PAUMIER, Sandrine; MASROURI, Farimah. Effect of monotonic and cyclic temperature variations on the mechanical behavior of a compacted soil. **Engineering Geology**, v. 290, p. 106195, 5 set. 2021.

LI, Deying *et al.* Effect of over-consolidation and shear rate on the residual strength of soils of silty sand in the Three Gorges Reservoir. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 5503, 14 jul. 2017.

LI, Y. R. *et al.* Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area. **Engineering Geology**, v. 154, p. 106–115, 28 fev. 2013.

LI, Yanrong. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 72, n. 3–4, p. 371–381, 23 dez. 2013.

LIAN, Baoqin *et al.* Moisture content effect on the ring shear characteristics of slip zone loess at high shearing rates. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 79, n. 2, p. 999–1008, 28 mar. 2020a.

LIAN, Baoqin *et al.* Shear rate effect on the residual strength characteristics of saturated loess in naturally drained ring shear tests. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, n. 10, p. 2843–2856, 28 out. 2020b.

LOCHE, Marco; SCARINGI, Gianvito. Temperature and shear-rate effects in two pure clays: Possible implications for clay landslides. **Results in Engineering**, v. 20, 1 dez. 2023.

MA, Jianquan *et al.* Effects of High Shearing Rates on the Shear Behavior of Saturated Loess Using Ring Shear Tests. **Geofluids**, v. 2021, p. 1–12, 10 set. 2021.

MCCARTNEY, John S.; MURPHY, Kyle D. Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations (DFI Young Professor Paper Competition 2012). **DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute**, v. 6, n. 2, p. 26–38, 23 dez. 2012.

MEEHAN, Christopher L.; BRANDON, Thomas L.; DUNCAN, J. Michael. Measuring Drained Residual Strengths in the Bromhead Ring Shear. **Geotechnical Testing Journal**, v. 30, n. 6, p. 466–473, 15 jun. 2007.

MIAO, Haibo; WANG, Gonghui. Shear rate effect on the residual strength of saturated clayey and granular soils under low- to high-rate continuous shearing. **Engineering Geology**, v. 308, p. 106821, 1 out. 2022.

MITCHELL, James K.; SOGA, Kenichi. **Fundamentals of soil Behavior**. 3. ed. Wiley: John Wiley & Sons, 2005. v. 1

MOHAMMADI, Fariborz *et al.* Unconfined compressive strength of clay soils at different temperatures: experimental and constitutive study. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 15, p. 387, 23 ago. 2022.

NI, Ke *et al.* The velocity dependence of viscosity of flowing water. **Journal of Molecular Liquids**, v. 278, p. 234–238, 15 mar. 2019.

OGAWA, Atsushi *et al.* Effects of temperature on consolidation and consistency of clayey soils. *In*: EDP Sciences, 18 nov. 2020.

OLIVEIRA, José R. M. S. *et al.* Influence of Penetration Rate on Penetrometer Resistance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 7, p. 695–703, jul. 2011.

PETLEY, D. J. **The Shear Strength of Soils at Large Strains**. Doctor of Philosophy—London: University of London, jan. 1966.

PLUM, Robert L.; ESRIG, Melvin I. Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure. v. 10, p. 231–242, 1969.

RAJ BHAT, Deepak. Shear rate effect on residual strength of typical clay soils. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 1, p. 36, 12 fev. 2022.

RAMSEY, Nick *et al.* A Review of Soil-Steel Interface Testing with the Ring Shear Apparatus. *In*: Londres: Society for Underwater Technology, 22 set. 1998.

RIGO, Marcelo Luvison. **Mineralogia, Intemperismo e Comportamento Geotécnico de Solos Saprolíticos de Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral**. Doutorado em Engenharia Civil—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SANTOS, Viviane Rocha dos. **Desenvolvimento de equipamento ring shear para avaliação do comportamento de solos a grandes deformações**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 29 out. 2012.

SCARINGI, Gianvito; LOCHE, Marco. A thermo-hydro-mechanical approach to soil slope stability under climate change. **Geomorphology**, v. 401, p. 108108, 15 mar. 2022.

SCHNAID, Fernando *et al.* Velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos. **Geotecnia**, n. 152, p. 405–434, 12 ago. 2021.

SCHNEIDER, James A.; LEHANE, Barry M.; SCHNAID, Fernando. Velocity effects on Piezocone measurements in normally and over consolidated clays. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, v. 7, n. 2, p. 23–34, jun. 2007.

SHIBASAKI, Tatsuya; MATSUURA, Sumio; HASEGAWA, Yoichi. Temperature-dependent residual shear strength characteristics of smectite-bearing landslide soils. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 122, n. 2, p. 1449–1469, 8 fev. 2017.

SILVA, Marília Mary da. **Caracterização geotécnica de um solo de calcário da Encosta Continental**. Dissertação M.Sc Engenharia Civil—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, fev. 2003.

SKEMPTON, A. W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. **Geotechnique**, v. 35, n. 1, p. 3–18, 1985.

STARK, T. D.; EID, H. T. Comparison of field and laboratory residual strengths. *In*: New York: American Society of Civil Engineers, 1992.

STARK, TD; VETTEL, JJ. Bromhead Ring Shear Test Procedure. **Geotechnical Testing Journal**, v. 15, n. 1, p. 24–32, 1 mar. 1992.

SUZUKI, Motoyuki *et al.* Variation in residual strength of clay with shearing speed. v. 52, jan. 2002.

TER-MARTIROSYAN, Armen Z.; ERMOSHINA, Lyubov Yu; ANZHELO, George O. Viscosity of Clayey Soils: Experimental Studies. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 14, n. 14, 1 jul. 2024.

TERZAGHI, Karl. Undisturbed Clay Samples and Undisturbed Clays. **Boston Society of Civil Engineers**, v. 28, n. 3, p. 45–65, jul. 1941.

TIAN, Gailei; ZHANG, Zhihong. A Calculation Method of Thermal Pore Water Pressure Considering Overconsolidation Effect for Saturated Clay. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 13, 1 jul. 2022.

TOWHATA, Ikuo *et al.* Volume change of Clays induced by heating as observed in consolidation test. **Soils and Foundations**, v. 33, n. 4, p. 170–183, 1993.

UNG, Aidy. **Effects of Temperature on Residual Shear Strength of Cohesive Soils**. Master of Science in Civil Engineering —Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 21 set. 2023.

UNG, Aidy; ZEINALI, Seyed Morteza; ABDELAZIZ, Sherif L. Temperature Effects on Residual Shear Strength of Soil. *In*: Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 23 mar. 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its fifth session, held in the United Arab Emirates from 30 November to 13 December 2023. *In*: 15 mar. 2024.

VASCONCELOS, Maria de Fatima Costa de. **A Resistência Residual de Solos Determinada Através do Ensaio de Cisalhamento por Torção**. Tese—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, maio 1992.

WANG, Kuanjun; SHAN, Zhigang; WANG, Mingyuan. Undrained Shearing Behaviour of Kaolin after Undrained Heating. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 455, n. 1, p. 012102, 1 fev. 2020.

WANG, Lunan *et al.* Variation in Shearing Rate Effect on Residual Strength of Slip Zone Soils Due to Test Conditions. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 3, p. 2773–2785, 6 jun. 2020.

WANG, Yanchao; CONG, Lu. Effects of Water Content and Shearing Rate on Residual Shear Stress. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 10, p. 8915–8929, 22 out. 2019.

WEN, B. P. *et al.* Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China. **Engineering Geology**, v. 93, n. 3–4, p. 82–98, 30 ago. 2007.

XU, Chengshun *et al.* Experimental study of residual strength and the index of shear strength characteristics of clay soil. **Engineering Geology**, v. 233, p. 183–190, 31 jan. 2018.

YAZDANI, Saeed; HELWANY, Sam; OLGUN, Guney. Influence of temperature on soil–pile interface shear strength. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 18, p. 69–78, jun. 2019.

ZE-JIAN CHEN; JIAN-HUA YIN. A New One-Dimensional Thermal Elastic-Viscoplastic Model for the Thermal Creep of Saturated Clayey Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 149, n. 4, abr. 2023.

ZHANG, Siqi *et al.* Molecular dynamics modeling of hydraulic conductivity of soil considering variable viscosity and adsorbed water. **Applied Clay Science**, v. 228, p. 106598, 1 out. 2022.

ZHANG, Xinrui *et al.* Thermal conductivity of marine sediments influenced by porosity and temperature in the South China Sea. **Ocean Engineering**, v. 260, 2022b.

ZHENG, Yanhao *et al.* Effects of overconsolidation on the reactivated residual strength of remoulded deep-seated sliding zone soil in the Three Gorges Reservoir Region, China. **Engineering Geology**, v. 310, p. 106882, 5 dez. 2022.

ZHU, Qi-Yin; QI, Ping. Numerical Modeling of Thermal-Dependent Creep Behavior of Soft Clays under One-Dimensional Condition. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1–11, 17 out. 2018.

APÊNDICE A — CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A calibração dos sensores utilizados no equipamento de cisalhamento de anel foi uma etapa importante para assegurar a confiabilidade e precisão dos dados obtidos. O procedimento foi realizado no laboratório da centrífuga geotécnica, onde cada célula de carga foi posicionada no topo do aparelho, enquanto pesos foram adicionados gradualmente (Figura 76a). O LVDT (Linear Variable Differential Transformer) utilizado no equipamento de cisalhamento de anel foi calibrado para medição do adensamento do solo durante o ensaio (Figura 76b).

O sistema registrou as leituras para diferentes valores de carga, permitindo a obtenção de uma regressão linear na forma $y = ax + b$. Nesta equação, o parâmetro a representa a sensibilidade do sistema à carga (inclinação da reta), enquanto b representa os erros sistemáticos ou possíveis desvios (intercepto). Com esses parâmetros, a curva de calibração foi construída e uma equação de ajuste foi determinada para corrigir possíveis desvios nas medições. Por fim, os parâmetros de calibração foram inseridos no software para garantir maior precisão nas leituras durante os ensaios.

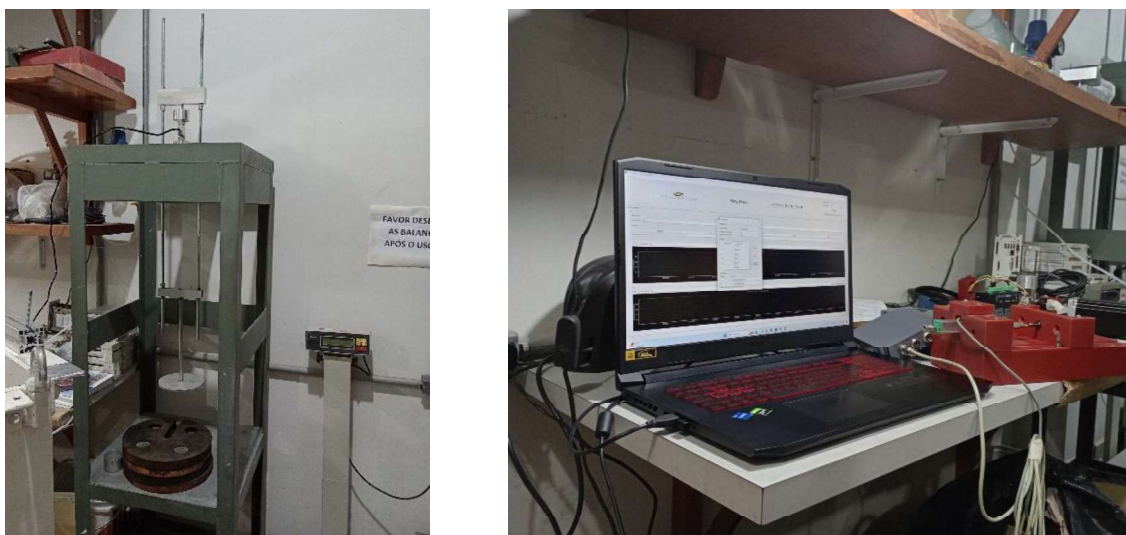


Figura 76 — a) Calibração dos Sensores de Células de Carga; b) Calibração do Sensor LDVT.

APÊNDICE B — REGISTRO VISUAL DA EXTRUSÃO DO SOLO EM ENSAIO DE CISALHAMENTO ANELAR



Figura 77 — Temperatura Ambiente: a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 2,4°/min; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 12°/min.



Figura 78 — Temperatura Ambiente: a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 30°/min; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 60°/min.



Figura 79 — a) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 0,024°/min; b) Extrusão do Solo a Tensão Normal 125 kPa sob Taxa de Cisalhamento 60°/min.