

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

PRISCILA PESSANHA ABREU

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGILAS  
MOLES COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CISALHAMENTO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

2024

PRISCILA PESSANHA ABREU

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGILAS  
MOLES COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CISALHAMENTO

“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: Professor Dr. Fernando Saboya Albuquerque Jr

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

2024

PRISCILA PESSANHA ABREU

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGILAS  
MOLES COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CISALHAMENTO

“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.”

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



**FERNANDO SABOYA ALBUQUERQUE JUNIOR**

Data: 25/06/2024 09:14:27-0300

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

---

Prof. Dr. Fernando Saboya Albuquerque jr.  
ORIENTADOR

Documento assinado digitalmente



**MARINA BELLAVER CORTE**

Data: 25/06/2024 14:01:25-0300

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

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marina Bellaver Corte  
Examinador

Documento assinado digitalmente



**SERGIO TIBANA**

Data: 25/06/2024 14:40:40-0300

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

---

Prof. Dr. Sergio Tibana  
Examinador

Documento assinado digitalmente



**ALDO DURAND FARFAN**

Data: 26/06/2024 14:12:41-0300

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

---

Prof. Dr. Aldo Farfan Durand  
Examinador

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

A162 Abreu, Priscila Pessanha.

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE ARGILAS MOLES SOB VARIAÇÃO DE TEMPERATURA / Priscila Pessanha Abreu. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

88 f. : il.

Bibliografia: 21 - 33.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2024.

Orientador: Fernando Saboya Albuquerque Junior.

1. Comportamento térmico de argilas moles. 2. Variação de velocidade de cisalhamento no estado térmico. 3. Estacas torpedo. 4. Fundações off- shore. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que sempre me incentivaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela benção e oportunidade de realização deste sonho em minha vida. Agradeço a meu pai que me incentivou com toda a força e minha mãe que com muita garra e amor me ajudou nos ensaios contribuindo grandemente para a realização deste trabalho. Agradeço aos amigos que torceram por mim, ao Rafa, ao Arthur que sempre me apoiando, aconselhando e incentivando nesta jornada. Agradeço aos meus professores por me ajudarem a desenvolver este trabalho com todo apoio e conhecimento. Agradeço ao Professor Tibana por me ajudar sempre na centrífuga e por contribuir com seu amplo conhecimento para a realização deste trabalho. Ao professor André e todos os técnicos da centrífuga que me ajudaram. Ao meu orientador Professor Saboya eu agradeço de montão por me ajudar a concluir essa jornada com seu vasto conhecimento e apoio em toda essa jornada, muita gratidão! Ao meu namorado Cris que sempre me apoiou aconselhando e dando forças para continuar a caminhada, acreditando no meu potencial e apoiando no que eu precisei nesta jornada. Aos amigos de classe que fiz, agradeço por tudo o que fizeram para me ajudar, os conselhos, os almoços e por todos os momentos juntos que passamos, ao Rodrigo que choramos juntos e caminhamos juntos, por toda ajuda que contribuiu para este trabalho.

"se você crê, você pode!" (O autor)

## RESUMO

A influência da velocidade de cisalhamento na resistência viscosa dos solos argilosos é crucial para compreender seu comportamento em condições críticas. Devido à sua composição fina e alta plasticidade, esses solos manifestam um comportamento viscoso durante a deformação. A resistência viscosa é grandemente afetada pela taxa de aplicação de esforços de cisalhamento, com variações relacionadas ao rearranjo das partículas. Essa influência é determinada pelas propriedades físicas e químicas do solo, como plasticidade e mineralogia. Entender essa influência é fundamental para os engenheiros geotécnicos, especialmente na concepção e estabilidade de estruturas, como as fundações de edifícios e as plataformas offshore da Petrobrás. A instabilidade durante a instalação das fundações das plataformas resulta em excesso de linhas de ancoragem, causando congestionamento na região marinha. Isso pode ser abordado por estudos e ensaios triaxiais que variam a velocidade de cisalhamento e temperatura, ao considerar as condições térmicas. O resultado esperado é o aumento da resistência não drenada e a redução da resistência viscosa em diferentes velocidades e temperaturas, o que poderia contribuir para resolver os desafios de estabilidade e congestionamento no ambiente marinho.

**Palavras-chave:** Comportamento térmico de argilas moles; Variação de velocidade de cisalhamento no estado térmico; Estacas torpedo; Fundações off- shore.

## ABSTRACT

The influence of shear rate on the viscous resistance of clayey soils is crucial to understanding their behavior in critical conditions. Due to their fine composition and high plasticity, these soils exhibit viscous behavior during deformation. Viscous resistance is greatly affected by the rate of shear stress application, with variations related to particle rearrangement. This influence is determined by the physical and chemical properties of the soil, such as plasticity and mineralogy. Understanding this influence is essential for geotechnical engineers, especially in the design and stability of structures such as building foundations and offshore platforms for Petrobras. Instability during the installation of platform foundations results in an excess of anchor lines, causing congestion in the marine region. This can be addressed through studies and triaxial tests that vary shear rate and temperature, while considering thermal conditions. The expected result is an increase in undrained resistance and a decrease in viscous resistance at different speeds and temperatures, which could help solve stability and congestion challenges in the marine environment.

**Keywords:** Thermal behavior of soft clays; Variation of shear speed in the thermal state; Torpedo stakes; Off-shore foundations.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Diferença de resultados para cada condição de aquecimento e drenagem .....	23
Tabela 2 — <i>Esquema dos ensaios para o estudo deste trabalho</i> .....	48
Tabela 3 — Condições para o ensaio de adensamento para as tensões efetivas da envoltória de resistência.....	54
Tabela 4 — Resultado para o cálculo do tempo de ruptura e velocidade de cisalhamento para as tensões efetivas da envoltória. ....	56
Tabela 5 — Parâmetros de resistência para argila caulim.....	57
Tabela 6 — Parâmetros de ensaio para envoltória de resistência para argila caulim.....	57
Tabela 7 — Parâmetros de ensaio na temperatura 23°C .....	60
Tabela 8 — Parâmetros de resistência dos ensaios na temperatura 23°C ....	60
Tabela 9 — Parâmetros de resistência para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento.....	65
Tabela 10 — Parâmetros de ensaio para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento. ....	65
Tabela 11 — Parâmetros de resistência para a temperatura de 55°C com variação de velocidade de cisalhamento.....	68
Tabela 12 — Parâmetros de ensaio para a temperatura de 55°C com variação de velocidade de cisalhamento. ....	68
Tabela 13 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com 23°C na velocidade de 0,02mm/min.	70
Tabela 14 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com TA°C. na velocidade de 0,2mm/min.	71
Tabela 15 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com TA°C na velocidade de 2mm/min. ....	74
Tabela 16 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com TA°C. na velocidade de 20mm/min. .	75

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Poropressão induzida termicamente em função da temperatura para diferentes tensões confinantes em argilas em condição normalmente adensada.....	22
Figura 2 — Tensão Desviadora versus Deformação Axial. Curva 1 para a temperatura ambiente e curva 2 para a temperatura de 98°C. ....	24
Figura 3 — Deformação volumétrica versus Deformação Axial . Curva 1 para a temperatura ambiente e curva 2 para a temperatura de 98°C. ....	25
Figura 4 — Distribuição de íons a partir da superfície da argila de acordo com o conceito da dupla camada.....	26
Figura 5 — Modelo apresentado por Martins (2021) .....	28
Figura 6 — Influência da Velocidade de Deformação no valor de $S_u$ para vários tipos de argila. ....	29
Figura 7 — Trajetória de tensões efetivas para dois ensaios com variação de velocidade. ....	30
Figura 8 — Curva tensão x deformação para os ensaios com variação de velocidade. ....	30
Figura 9 — Resultados dos ensaios de compressão não drenada com diferentes velocidades de carregamento, expressas pelo tempo decorrido até a ruptura. ....	31
Figura 10 — Trajetória de tensões efetivas para diferentes taxas de deformação. ....	32
Figura 11 — Tensão desviadora x curvas de deformação axial para testes consolidados não drenados triaxiais em diferentes taxas de deformação .....	32
Figura 12 — Poropressão x deformação para ensaio triaxial não drenado em diferentes taxas de deformação. ....	33
Figura 13 — Resultado da análise química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) do solo marinho da região da bacia de Campos...	34
Figura 14 — Amostra de Caulim.....	35
Figura 15 — Materiais utilizados para moldagem do corpo de prova .....	36
Figura 16 — Esquema constituinte do consolidômetro.....	37
Figura 17 — Equipamento Triaxial Convencional.....	38

Figura 18 — Partes principais do triaxial térmico do laboratório do prédio da centrífuga geotécnica – UENF.....	39
Figura 19 — Célula Triaxial térmica do laboratório da centrífuga geotécnica – UENF .....	40
Figura 20 — Cobertor de isolamento térmico da célula triaxial térmica do laboratório de centrífuga geotécnica – UENF.....	41
Figura 21 — Sistema de controle de temperatura do laboratório da centrífuga geotécnica – UENF .....	41
Figura 22 — Termopar interno (T1) do triaxial térmico adquirido pela centrífuga geotécnica da UENF. ....	42
Figura 23 — Sistema de aquecimento na direção de contrapressão. ....	43
Figura 24 — Vista superior do sistema de aquecimento na direção de contrapressão.....	43
Figura 25 — Pesagem do corpo de prova após ser desmoldado. ....	46
Figura 26 — Montagem do corpo de prova no equipamento triaxial. ....	46
Figura 27 — Colocação da membrana elástica no corpo de prova. ....	47
Figura 28 — Diagrama do procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU à temperatura de 23°C .....	49
Figura 29 — Diagrama do procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU na temperatura de 40°C e 55°C. ....	50
Figura 30 — Resultados para os limites de Atterberg para o material caulim branca .....	52
Figura 31 — Resultado para a densidade dos grãos para o material caulim branca .....	53
Figura 32 — Curva de adensamento e determinação do t90 para a tensão efetiva de 100 kPa.....	54
Figura 33 — Curva de adensamento e determinação do t90 para a tensão efetiva de 200 kPa.....	55
Figura 34 — Curva de adensamento e determinação do t90 para a tensão efetiva de 400 kPa.....	56
Figura 35 — Envoltória de resistência para argila caulim branca .....	58
Figura 36 — Envoltória de resistência para argila caulim .....	58
Figura 37 — LIC e LEC para envoltória de resistência para argila Caulim .....	59

Figura 38 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C .....	61
Figura 39 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 40°C .....	64
Figura 40 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 55°C .....	67
Figura 41 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 0,02mm/min. ....	70
Figura 42 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 0,2mm/min. ....	72
Figura 43 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 2mm/min. ....	73
Figura 44 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 20mm/min. ....	75
Figura 45 — Porcentagem média de deformação (Ea) para cada velocidade de cisalhamento para cada temperatura na resistência máxima para cada velocidade de cisalhamento .....	76
Figura 46 — Curva de adensamento para a temperatura de 40°C.....	77
Figura 47 — Curva de adensamento para a temperatura de 55°C.....	78
Figura 48 — Comparação da resistência ao cisalhamento em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento. ....	79
Figura 49 — Comparação da resistência viscosa em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CID: Ensaio triaxial adensado hidrosticamente drenado.

CIU: Ensaio triaxial adensado hidrosticamente não drenado.

Su: Resistência não drenada.

CPT: Ensaio de penetração de cone (Cone Penetration Teste).

IP: Índice de plasticidade.

LL: Limite líquido.

LP: Limite plástico.

OCR: Índice de sobreadensamento.

CRS: Ensaio convencional de adensamento edométricos com deformação controlada.

NC: Amostra normalmente adensada.

OC: Amostra sobreadensada.

ASCE: American Society of Civil Engineers.

SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CP: Corpo de prova.

CPs: Corpos de prova.

T°C: Temperatura em graus Celsius.

$\Delta T$ : Mudança de temperatura.

Cv: Coeficiente de adensamento.

n: Porosidade.

$p'$ : Tensão média efetiva.

q: Tensão desviadora.

$\sigma'_v$ : Tensão de pré-adensamento.

$k_v$ : Condutividade hidráulica vertical.

$k_h$ : Condutividade hidráulica horizontal.

$k'$ : Permeabilidade intrínseca.

$\Lambda$ : Condutividade térmica relativa da água.

Ti: Temperatura inicial.

Tf: Temperatura final.

$\sigma_v(i)$ : Tensão inicial vertical para a reconstituição do corpo de prova.

B: Coeficiente de poropressão B de Skempton.

$T^{\circ}A^{\circ}$ : Temperatura Ambiente

$\Phi'$  : Ângulo de atrito interno efetivo

$K_0$  : Coeficiente de empuxo em repouso

$\Delta u$ : Poropressão

$\sigma_{dmax}$  : Tensão desviadora máxima.

$\Delta\sigma_{dmax}$  : Incremento da tensão desviadora máxima.

$\Delta V$  : Mudança de volume

$\dot{\gamma}$ : Velocidade da distorção.

$\dot{\epsilon}$ : Velocidade da deformação.

$V_{cis}$  : Velocidade de cisalhamento.

$\epsilon_v$ : Deformação volumétrica.

$e$ : Índice de vazios

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>20</b>
<b>4.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
	4.2 Comportamento termomecânico de solos moles.....	21
	4.3 Comportamento termomecânico de solos moles.....	26
<b>5.</b>	<b>MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>34</b>
	5.1 MATERIAL.....	34
	5.2 EQUIPAMENTOS .....	35
	5.2.3 Equipamento triaxial convencional .....	37
	5.2.4 Equipamento triaxial térmico .....	38
	5.2.5 Sistema de aquecimento na linha de contrapressão .....	42
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
	6.1 Caracterização da amostra.....	44
	6.2 Moldagem do corpo de prova .....	44
	6.3 Etapa do consolidômetro e desmoldagem do corpo de prova (CP) ..	45
	6.4 Ensaio Triaxiais .....	47
	6.5 Procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU á 23°C.....	48
	6.6 Procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU a temperatura ambiente (23°C) .....	49
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
	7.1 Caracterização da argila caulim branca .....	52
	7.2 Envoltória de resistência para a argila CAULIM BRANCA .....	53
	7.3 Resultados para os ensaios triaxiais com variação de velocidade de cisalhamento .....	59
	7.3.1 Resultados para os ensaios triaxiais na temperatura ambiente (23°C) com variação da velocidade de cisalhamento .....	59
	7.3.2 Resultados para os ensaios triaxiais térmicos na temperatura de 40°C com variação da velocidade de cisalhamento .....	64
	7.3.3 Resultados para os ensaios triaxiais térmicos na temperatura de 55°C com variação da velocidade de cisalhamento .....	66
	7.3.4 Comparação dos resultados dos ensaios triaxiais com variação de temperatura entre 23°C, 40°C e 55°C .....	69
	7.3.5 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 0,02mm/min com variação de temperatura .....	69
	7.3.6 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 0,2mm/min com variação de temperatura .....	71
	7.3.7 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 2mm/min com variação de temperatura .....	73

7.3.8 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 20mm/min com variação de temperatura .....	74
7.3.9 Curvas de adensamento .....	77
7.3.10 Comparação dos resultados para os ensaios triaxiais com variação de temperatura e velocidade de cisalhamento .....	78
7.3.10.1 Comparação entre Tensão máxima desviadora para cada temperatura e velocidade de cisalhamento .....	78
7.3.10.2 Comparação entre Resistência Viscosa para cada temperatura e velocidade de cisalhamento .....	80
<b>8. CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## 1.INTRODUÇÃO

Atualmente, a Petrobrás utiliza os sistemas de ancoragem Taut-Leg e a Catenária para composição das fundações das suas plataformas de exploração e produção de petróleo. O sistema Taut-Leg utiliza estacas tipo torpedo, conectadas por cabos à plataforma com uma inclinação de aproximadamente  $45^\circ$ , proporcionando resistência aos esforços horizontais e verticais necessários para equilibrar a plataforma.

Por outro lado, o sistema de catenária é uma ancoragem convencional, onde a fixação é feita no solo por uma âncora permanente capaz de resistir apenas a esforços horizontais.

Essas ancoragens são instaladas a uma profundidade de 2000 metros da superfície, onde a temperatura da água ao redor das estacas é cerca de  $4^\circ\text{C}$ , resultando em uma água mais viscosa. Além disso, o solo é composto por argila mole, o que leva à falta de resistência durante a instalação das ancoragens, representando uma desvantagem significativa devido ao congestionamento de linhas na região marinha, necessárias para garantir a estabilidade de projeto.

A relevância deste estudo reside em contribuir com pesquisas que buscam melhorias na resistência inicial das ancoragens e assim diminuir o congestionamento marinho, considerando a viabilidade do aquecimento do solo na região durante a instalação. Devido à natureza de um solo pouco resistente situado em uma região de água viscosa, este trabalho visa investigar a influência da velocidade de cisalhamento na parcela de resistência viscosa do solo ao variar a temperatura com o intuito de diminuir a viscosidade da água e analisar o comportamento do solo a partir desta condição.

A metodologia adotada neste estudo compreende a realização de ensaios triaxiais térmicos em corpos de prova, utilizando quatro incrementos de velocidades diferentes e três temperaturas distintas:  $23^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  e  $55^\circ\text{C}$ .

Os resultados deste estudo têm como objetivo comparar a resistência não drenada, a resistência viscosa e o estado de resistência e deformação entre as velocidades de cisalhamento e as temperaturas acima.

## **2.OBJETIVOS**

O principal objetivo deste estudo é contribuir para solução do número excessivo de linhas de ancoragem por meio de estudos experimentais sobre o melhoramento térmico de argilas moles.

Como objetivo específico, esta pesquisa propõe realizar uma análise dos resultados obtidos a partir de uma sequência de ensaios triaxiais com diferentes níveis de temperatura e distintas velocidades de cisalhamento na condição não drenada.

### **3.JUSTIFICATIVA**

Atualmente, há muitas pesquisas dedicadas a investigar o comportamento termodinâmico de argilas moles, visando explorar suas propriedades mecânicas aprimoradas em vários projetos geotécnicos e em diversas áreas. No entanto, poucos estudos abordam esse tema especificamente em relação às argilas marinhas com variação da velocidade de cisalhamento. Diante desse contexto, e considerando o problema do congestionamento marinho, surge a oportunidade de estudar o comportamento termomecânico das argilas marinhas, com foco principalmente na estabilidade das fundações das plataformas de exploração de petróleo. Esse estudo será conduzido por meio de experimentos triaxiais usando a técnica de adensamento térmico com variação da velocidade de cisalhamento, seguindo as diretrizes estabelecidas em pesquisas anteriores, para fundamentação dos resultados a serem obtidos.

## **4.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.2 Comportamento termomecânico de solos moles**

Os primeiros estudos referentes ao comportamento térmico do solo tiveram seu início na década de 60. Esses estudos abrangeram várias áreas como da geologia, agronomia, meteorologia e da engenharia civil. No campo da engenharia civil com o passar dos anos, os avanços da tecnologia demandaram esses estudos para aplicação de técnicas em construção de rodovias, tubulação e cabos elétricos enterrados e vários outros tipos de estruturas e infraestruturas. (Farouki, 1981).

Entretanto, vários parâmetros a respeito deste tema foram analisados e estudados por diversos autores, o que se tornou um tema bastante amplo e neste trabalho será abordado somente os estudos para principais parâmetros necessários para os resultados deste trabalho, como por exemplo, a influência na poropressão e na tensão resistente de cisalhamento para o melhor entendimento didático.

Uma das consequências do aquecimento da argila é a variação da poropressão, que pode ocorrer quando o solo é exposto às condições não drenadas ou quando a condutividade hidráulica do solo é baixa. Alguns autores verificaram este processo ao submeter a argila às altas temperaturas como veremos a seguir.

Campanella e Mitchell (1968) observaram que quando um solo saturado em condições normalmente adensados é exposto a um aumento de temperatura, pode ocorrer uma poropressão termicamente induzida. Isso ocorre devido à diferença de expansão relativa entre a água e o esqueleto sólido do solo, resultando em uma redução da tensão efetiva, especialmente em solos com características de baixa permeabilidade.

Esrig (1969), Yang (1962) explicam que o aumento da temperatura em solos moles resulta em um aumento na distância entre suas partículas e uma redução na espessura de sua camada dupla. Isso leva a uma diminuição da tensão efetiva do solo em condições não drenadas.

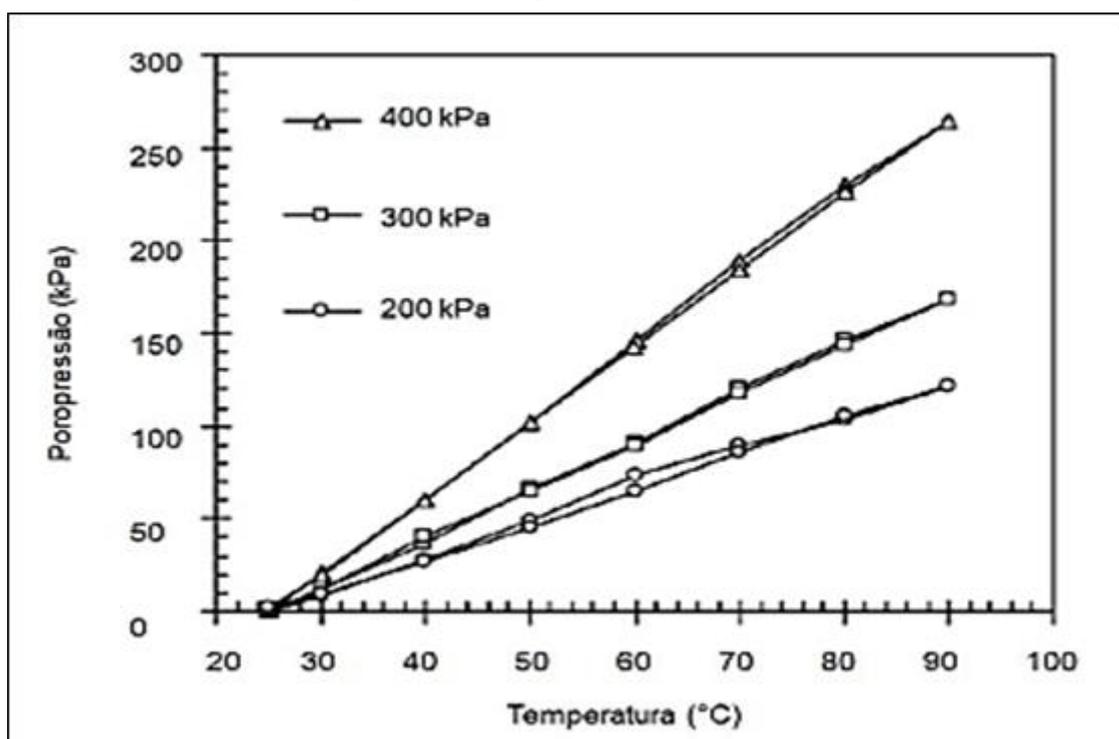
Em condições drenadas os autores observaram um acréscimo de tensão efetiva e um decréscimo na poropressão induzidas termicamente, ocasionando uma

variação de volume em argilas normalmente adensadas. (Campanella e Mitchell, 1968; Abuel-Naga et al., 2007; Bai et al.2014)

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

Abuel-Naga et al. (2007) e Ghaaowd (2018), afirmam que maiores tensões confinantes ocorrem maiores valores de poropressão no estado térmico. Eles também observaram um acréscimo de poropressão proporcional ao incremento de temperatura, apresentando um comportamento linear.

**Figura 1 — Poropressão induzida termicamente em função da temperatura para diferentes tensões confinantes em argilas em condição normalmente adensada.**



Fonte: Abuel-naga (2009).

Kuntiwattanakul et. al. (1995), disseram que a mudança de volume depende da história de tensão da argila, ou seja, o aquecimento fará com que haja variação nos índices de vazios em condições drenadas. Eles observaram que em ensaios triaxiais drenados, no estado normalmente adensado, a resistência ao cisalhamento aumenta após o aquecimento drenado. Os autores afirmam que grande parte dos estudos

mostram que a diminuição da resistência, se deu em ensaios com aquecimento não drenado.

Este fato é explicado por Samarakoon et al. (2019), que quando o aquecimento ocorre em condições não drenadas, a resistência ao cisalhamento diminui devido a um aumento na pressão térmica dos poros reduzindo as tensões efetivas.

Laloui e Cekerevac (2004) também disseram que “A amostra em condições não drenadas, quando aquecidas em uma determinada temperatura, tem quase o mesmo valor de resistência para as amostras testadas na temperatura ambiente. No entanto, a tensão de consolidação cai com o aumento da temperatura, diminuindo assim o seu limite de rendimento.”

Abuel Naga et al. (2007) observaram que a resistência aumentou para argilas moles aquecidas sob condições drenadas normalmente adensadas e sobreadensadas.

Já os autores Wang e Zhang (2020), aqueceram e romperam um solo de caulinita normalmente adensado sob condições drenadas e não encontraram nenhuma variação na resistência ao cisalhamento devido ao incremento de temperatura.

Laloui et al. (2014), apresentaram em seus estudos, uma comparação sobre os efeitos do incremento de temperatura na resistência ao cisalhamento, com diferentes condições de drenagem no adensamento aquecido e no cisalhamento e com diferença de resultados para cada autor, como mostra na tabela 1 a seguir:

*Tabela 1 — Diferença de resultados para cada condição de aquecimento e drenagem*

<b>Referência</b>	<b>Tipo de aquecimento</b>	<b>Tipo de cisalhamento</b>	<b>Mudança na resistência ao cisalhamento</b>
Abuel-Naga et al. (2007)	Drenado / não drenado	Não drenado/drenado	Aumento
Burghignoli et al. (2000)	Drenado	Não drenado	Leve aumento
Tanaka et al. (1996, 1997)	Drenado	Não drenado	Aumento
Cekerevac et al. (2005)	Drenado	Drenado	Leve aumento
Kuntiwattanakul et al. (1995)	Drenado	Não drenado	Aumento
Houston et al. (1985)	Drenado / não drenado	Não drenado	Aumento
Campanella e Mitchell (1968)	Drenado	Não drenado	Decréscimo
Hueckel e Baldi (1990)	Drenado	Drenado	Decréscimo
Moritz (1995)	Não drenado	Não drenado	Decréscimo
Sherif e Burrous (1969)	Não drenado	Não drenado	Decréscimo
Uchaipichat e Khalili (2009)	Drenado	Drenado	Decréscimo na resistência de pico e sem mudança na resistência ao cisalhamento no estado crítico
Alsherif e McCartney (2014)	Drenado	Drenado	Decréscimo para aquecimento sob baixa sucção, aumento para aquecimento sob alta sucção

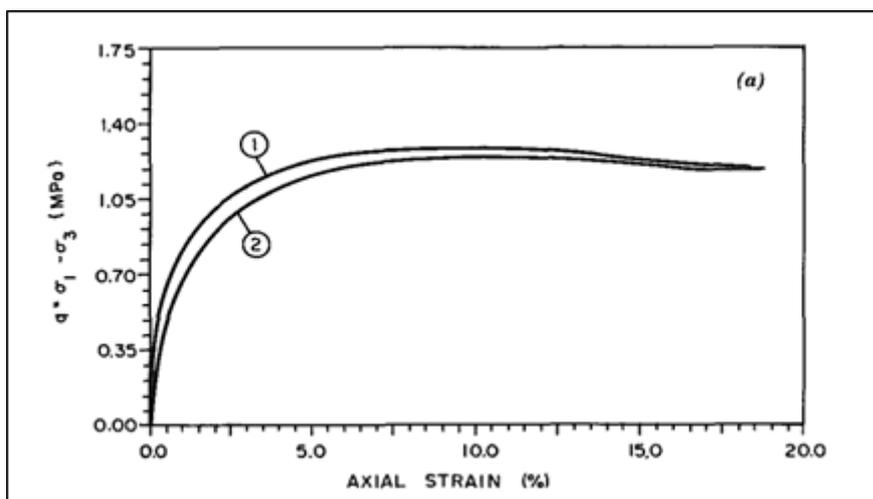
Fonte: Laloui (2014).

Portanto, a comparação da Tabela 1 anterior, mostra várias controversas entre os resultados dos experimentos quanto às condições dos ensaios.

Hueckel et ai. (2009) argumentam que a consideração falha da história térmica e de tensão de uma amostra de solo é uma das principais causas das contradições. Portanto, não é possível obter uma disposição exata do efeito das variações de temperatura na resistência ao cisalhamento.

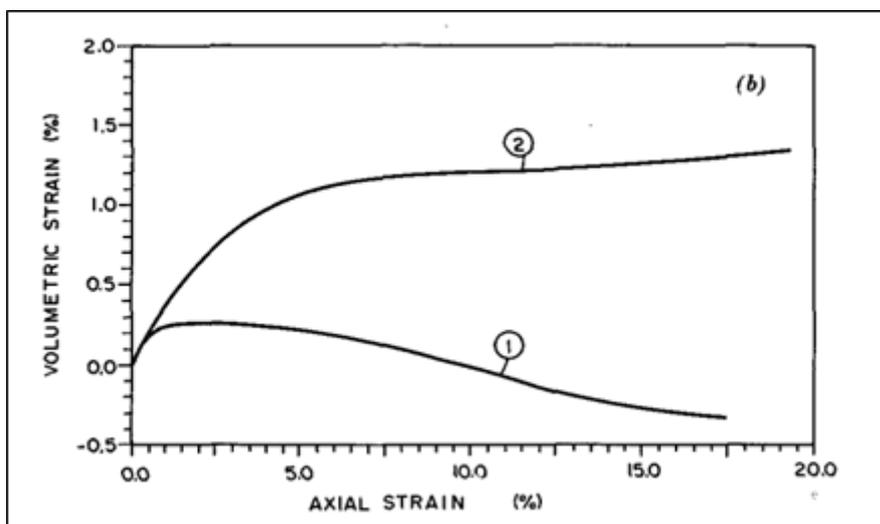
Heckel e Baldi (1990), realizaram um ensaio triaxial drenado térmico (CID), com uma argila siltosa em temperatura ambiente (23°C) e na temperatura de 98°C com OCR=5 e observaram uma maior resistência de cisalhamento na temperatura ambiente e uma menor resistência de cisalhamento na temperatura de 98°C e uma expansão de volume quando aquecida em 98°C e uma contração quando em temperatura ambiente. A figura 2 e 3 a seguir mostra o resultado dos seus ensaios:

**Figura 2 — Tensão Desviadora versus Deformação Axial. Curva 1 para a temperatura ambiente e curva 2 para a temperatura de 98°C.**



Fonte: O autor (2024).

**Figura 3 — Deformação volumétrica versus Deformação Axial . Curva 1 para a temperatura ambiente e curva 2 para a temperatura de 98°C.**



Fonte: O autor (2024).

Muitos estudos mostram que a estrutura e composição química da argila tais como suas propriedades físicas são fatores influenciadores na resistência ao cisalhamento e variação de volume quando submetidas ao aquecimento. (Campanella e Mitchell (1968), Baldi et. al (1988), Esrig (1969), Houston et. al (1986)).

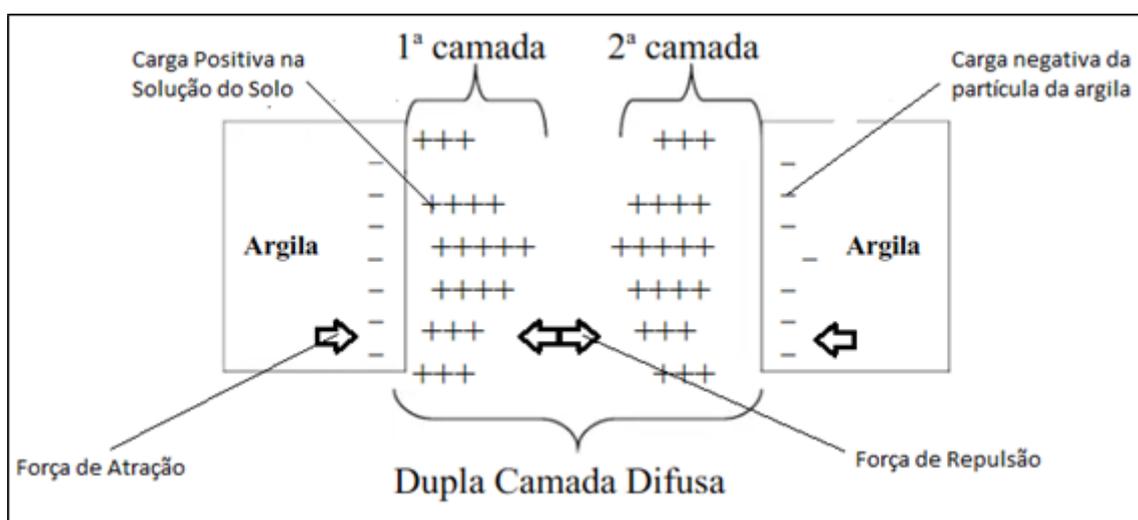
Os autores Campanella e Mitchell (1968) explicam esse fenômeno que o efeito da temperatura na resistência dos solos argilosos, depende do tipo de minerais/materiais que ele é composto (condutividade térmica), histórico de tensões (consolidação ou pré-adensamento), condições de drenagem (CID ou CIU), temperatura que foi aplicada durante o cisalhamento.

Assim, para entender o comportamento térmico de argilas de baixa porosidade, Baldi et al. (1988) disponibilizaram a análise propriedades microestruturais de águas porosas relacionadas à expansão térmica. A água intersticial pode ser apresentada das seguintes formas: a granel (bulk water), dupla camada (double layer) e água interlamelar (interlamellar water).

- À granel (bulk water): água livre na microestrutura da argila que preenche os vazios formados pelos poros da argila.
- Dupla camada (double) layer: A dupla camada de argila refere-se à estrutura de dupla camada elétrica que se forma em torno das partículas coloidais de

argila quando elas estão em uma solução aquosa. A água entre duas camadas de argila é atraída por forças eletroquímicas ou elétricas. Em solos argilosos com baixa porosidade, essas forças são muito altas. Quando a argila é submetida ao estado térmico, Marin e Silva (1984) observam que para argilas com maior porosidade, ocorre uma alteração na concentração iônica conforme a temperatura aumenta, promovendo a dissociação da água adsorvida tornando as forças de ligação menores. Esrig (1969), Yang (1962) e outros, acreditam que o aumento da temperatura na bicamada aumenta a distância entre as partículas constituintes da estrutura do solo.

**Figura 4 — Distribuição de íons a partir da superfície da argila de acordo com o conceito da dupla camada.**



Fonte: Marin e Silva.

### 4.3 Comportamento termomecânico de solos moles

A definição de viscosidade para solos argilosos se dar pelo modelo em que Terzaghi (1941) definiu, onde observou que as partículas de argila estão revestidas por uma camada de água adsorvida que está firmemente ligada aos grãos. À medida que se afasta da superfície dos grãos, a viscosidade da água adsorvida diminui até que essa água se torne livre a partir de uma determinada distância.

Diante disso, os solos argilosos, devido à sua composição fina e elevada plasticidade, exibem comportamento viscoso durante processos de deformação. A resistência viscosa desses solos é fortemente influenciada pela taxa na qual são submetidos a esforços de cisalhamento, isto é, pela velocidade com que ocorre a deformação. À medida que a velocidade de cisalhamento aumenta, observa-se uma

variação significativa na resistência viscosa dos solos argilosos. Em geral, solos argilosos tendem a apresentar uma diminuição na resistência viscosa com o aumento da velocidade de cisalhamento, um comportamento associado ao rearranjo das partículas do solo durante o processo de deformação, segundo o modelo definido por Terzaghi (1941). (Newton, 1687; Taylor 1948; Martins 1992)

Godoy (2022) explica esse fenômeno indicado pelo modelo de Terzaghi (1941) que durante o estágio inicial de carregamento de argilas, ocorre uma interação entre os flocos e as partículas associadas a eles, resultando em uma "fricção sólida" na superfície, também conhecida como viscosidade. Os flocos maiores oferecem resistência inercial quando as camadas tentam se mover, o que aumenta a velocidade de carregamento e a deformação cisalhante, levando à ruptura das ligações fracas entre as partículas e à redução da resistência. Conseqüentemente, a estrutura dos flocos se desintegra e a água se torna livre para o fluxo, resultando em uma diminuição da viscosidade e da resistência inercial.

Martins (1992), definiu em seus estudos que a resistência mecânica de um solo argiloso parte da soma de uma parcela de atrito e uma parcela viscosa, como mostra a equação baseada nos estudos de Taylor (1948) e Terzagui (1941) a seguir:

$$\tau = \tau_f + \tau_v \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$\tau_f$  = parcela resistente de atrito dependente do ângulo de atrito e a tensão efetiva do solo.

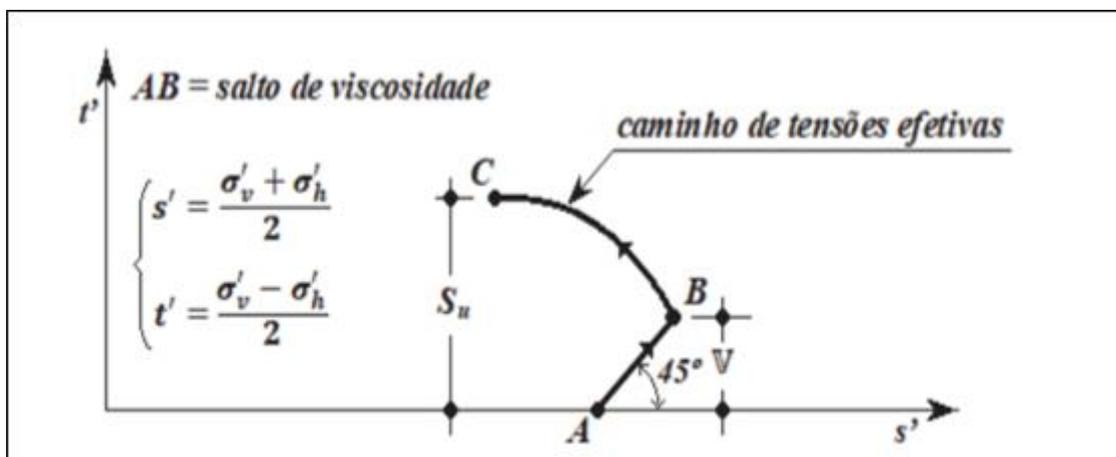
$\tau_v$  = parcela resistente de viscosidade dependente da viscosidade da água adsorvida e taxa de deformação com o tempo

A partir da equação 1 acima, alguns autores propuseram o modelo da resistência não drenada em função da variação da velocidade de cisalhamento no diagrama  $p' \times q$ .

Martins Et al. (2021), dispôs este modelo e definiu que no diagrama  $p' \times q$  a trajetória de tensão efetiva demonstra um salto de viscosidade de  $45^\circ$  (parcela viscosa) e após retoma o caminho de tensão efetiva até encontrar a envoltória no seu

valor máximo de cisalhamento (parcela de atrito) como mostra sendo a soma a resistência não drenada ( $S_u$ ), como mostra a figura 5 seguir:

**Figura 5 — Modelo apresentado por Martins (2021)**



Fonte: Martins Et. Al. (2021).

A figura 5 acima mostra que a trajetória de A para B representa a parcela viscosa (V), a trajetória de B para C representa a parcela de atrito e a trajetória AC representa a soma total da resistência não drenada.

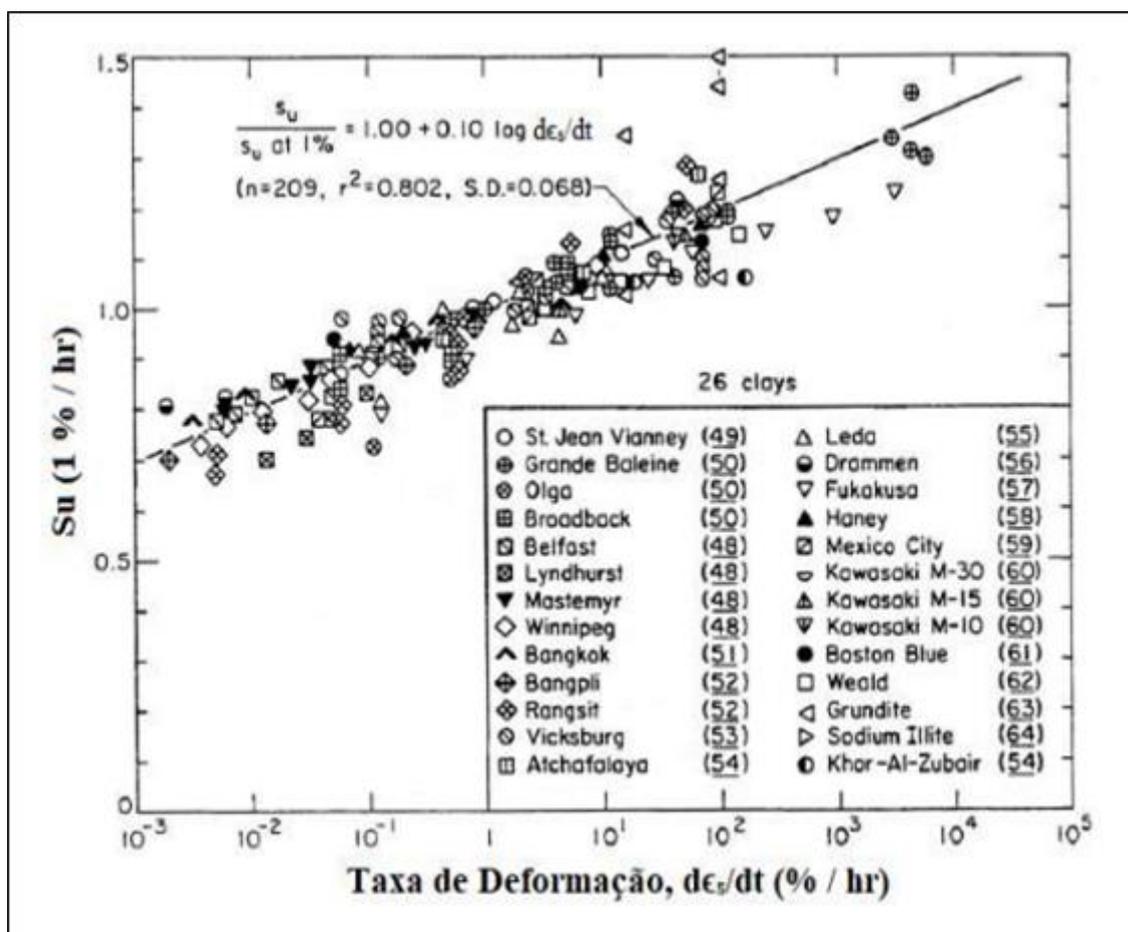
Martins et al. (2021), ainda dispôs em seu estudo a seguinte afirmativa sobre a velocidade de cisalhamento: "Assim a resistência não-drenada, além da parcela de atrito, é composta de uma parcela viscosa dependente da velocidade de deformação. Quanto maior a velocidade, maior a resistência não-drenada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

Godoy (2022) também estudou os efeitos da viscosidade no comportamento geomecânico e no seu estudo disse que: "(...) no início da etapa de cisalhamento, caso a prensa seja ligada com certa velocidade, ocorrerá um salto inicial da CTE em direção a CTT, devido à mobilização instantânea da viscosidade (...)"

Godoy (2022 apud Vaid & Campanella 1977) realizaram cinco ensaios triaxiais CIU com diferentes velocidades de deformação (1,1 %/min a  $9,4 \times 10^{-4}$  %/min) em argilas normalmente adensadas. Observou-se um aumento da resistência não drenada ( $S_u$ ) com o aumento da velocidade, sendo que uma variação de três ordens de grandeza da velocidade resulta em um aumento de resistência de cerca de 30%.

De forma similar, Kulhawy & Mayne (1990) analisaram 26 argilas submetidas a compressão triaxial CIU, os resultados desses autores indicaram um aumento de 10% de  $S_u$  para um aumento de um ciclo logarítmico da velocidade de deformação. (GODOY 2022). A figura 6 a seguir mostra o resultado para essa análise:

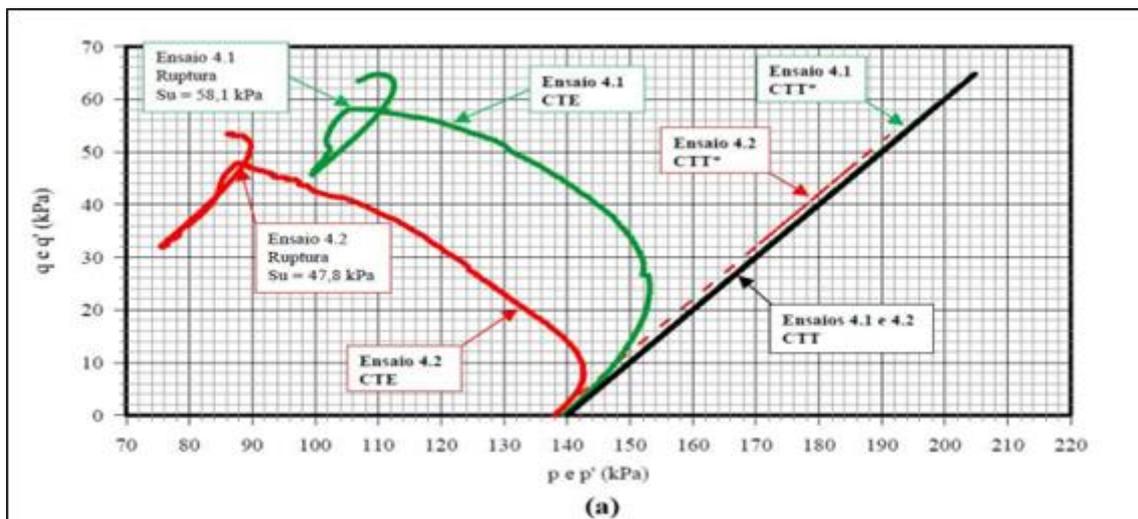
Figura 6 — Influência da Velocidade de Deformação no valor de  $S_u$  para vários tipos de argila.



Fonte: Godoy (2022).

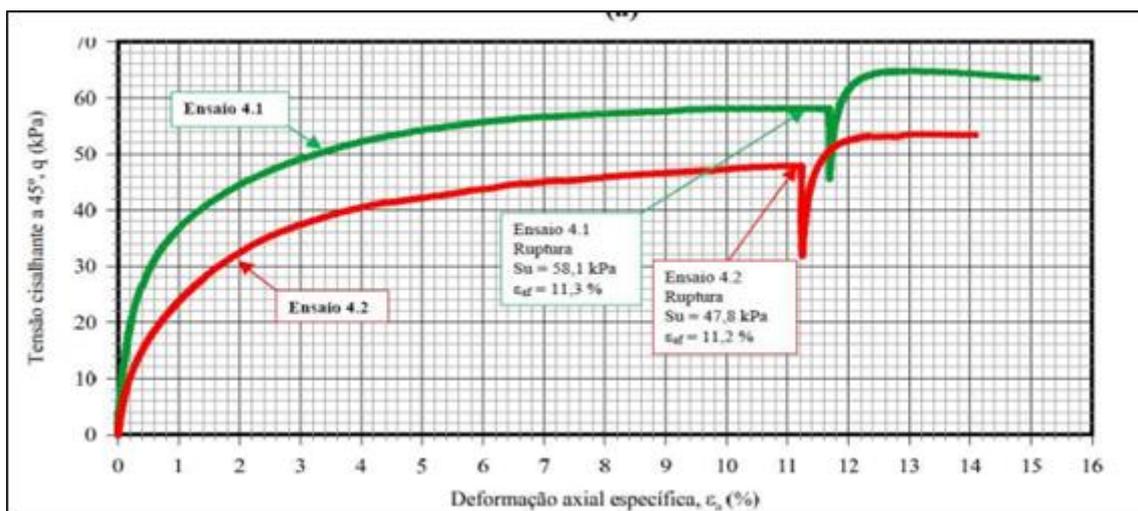
Godoy (2022) realizou ensaios triaxiais CIU com uma argila de Sarapuí (SP) em uma tensão confinante de 140 kPa. O ensaio 4.2 a velocidade de 0,002%/min e 4.1 na velocidade de 0,02%/min. Para ambos os ensaios é possível notar o salto de resistência viscosa inicial onde a TTE (trajetória de tensões efetivas) tende a ser similar a TTT (trajetórias de tensões totais) e o ganho desta resistência não drenada com o acréscimo de velocidade a seguir na figura 7 e 8:

Figura 7 — Trajetória de tensões efetivas para dois ensaios com variação de velocidade.



Fonte: Godoy (2022).

Figura 8 — Curva tensão x deformação para os ensaios com variação de velocidade.



Fonte: Godoy (2022).

O autor também analisou que carregamentos isotrópicos ( $p'$ ) elevados atingem valores maiores de  $q'$  na ruptura e de poropressão.

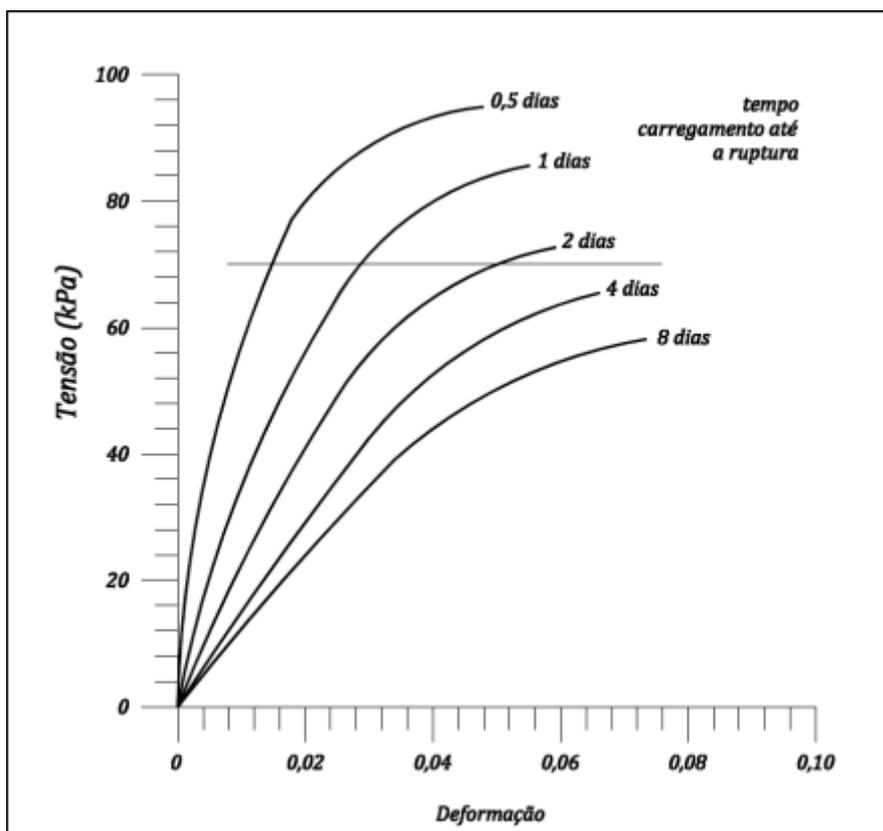
Pinto (2016), também constatou que a capacidade de suportar carga sem drenagem por parte de uma argila está diretamente ligada à taxa de aplicação da carga. Quanto mais rápida for a aplicação da carga, maior será a resistência não-drenada observada.

Essa relação ganha maior relevância em solos com maior plasticidade, indicada pelo Índice de Plasticidade. Isso se deve ao fato de que solos com maior índice de

plasticidade possuem um maior número de interações entre as partículas minerais das partículas devido às características viscosas dessas ligações entre os grãos.

A figura 9 a seguir mostra o resultado apresentado por PINTO (2016) em relação a tensão e taxa de deformação, apresentando uma maior resistência nos carregamentos em menos dias:

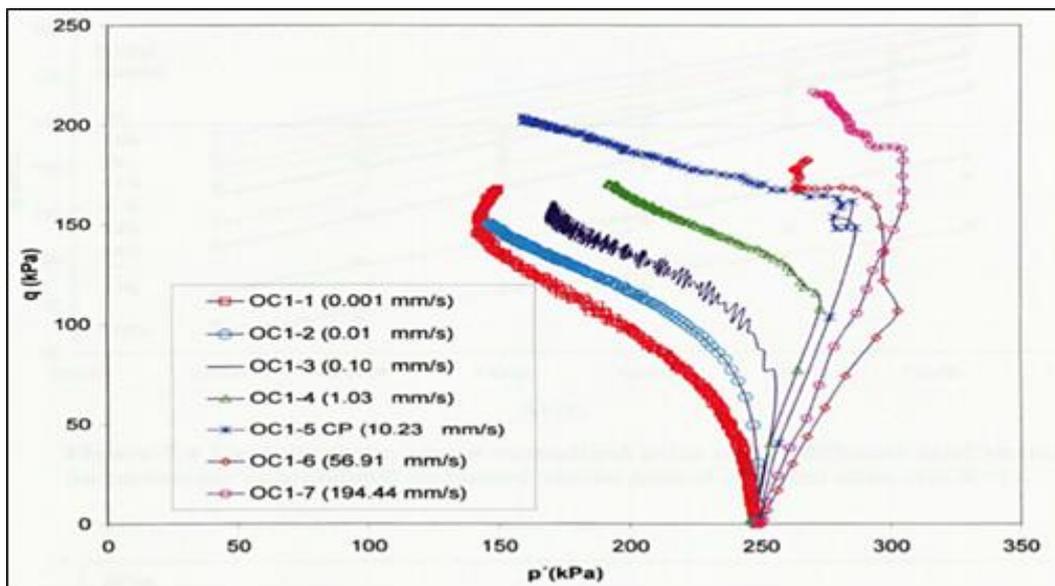
**Figura 9 — Resultados dos ensaios de compressão não drenada com diferentes velocidades de carregamento, expressas pelo tempo decorrido até a ruptura.**



Fonte: Carlos de Sousa Pinto (2016).

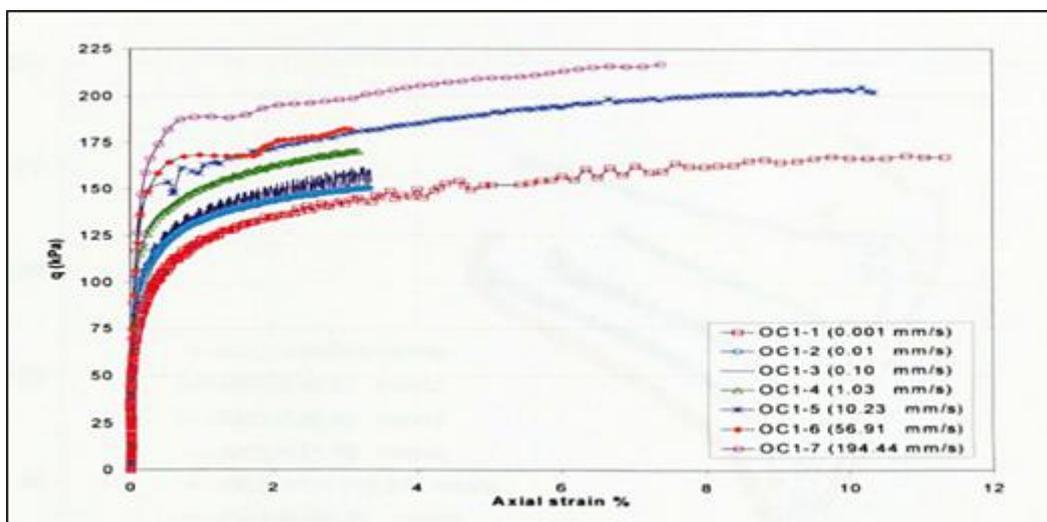
Meca (2004), também realizou ensaios com várias velocidades em argila Speswhite e observou que a maior velocidade obteve maior resistência quanto a da menor velocidade como ao contrário da poropressão que obteve valores inferiores com o incremento de velocidade de cisalhamento mostra na figura 10 e 11 a seguir:

Figura 10 — Trajetória de tensões efetivas para diferentes taxas de deformação.



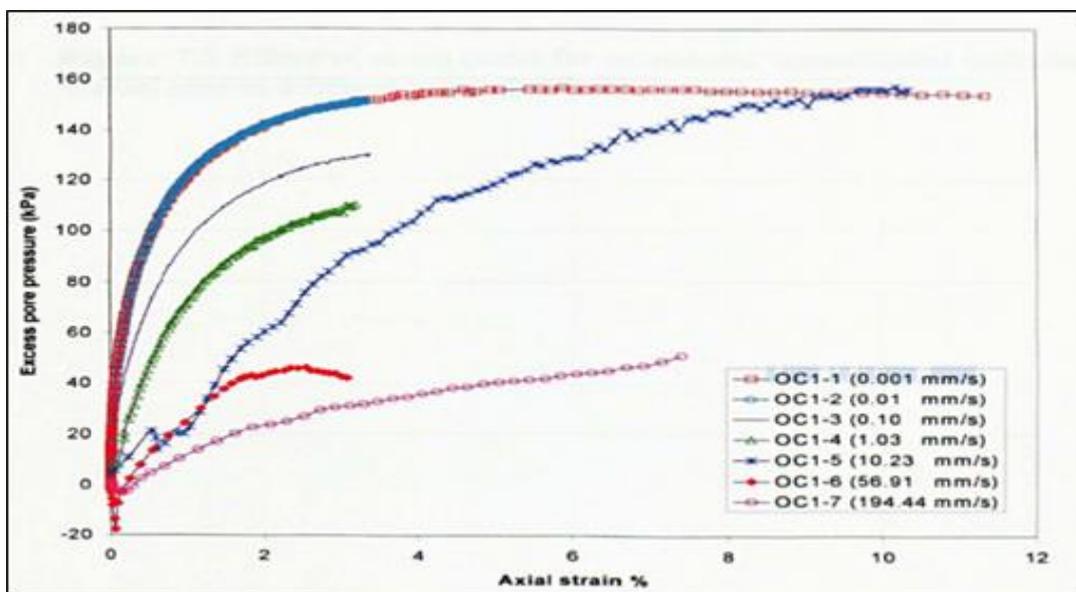
Fonte: Meca (2004).

Figura 11 — Tensão desviadora x curvas de deformação axial para testes consolidados não drenados triaxiais em diferentes taxas de deformação



Fonte: Meca (2004).

Figura 12 — Poropressão x deformação para ensaio triaxial não drenado em diferentes taxas de deformação.



Fonte: Meca (2004).

Pode observar na figura 11 acima que ensaios com maiores velocidades obtiveram menores valores de poropressão (Meca, 2004).

## 5.MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 5.1 MATERIAL

O material a ser utilizado para compor o corpo de prova para determinação dos ensaios é argila do tipo caulim branca. Este material por ser um material argiloso, se aproxima do material do solo na região onde estão instaladas as fundações das plataformas marítimas, caracterizando de solos moles.

HUANCCOLO (2020), disponibilizou em seu estudo a análise química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) do solo da região marítima onde estão situadas as plataformas na bacia de Campos, objeto deste trabalho como mostra a figura 13 a seguir:

**Figura 13 — Resultado da análise química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) do solo marinho da região da bacia de Campos**

<b>Elemento</b>	<b>Valor (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	50.33%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.86%
CaO	8.90%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.46%
K <sub>2</sub> O	5.41%
SO <sub>3</sub>	2.99%
Cl	2.45%
TiO <sub>2</sub>	1.30%
MnO	0.11%
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10%
CuO	0.03%
SrO	0.03%
ZnO	0.02%
ZrO <sub>2</sub>	0.01%

Fonte: Huanccolo (2020).

Pode – se analisar que a soma dos componentes da caulinita (SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) resultou em valor maior que 70%, podendo considerar um solo predominante de caulinita. Como base para os ensaios, alguns autores utilizaram este material em

seus estudos, como foi tratado na revisão bibliográfica deste trabalho (capítulo anterior).

O termo caulim é devido esse tipo de argila ter praticamente 95 a 98% de caulinita em sua composição possuindo a coloração da cor branca. A figura 14 a seguir mostra o material que foi utilizado neste trabalho:

**Figura 14 — Amostra de Caulim**



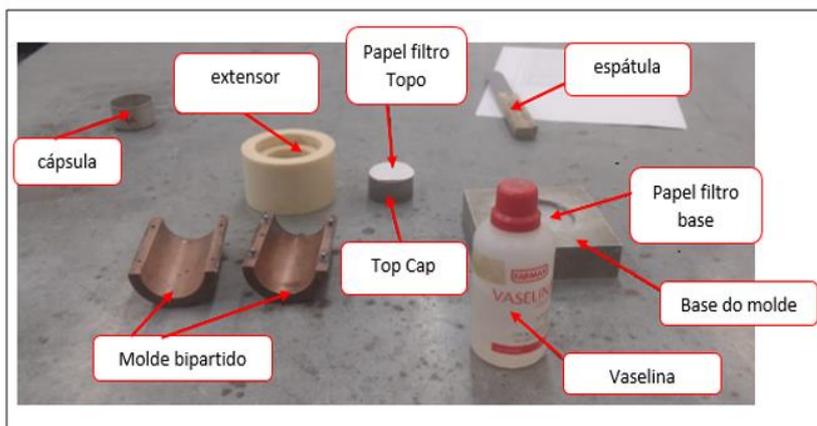
Fonte: O autor (2024).

## **5.2EQUPAMENTOS**

### **5.2.1 Montagem do corpo de prova**

A figura 15 a seguir mostra o equipamento e os materiais necessários para moldagem do corpo de prova.

**Figura 15 — Materiais utilizados para moldagem do corpo de prova**

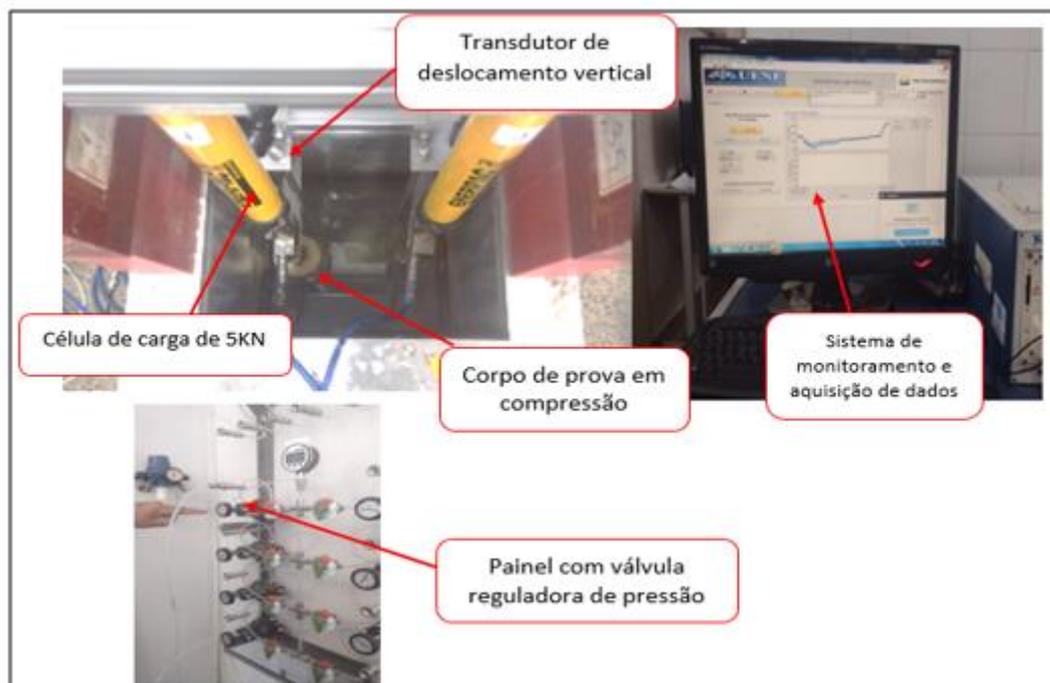


Fonte: O autor (2024).

### **5.2.2 Equipamento consolidômetro**

O consolidômetro é um dispositivo montado na centrífuga geotécnica – UENF, consiste de um container com sistema de reação para aplicação da carga, atuador hidráulico, interface ar-óleo, painel com válvulas reguladoras de pressão, conversor/condicionador AD, 1 célula de carga, 1 transdutor de deslocamento e um computador com o sistema captador de informações para o monitoramento da pressão exercida na amostra e sua variação do volume.

Figura 16 — Esquema constituinte do consolidômetro.

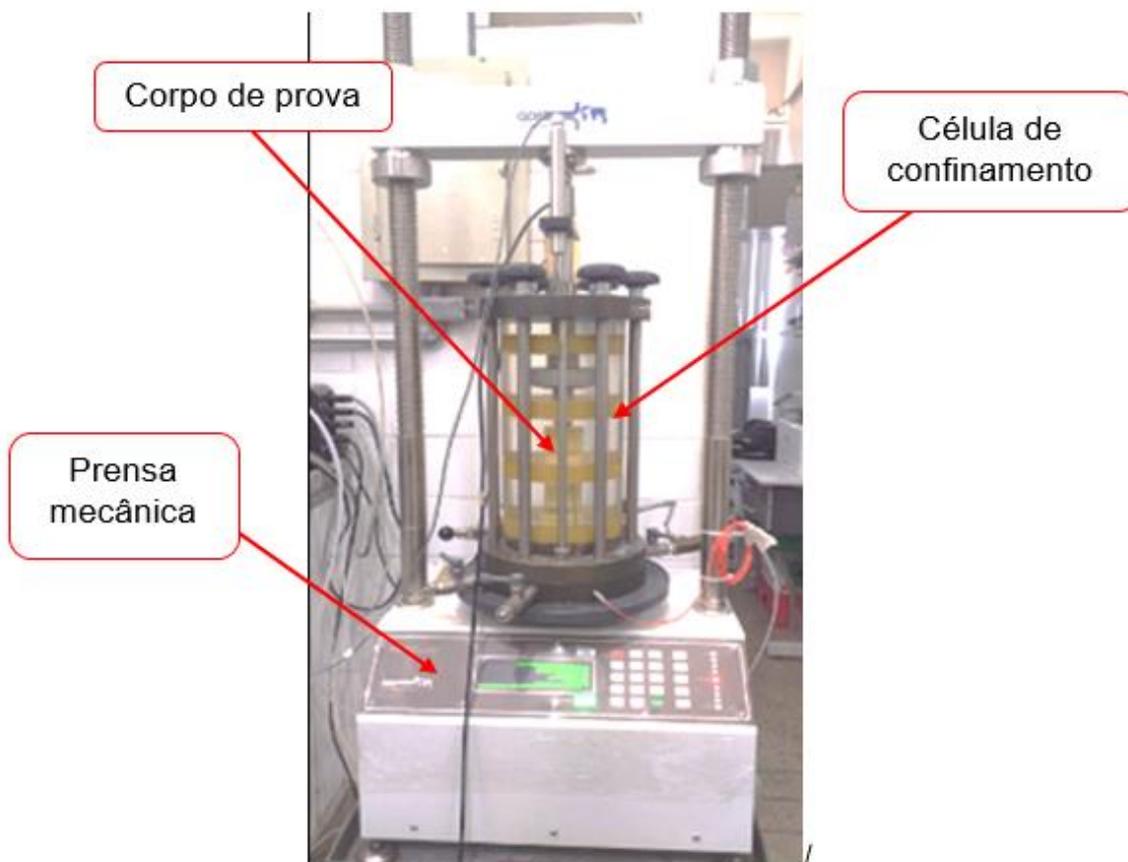


Fonte: O autor (2024).

### 5.2.3 Equipamento triaxial convencional

Equipamento para desenvolver pesquisas em mecânica de solos, que tem a capacidade de submeter um corpo de prova a diferentes estados de tensões efetivas num campo axisimétrico. O equipamento é composto por uma Câmara de confinamento, célula de carga, prensa mecânica, bomba hidráulica de confinamento, bomba hidráulica de contrapressão e software para o monitoramento e aquisição de dados.

Figura 17 — Equipamento Triaxial Convencional.



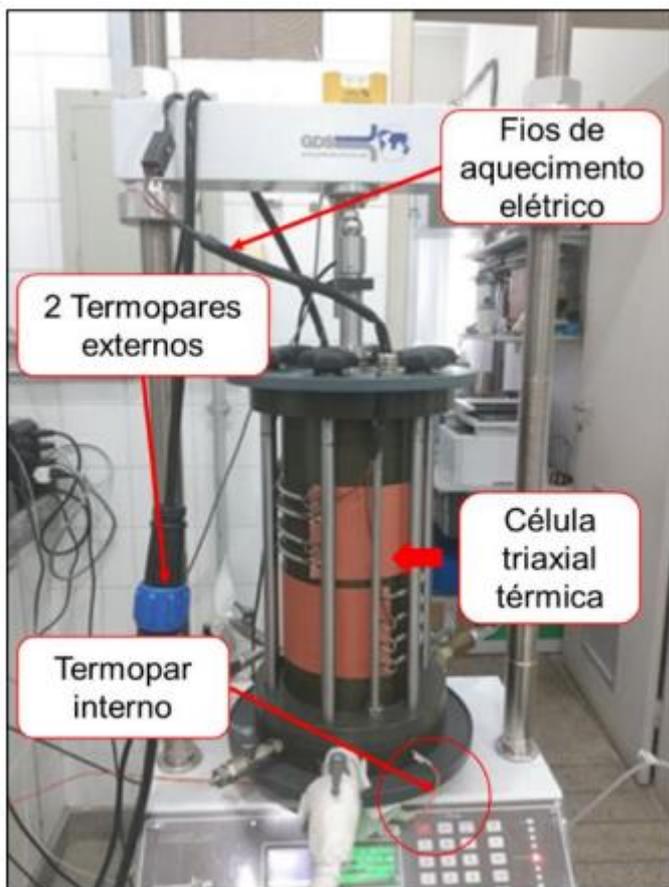
Fonte: O autor (2024).

#### 5.2.4 Equipamento triaxial térmico

É um equipamento semelhante ao equipamento triaxial convencional que permite desenvolver pesquisas relacionadas ao comportamento termomecânico das argilas.

Ele possui as partes de um triaxial convencional sendo a célula de confinamento substituído por uma célula resistente ao calor e um sistema de controle de temperatura autônomo e independente com três termopares. Na Figura 18 a seguir mostra a célula triaxial térmica, termopares e os fios que conduzem o aquecimento elétrico. Cada um serão descrito detalhadamente a seguir:

**Figura 18 — Partes principais do triaxial térmico do laboratório do prédio da centrifuga geotécnica – UENF**



Fonte: Huanccolo (2020).

- a. Câmara triaxial térmica: A Figura 18 mostra a célula térmica adquirida pelo laboratório da centrifuga geotécnica – UENF com serial N° 22463. Segundo as especificações a célula permite um aquecimento de máximo 65°C e contém um cobertor de isolamento térmico como se observa na Figura 19. A capacidade da célula é de 4MPa. A prensa tipo GDS LF50 (Figura 18) é a mesma seja para célula convencional (realizar ensaios convencionais) como para ensaios térmicos com temperaturas maiores que as do ambiente. A transferência de calor para o corpo de prova é mediante o aquecimento da água contido na célula através das bandas aquecedoras (Figura 19).
- b. Sistema de controle de temperatura: É uma das partes principais do triaxial térmico, que tem a capacidade de controlar o aquecimento da água dentro da célula. A resistência elétrica está instalada nos “cobertores” que aquece todo o sistema. Na Figura 21 é apresentado o sistema utilizado para controlar a

temperatura. Este também foi adquirido na GDS. Observa-se que este equipamento tem um controlador de temperatura que é ligado ao termopar que está dentro da câmara triaxial. Para avaliar todo o sistema de aquecimento foi feito um teste com um termopar instalado em um multímetro digital, onde verificou-se uma pequena diferença de 2° C para menos. Considerou-se aceitável esta diferença pois leva-se um tempo para desmontar o sistema e fazer a medição com o multímetro.

c. Termopares: Tem a finalidade de registrar a temperatura em tempo real. O triaxial térmico adquirido pelo laboratório da centrifuga geotécnica da UENF contém três termopares, dois externos e um interno. Porém na presente pesquisa houve a possibilidade de incrementar mais um termopar exterior para o controle do aquecimento da água a contrapressão dos CPs (Figura 17). Na Figura 22 se observa a posição do termopar interno denominado T1, localizado na base do triaxial térmico. Este termopar permite medir a temperatura da água no interior da célula triaxial. Os dois termopares externos estão localizados na parede exterior da célula com a função de registrar as temperaturas das bandas aquecedoras (Figura 18).

**Figura 19 — Célula Triaxial térmica do laboratório da centrifuga geotécnica – UENF**



Fonte: Huanccolo (2020).

**Figura 20 — Cobertor de isolamento térmico da célula triaxial térmica do laboratório de centrifuga geotécnica – UENF.**



Fonte: Huanccolo (2020).

**Figura 21 — Sistema de controle de temperatura do laboratório da centrifuga geotécnica – UENF**



Fonte: Huanccolo (2020).

**Figura 22 — Termopar interno (T1) do triaxial térmico adquirido pela centrifuga geotécnica da UENF.**



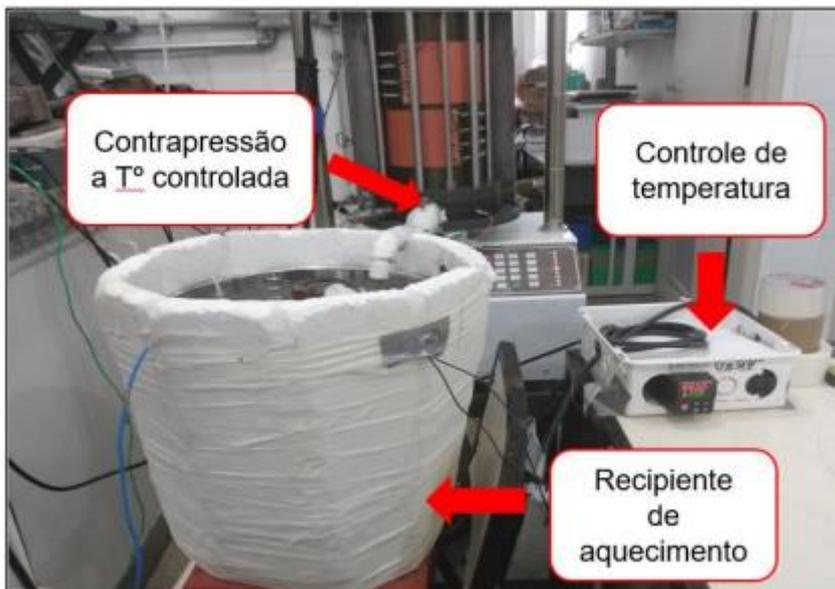
Fonte: Huanccolo (2020).

### **5.2.5 Sistema de aquecimento na linha de contrapressão**

Esta parte do equipamento não pertence ao novo triaxial térmico adquirido. Foi instalado no sistema por sugestão do com a finalidade de restringir qualquer troca térmica na linha de contrapressão dos CPs. Na Figura 23 a seguir se apresenta o sistema de aquecimento na linha de contrapressão. Constituído por um recipiente de aquecimento onde se encontra um tubo de aço inoxidável de 1/8" submerso em água. O recipiente também contém uma resistência elétrica e um termopar com um sistema eletrônico para controlar a temperatura na linha de contrapressão (Figura 22). O sistema permite que a água vinda baixo pressão controlada da bomba hidráulica na linha de contrapressão é aquecida até a temperatura colocada no sistema de aquecimento mostrado na Figura 24 a seguir.

A Figura 23 e 24 permite observar a metodologia de aquecimento descrito:

Figura 23 — Sistema de aquecimento na direção de contrapressão.



Fonte: Huanccolo (2020).

Figura 24 — Vista superior do sistema de aquecimento na direção de contrapressão.



Fonte: Huanccolo (2020).

## **6. METODOLOGIA**

### **6.1 Caracterização da amostra**

São descritas abaixo as etapas da caracterização da amostra de caulim seguidos de suas normas regimentadoras, para o colhimento de parâmetros necessários para desenvolvimento dos ensaios deste trabalho e em seguida os seus resultados:

1. Umidade natural ( $w$ ) seguindo o que dispõe a norma ABNT NBR 6457/86 “Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização – Método de Ensaio”;
2. Limite de liquidez (LL) seguindo o que dispõe a norma ABNT NBR 6459/84 “Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio”;
3. Limite de plasticidade (LP) seguindo o que dispõe a norma ABNT NBR 7180/84 “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio”;
4. Densidade dos grãos (Gs) seguindo o que dispõe a norma ABNT NBR 6508/84 “Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica”;

### **6.2 Moldagem do corpo de prova**

O corpo de prova foi moldado a partir da medição da umidade higroscópica da amostra que resultou em uma média de 97% para adição da água necessária dentro dos dados do limite de liquidez adquiridos pela etapa anterior que garante a trabalhabilidade para moldagem da amostra, a mesma foi moldada e montada em uma forma com formato cilíndrico bipartido onde constituiu o corpo de prova para a próxima etapa cujas medidas são de 38 x 76 mm com os materiais mostrado no item 5.2.1.

Utilizou – se 240g de material e 184g de água para constituir a massa necessária para moldagem do corpo de prova. A quantidade de água foi calculada a 15% do limite de liquidez, cujo resultado para o limite de liquidez será mostrado no próximo capítulo.

### **6.3 Etapa do consolidômetro e desmoldagem do corpo de prova (CP)**

Após a moldagem e montagem do corpo de prova, este foi submetido a uma tensão de pré-consolidação de 100 KPa no consolidômetro, aumentando gradativamente a carga durante um período de 5 dias. Estas foram distribuídas em cinco estágios, os quais são: 7, 15, 30, 50 e 100 KPa, aumentando a carga a cada 24 horas. A carga de 100 kPa final garante que ao seguir para a próxima etapa, a etapa do ensaio triaxial, a amostra tenha a característica de um solo normalmente adensado quando for aplicada uma carga de 200kPa, sendo a tensão confinante padrão para todos os ensaios da etapa dos ensaios triaxiais deste trabalho, que será tratado a seguir. O período de 5 dias é devido o material ser consistência muito mole o que requer acréscimo de carga gradativamente para que o corpo de prova ganhe uma qualidade de consistência para o processo de desmoldagem.

Após o período de adensamento no consolidômetro, a amostra foi desenformada cuidadosamente e em seguida foi tirado o excesso de medida da altura do corpo de prova (CP) a partir do molde e o excesso foi utilizado para o cálculo do índice de vazios inicial.

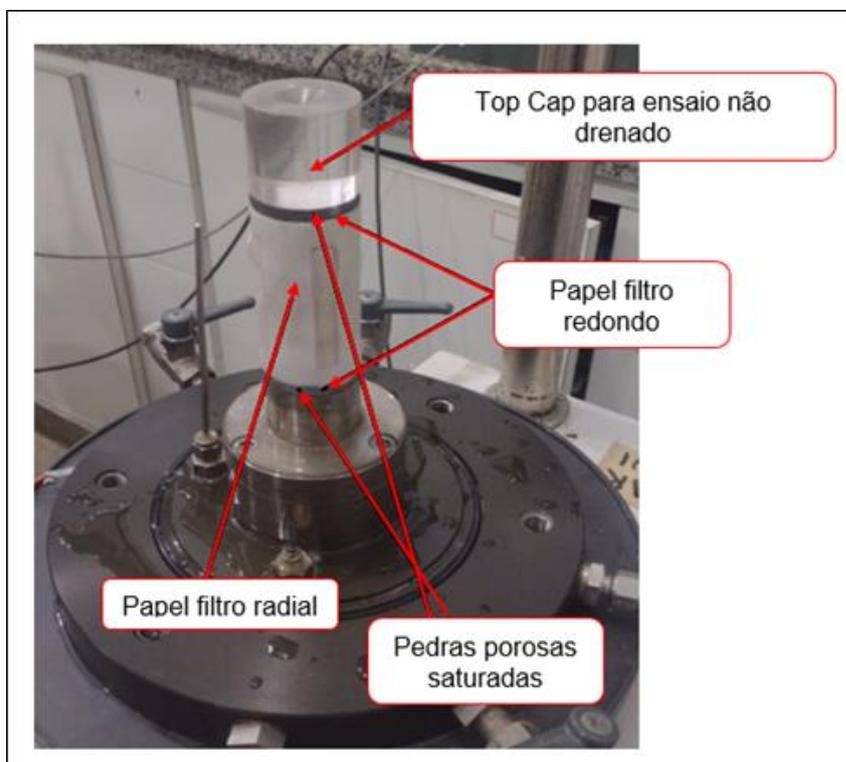
Após desenformar e pesar o corpo de prova, envolveu - se com filtro radial para empregar a drenagem radial e acelerar o tempo de adensamento mecânico como proposto por Bishop e Henkel (1962); e em seguida colocou -se a membrana elástica, como mostra as imagens a seguir:

Figura 25 — Pesagem do corpo de prova após ser desmoldado.



Fonte: O autor (2024).

Figura 26 — Montagem do corpo de prova no equipamento triaxial.



Fonte: O autor (2024).

**Figura 27 — Colocação da membrana elástica no corpo de prova.**



Fonte: O autor (2024).

#### **6.4 Ensaios Triaxiais**

Após passar pelo consolidômetro, no período consolidação citados anteriormente, as amostras foram montadas para ser submetidas aos ensaios triaxiais (figuras anteriores) na condição de cisalhamento não drenado. A tabela 2 a seguir mostra o esquema dos ensaios nas temperaturas de 23°C, 40°C e 55°C, variando as taxas de deformação em 0,02; 0,2; 2 e 20 mm/min.

Tabela 2 — Esquema dos ensaios para o estudo deste trabalho.

Ensaio		Tensão confinante (kPa)	Temperatura (°C)	Velocidade de cisalhamento (mm/min)
1	CP1	100	23	2
	CP2	400	23	2
2	CP4	200	23	0,02
	CP5		23	0,2
	CP6		23	2
	CP7		23	20
3	CP8		40	0,02
	CP9		40	0,2
	CP10		40	2
	CP11		40	20
4	CP12		55	0,02
	CP13		55	0,2
	CP14		55	2
	CP15		55	20

Fonte: O autor (2024).

### 6.5 Procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU á 23°C

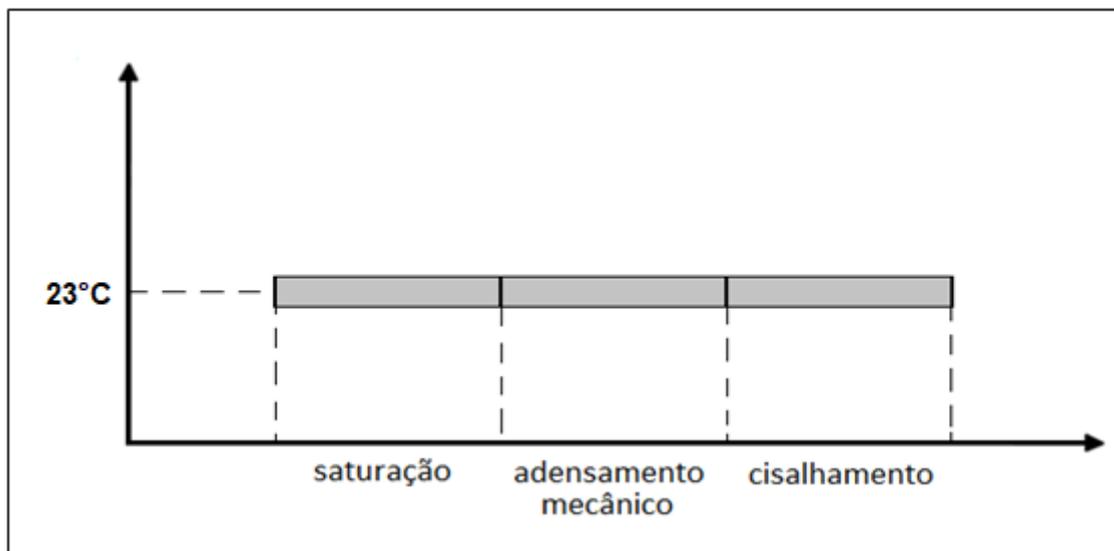
I. Saturação: a saturação é por contrapressão, segundo a norma ASTM: D4767- 11 aconselha para argilas de alta plasticidade uma pressão mínima para atingir um  $S_v=100\%$ . Na presente pesquisa foram empregadas uma tensão confinante de 200kPa e uma contrapressão de 190kPa em um intervalo de 3 horas. O corpo de prova se considera saturado se o valor de B é maior a 0,96.

II. Adensamento mecânico: pertence ao adensamento hidrostático comum empregado em ensaios triaxiais. No estágio da saturação as tensões iniciais foram confinante 390kPa e contrapressão 190kPa, por tanto, para uma tensão efetiva de 200kPa. A mesma metodologia foi empregada mantendo a contrapressão de 190 kPa para atingir tensões efetivas de 100 e 400kPa, e tensão confinante de 290 kPa e 590 kPa. O tempo para esta etapa foi de 5 horas.

III. Cisalhamento: é o último estágio do procedimento em ensaios triaxiais a temperatura ambiente. A tensão efetiva atingida na etapa de adensamento mecânico em cada CP é mantida constante na presente etapa. A metodologia de cisalhamento do equipamento triaxial em geral no laboratório da centrifuga geotécnica da UENF é por deformação controlada. As velocidades de cisalhamento para foram de 0,02; 0,2; 2 e 20 kPa para todos os ensaios na temperatura 23°C, e para os ensaios da envoltória, a velocidade foi de 0,2 mm/min. O cálculo da velocidade ideal para o material a ser estudado vai ser detalhado no tópico “Resultados e discussão” a seguir

e a partir disso foi definida as velocidades de cisalhamento em ordem de grandeza crescente.

**Figura 28 — Diagrama do procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU à temperatura de 23°C**

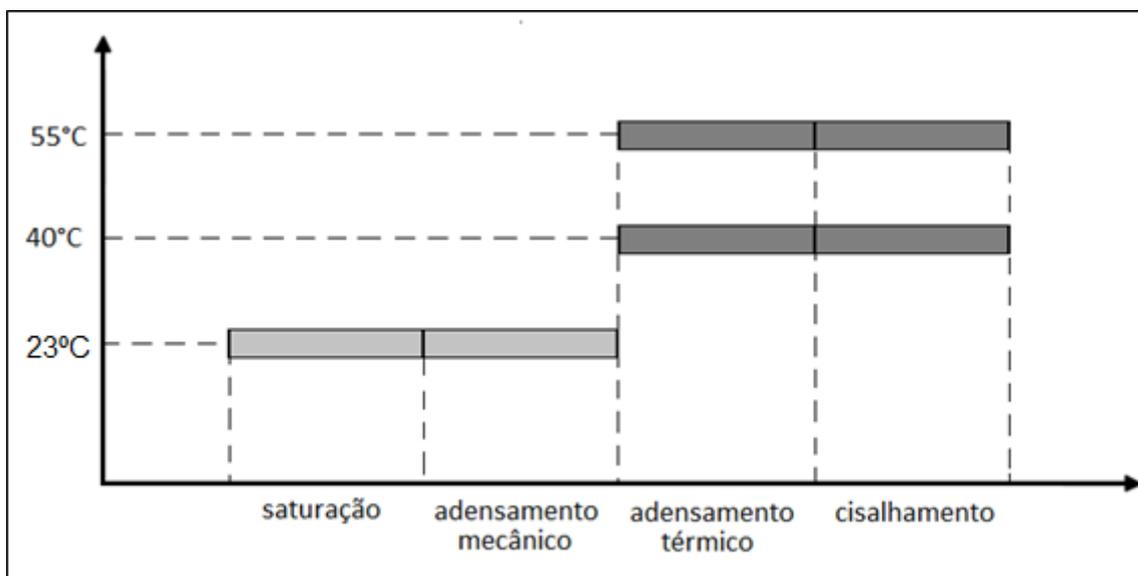


Fonte: O autor (2024).

### **6.6 Procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU a temperatura ambiente (23°C)**

Este bloco corresponde aos ensaios triaxiais tipo CIU em temperaturas maiores que a ambiente, que são os objetivos desta pesquisa. A diferença dos ensaios triaxiais a temperatura ambiente, é que foi adicionada a etapa de adensamento térmico e cisalhamento térmico conforme o diagrama na figura 29 a seguir:

**Figura 29 — Diagrama do procedimento padrão para ensaios triaxiais tipo CIU na temperatura de 40°C e 55°C.**



Fonte: O autor (2024).

A seguir serão descritos detalhadamente as etapas para os ensaios de 40 e 55°C:

I. Saturação: a saturação é por contrapressão, segundo a norma ASTM: D4767- 11 aconselha para argilas de alta plasticidade uma pressão mínima para atingir um  $S\%=100\%$ . Na presente pesquisa foram empregadas uma tensão confinante de 200KPa e uma contrapressão de 190KPa em um intervalo de 3 horas. O corpo de prova se considera saturado se o valor de B é maior a 0,96.

II. Adensamento mecânico: pertence ao adensamento hidrostático comum empregado em ensaios triaxiais. No estágio da saturação as tensões iniciais foram confinante 390KPa e contrapressão 190KPa, por tanto, para uma tensão efetiva de 200KPa. A mesma metodologia foi empregada mantendo a contrapressão de 190 kPa para atingir tensões efetivas de 100 e 400KPa, e tensão confinante de 290 kPa e 590 kPa. O tempo para esta etapa foi de 5 horas.

III. Adensamento térmico: é a etapa adicional mais importante do procedimento padrão. Consiste em incrementar a temperatura do corpo de prova até um acréscimo de temperatura de 40° e 55°C (Figura 29), permanecendo constante a tensão efetiva determinada durante a etapa anterior. O aquecimento foi a uma taxa constante de 0,5°C/min, permitindo chegar em 30min para ensaios a 40°C e 60min para ensaios a 55°C. O tempo de duração para esta etapa foi de 5 horas.

IV. Cisalhamento: é o último estágio do procedimento em ensaios triaxiais para as temperaturas de 40 e 55°C. A tensão efetiva atingida na etapa de adensamento mecânico em cada CP é mantida constante na presente etapa mantendo aquecido nas temperaturas acima citadas. A metodologia de cisalhamento do equipamento triaxial permaneceu de deformação controlada. As velocidades de cisalhamento foram de 0,02; 0,2; 2 e 20 KPa para todos os nas temperaturas de 40 e 55°C.

A trajetória de tensões efetivas para os ensaios triaxiais a temperatura ambiente e a temperatura de 40 e 55°C, é observado em um gráfico bidimensional onde o eixo da abcissa é representada pela variável da tensão media efetiva ( $p'$ ) e o eixo das ordenadas pela variável da tensão desviadora ( $q$ ).

As equivalências das variáveis  $p'$  e  $q$  se apresentam nas equações a seguir:

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3 \quad \text{Eq. 2}$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3 \quad \text{Eq. 3}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$\sigma_1$  = tensão confinante maior

$\sigma_3$  = tensão confinante menor (hidrostática)

$q$  = tensão desvio

A partir dos parâmetros descritos acima, será construído o gráfico  $p' \times q$  e o gráfico  $p' \times \Delta e$  para análise dos resultados, no capítulo a seguir.

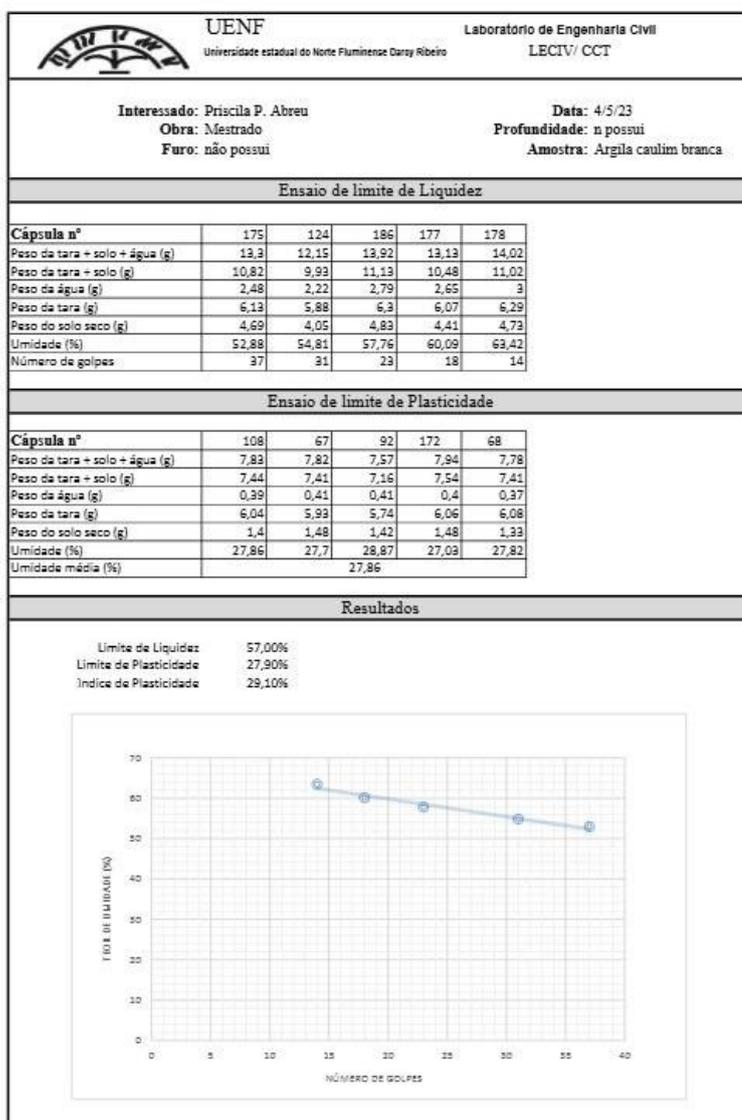
## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 Caracterização da argila caulim branca

O resultado apresentado a seguir é uma imagem diretamente da ficha utilizada no laboratório de solos da Universidade UENF para a realização dos ensaios.

- Índices de Atterberg: Limite de liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Índice de Plasticidade (IP) e Índice de Consistência (IC):

Figura 30 — Resultados para os limites de Atterberg para o material caulim branca



Fonte: O autor (2024).

- Densidade dos grãos (Gs):

Figura 31 — Resultado para a densidade dos grãos para o material caulim branca

		<b>UENF</b> <small>Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro</small>		<small>Laboratório de Engenharia Civil</small> <b>LECIV/ CCT</b>							
<b>Interessado:</b> Priscila P. Abreu <b>Obra:</b> Mestrado <b>Furo:</b> não possui			<b>Data:</b> 4/5/23 <b>Profundidade:</b> n possui <b>Amostra:</b> Argila caulim branca								
Ensaio de Densidade dos Grãos											
<b>Picnômetro (n°)</b>	9	25	27	<table border="1" style="float: right;"> <tr> <td><b>Umidade Natural (%)</b></td> <td>91,03</td> </tr> <tr> <td><b>Umidade higroscópica (%)</b></td> <td>87,53</td> </tr> <tr> <td><b>Densidade dos grãos (g/cm³)</b></td> <td>2,6116</td> </tr> </table>		<b>Umidade Natural (%)</b>	91,03	<b>Umidade higroscópica (%)</b>	87,53	<b>Densidade dos grãos (g/cm³)</b>	2,6116
<b>Umidade Natural (%)</b>	91,03										
<b>Umidade higroscópica (%)</b>	87,53										
<b>Densidade dos grãos (g/cm³)</b>	2,6116										
Volume nominal do frasco (ml)	100	100	100								
T - Temperatura (°C)	32	31	30								
Wfa - peso do frasco + água	157,95	157,98	158,91								
Ws - peso do solo	3,9	3,9	3,9								
Wfas - peso do frasco + água + solo	160,37	160,39	160,42								
ws = Wfas - Wfa	1,48	1,49	1,49								
Gst (ábaco)	0,994957	0,995301	0,995646								
Densidade dos grãos (Gs)	2,6613	2,6122	2,6096								
Densidade relativa dos grãos	2,6177	2,6169	2,6143								
Média da densidade dos grãos (Gs)	2,6116 g/cm³										
Média da densidade relativa dos grãos (Gsr)	2,62										

Fonte: O autor (2024).

## 7.2 Envoltória de resistência para a argila CAULIM BRANCA

Para a realização dos ensaios para a envoltória de resistência, foi calculada a velocidade de cisalhamento ideal para cada tensão efetiva a partir da curva de adensamento mecânico isotrópico a 100, 200 e 400 KPa no equipamento triaxial convencional da centrífuga geotécnica – UENF especificada no item 6.4 deste trabalho.

Primeiramente foi estimado um período de 5 horas para 90% (T90) do adensamento mecânico para cada tensão confinante acima mencionado conforme descrito no item 6 (metodologia) e foi realizado os ensaios. Após o término da etapa de consolidação, foi analisada imediatamente a curva de adensamento antes de prosseguir com a ruptura, calculando assim a velocidade ideal para cada tensão confinante, que será detalhado a seguir.

A tabela 3 abaixo, mostra as condições dos ensaios para as tensões confinantes da envoltória de resistência acima mencionado que foram configuradas no sistema do equipamento triaxial convencional:

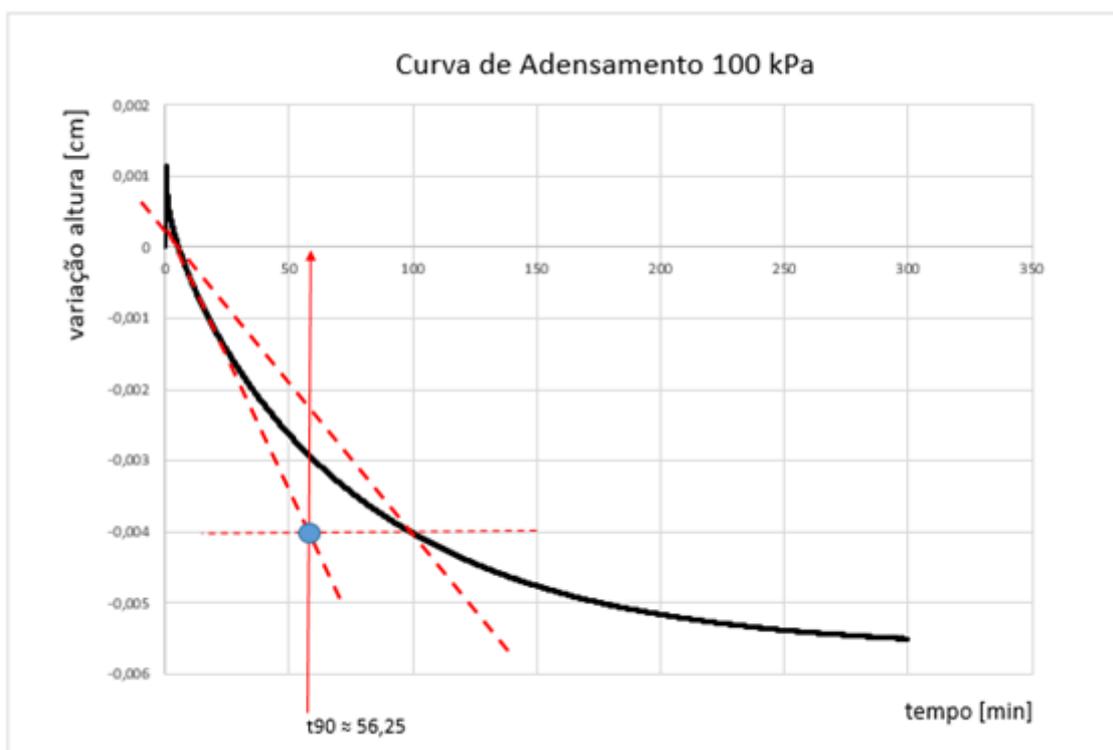
Tabela 3 — Condições para o ensaio de adensamento para as tensões efetivas da envoltória de resistência.

Etapa	Tensão Efetiva (kPa)	Tempo	Tensão confinante (kPa)	Contrapessão (kPa)
Saturação	100, 200, 400	3 horas	200	190
Consolidação	100	5 horas	190	190
	200	5 horas	390	190
	300	5 horas	590	190

Fonte: O autor (2024).

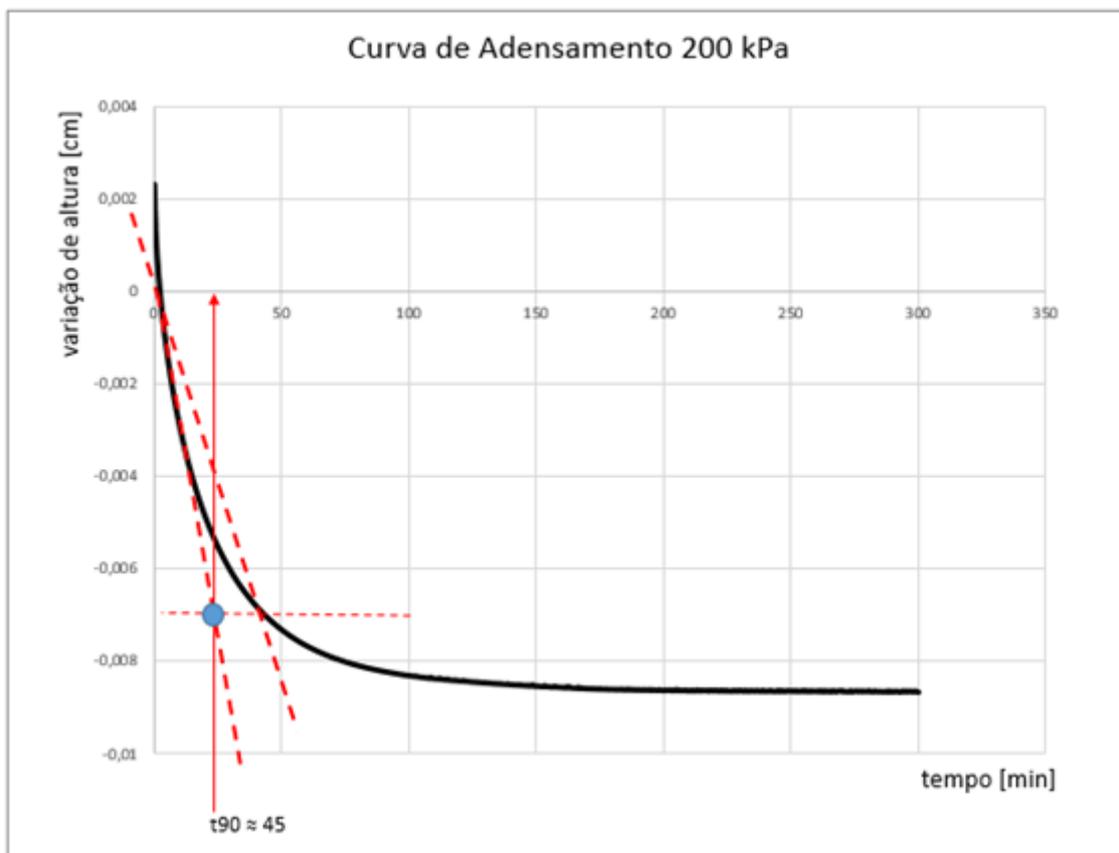
A seguir será ilustrada as curvas de adensamento para as tensões efetivas de 100,200 e 400 kPa e a determinação do  $t_{90}$ :

Figura 32 — Curva de adensamento e determinação do  $t_{90}$  para a tensão efetiva de 100 kPa.



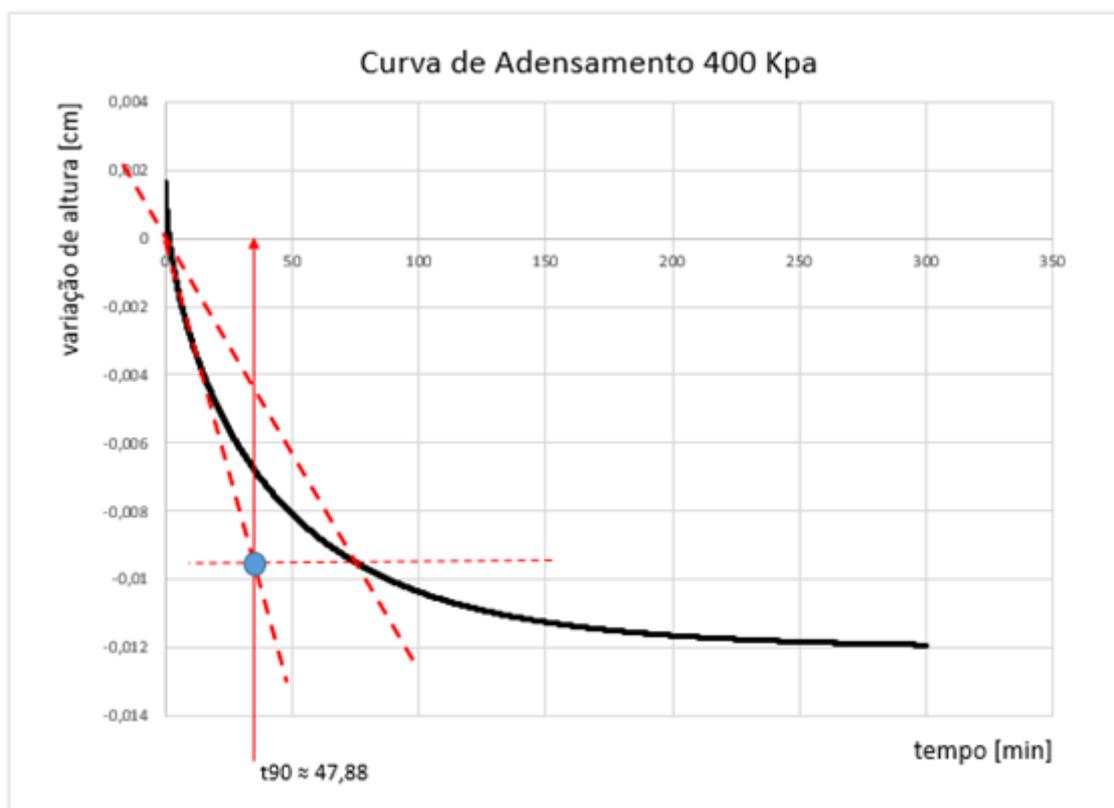
Fonte: O autor (2024).

Figura 33 — Curva de adensamento e determinação do  $t_{90}$  para a tensão efetiva de 200 kPa.



Fonte: O autor (2024).

Figura 34 — Curva de adensamento e determinação do  $t_{90}$  para a tensão efetiva de 400 kPa.



Fonte: O autor (2024).

A partir dos resultados acima, pode-se afirmar que em 5 horas da etapa de consolidação no equipamento triaxial convencional, é garantido o adensamento de 90% pelo método de Taylor para as tensões efetivas de 100, 200 e 400 kPa, sem que haja o adensamento secundário.

A seguir será ilustrado na tabela 4 os resultados dos parâmetros para o cálculo do tempo de ruptura e a velocidade de cisalhamento mínima para as tensões efetivas de 100, 200 e 400 kPa:

Tabela 4 — Resultado para o cálculo do tempo de ruptura e velocidade de cisalhamento para as tensões efetivas da envoltória.

Tensão Efetiva	$t_{90}$ (min)	$h_{90}$ (mm)	$C_v$ (mm <sup>2</sup> /min)	$T_f$ (min)	Velocidade de cisalhamento mínima
100	56,25	0,004	22,91	131,46	0,12 mm/min
200	45,00	0,0065	28,64	105,16	0,15 mm/min
400	47,88	0,0095	26,92	111,88	0,14 mm/min

Fonte: O autor (2024).

Portanto, para a envoltória de cisalhamento foram executados os ensaios com a velocidade de cisalhamento de 0,2mm/min. A seguir na tabela 5 serão ilustrados os resultados para a envoltória de resistência:

Tabela 5 — Parâmetros de resistência para argila caulim

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA				
BLOCO 1	Tensão Confinante ( $\sigma_3$ ) kPa	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (kPa)	Tensão desviadora ( $\Delta \sigma$ ) máx (kPa)	Resistencia não Drenada ( $S_u$ ) máx (kPa)
	100	55,72	69,29	34,65
	200	107,27	111,97	55,99
	400	195,77	281,18	140,59
M	0,82			
$\phi'$	29,27 °			

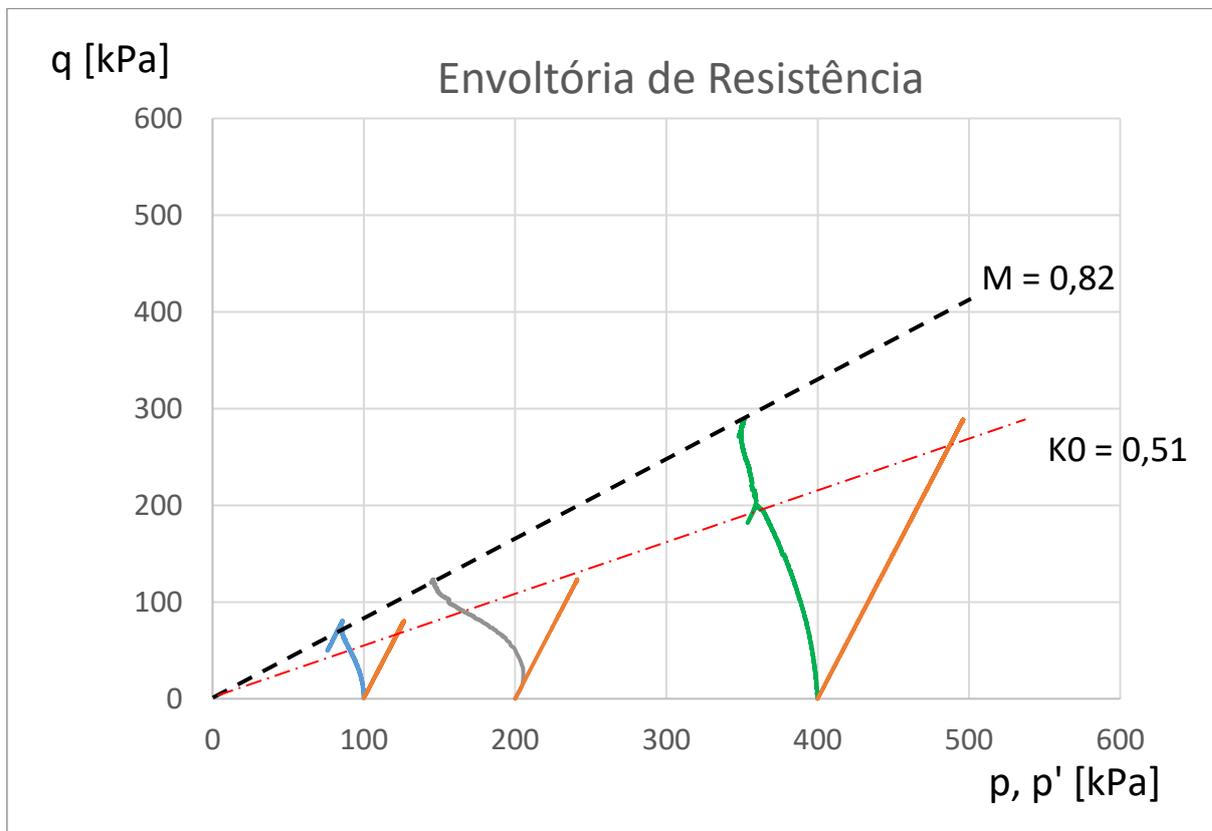
Fonte: O autor (2024).

Tabela 6 — Parâmetros de ensaio para envoltória de resistência para argila caulim

PARÂMETROS DE ENSAIO						
ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA						
BLOCO 1	Tensão Confinante	SATURAÇÃO		ADENSAMENTO MECÂNICO		
		Parâmetro B	Parâmetro A	Índice de vazios (e) inicial	Umidade (h%) inicial	Índice de vazios (e) final
	100 kPa	0,998	0,80	1,15	0,545	0,97
	200 kPa	0,999	0,96	1,12	0,568	0,8
	400 kPa	1,002	0,70	1,13	0,504	0,63
CISALHAMENTO						
BLOCO 1	Tensão Confinante	Umidade (h%) final	Porosidade (n %)	Índice de vazios (e) final	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) g/cm <sup>3</sup>	
	100 kPa	0,420	58,42	0,97	1,03	
	200 kPa	0,595	58,26	0,81	1,04	
	400 kPa	0,522	58,06	0,63	1,06	

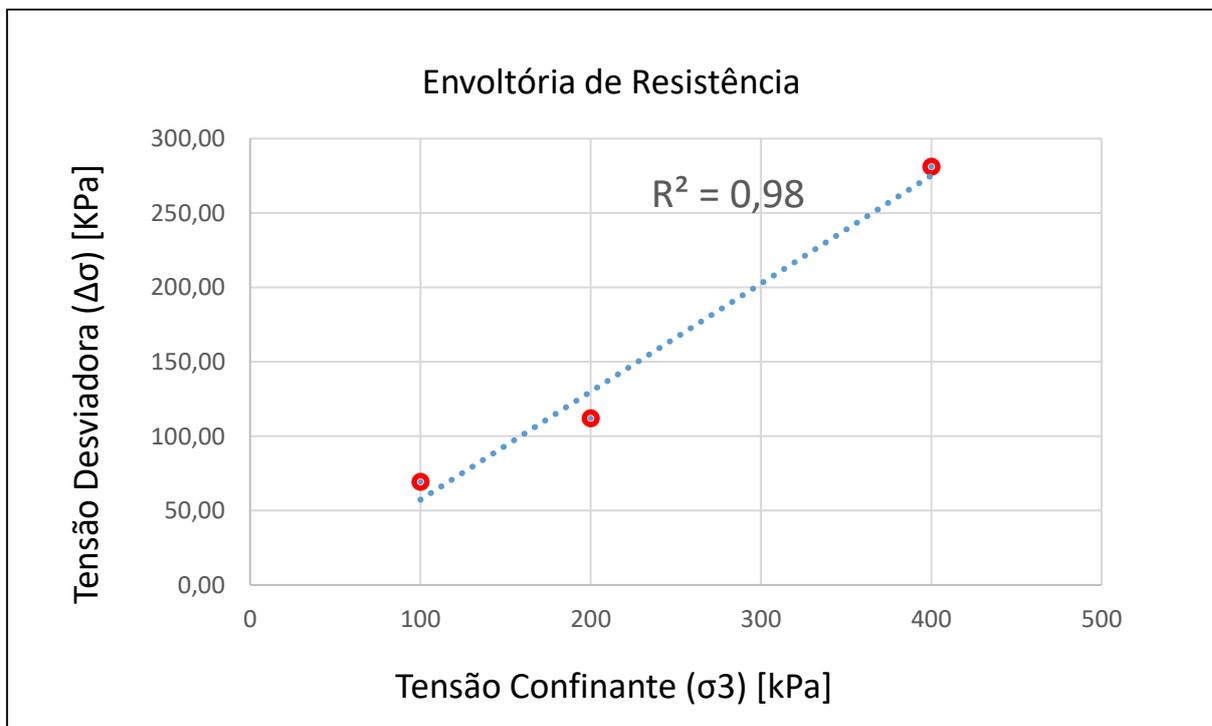
Fonte: O autor (2024).

Figura 35 — Envoltória de resistência para argila caulim branca



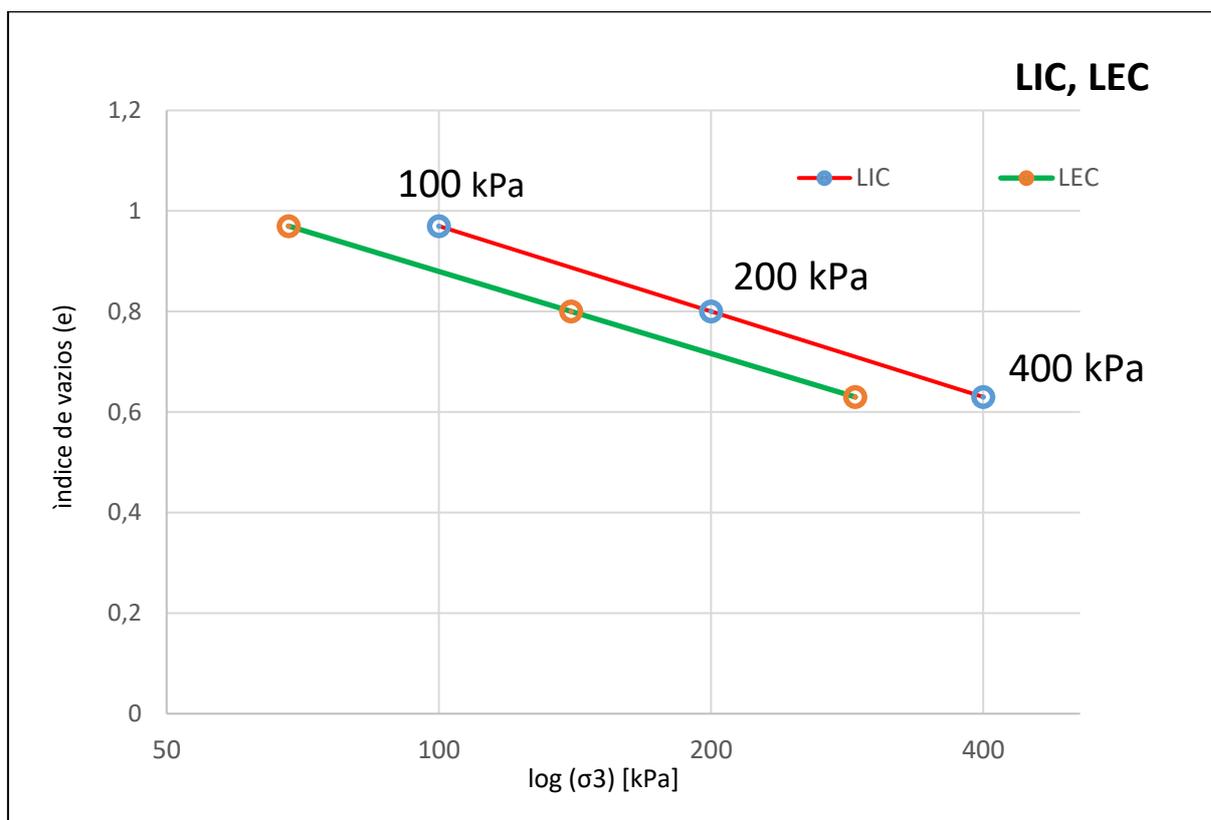
Fonte: O autor (2024).

Figura 36 — Envoltória de resistência para argila caulim



Fonte: O autor (2024).

Figura 37 — LIC e LEC para envoltória de resistência para argila Caulim



Fonte: O autor (2024).

### 7.3 Resultados para os ensaios triaxiais com variação de velocidade de cisalhamento

#### 7.3.1 Resultados para os ensaios triaxiais na temperatura ambiente (23°C) com variação da velocidade de cisalhamento

Para analisar o comportamento de argila mole ao estado térmico, é necessário fazer a análise do seu comportamento no estado de temperatura ambiente (23°C) para fazer a respectiva comparação entre si. Os dados da tabela a seguir, foram calculados depois que extrair cada CP do equipamento Triaxial Convencional, descrito no item 6.4:

Pode – se observar a partir dos resultados acima, a semelhança dos índices de cada CP que garante maior precisão na análise do comportamento mecânico da argila sob efeitos da variação de temperatura. A tabela 8 a seguir mostra os resultados dos parâmetros de resistência resultante dos ensaios na temperatura ambiente (23°C):

Tabela 7 — Parâmetros de ensaio na temperatura 23°C

PARÂMETROS DE ENSAIO						
TEMPERATURA AMBIENTE						
BLOCO 2	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	SATURAÇÃO			ADENSAMENTO	
		Umidade (h%) inicial	Parâmetro B	Parâmetro A	Índice de vazios (e) inicial	Índice de vazios (e) final
	0,02	0,587	0,998	0,951	1,122	0,792
	0,2	0,614	1,005	0,774	1,301	0,801
	2	0,598	0,999	0,657	1,331	0,804
20	0,597	0,997	0,422	1,142	0,810	
CISALHAMENTO						
BLOCO 2	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	Umidade (h%) final	Índice de vazios (e) final	Porosidade (n %)	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) g/cm <sup>3</sup>	
	0,02	0,535	0,792	57,13	1,08	
	0,2	0,555	0,801	58,46	1,04	
	2	0,505	0,804	58,06	1,05	
	20	0,525	0,810	57,48	1,07	

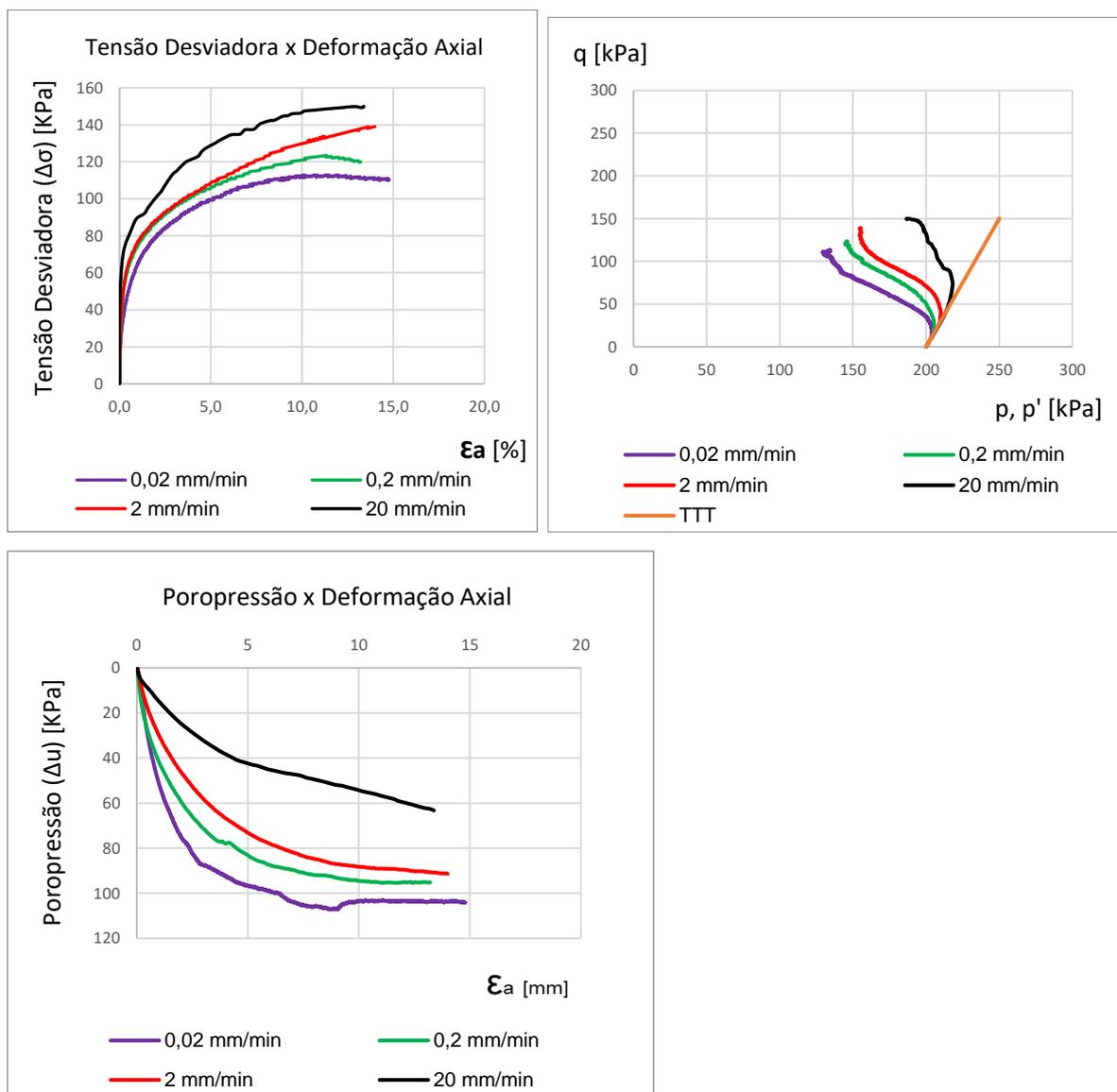
Fonte: O autor (2024).

Tabela 8 — Parâmetros de resistência dos ensaios na temperatura 23°C

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA					
TEMPERATURA AMBIENTE					
BLOCO 2	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora ( $\Delta\sigma$ ) máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ ) máx (kPa)	Resistência viscosa (V) kPa
	0,02	107,27	112,79	56,40	8,74
	0,2	95,52	123,42	61,71	14,02
	2	91,39	139,04	69,52	27,29
	20	63,28	150,03	75,02	40,37

Fonte: O autor (2024).

**Figura 38 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C**



Fonte: O autor (2024).

Com os resultados apresentados na tabela 8 pode-se determinar a trajetória de tensões efetivas (TTE) e a trajetória de tensões totais (TTT) dos ensaios na temperatura ambiente (TA°C). O caminho de tensões efetivas de um CP é observado em um gráfico bidimensional onde o eixo da abcissa é representada pela variável da tensão media efetiva ( $p'$ ) e o eixo das ordenadas pela variável da tensão desviadora ( $q$ ). As variáveis  $p'$  e  $q$  foram determinadas pelas equações 3 e 4 do item 6.4.2 deste trabalho.

A seguir será apresentado os resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C:

Para o estudo da influência da velocidade de cisalhamento na resistência não drenada, objetivo desta pesquisa, o resultado acima foi plotado correspondente ao modelo proposto por Martins (2021) e o resultado dos ensaios do Mecca (2004), onde facilita a observação do acréscimo da resistência não drenada (SU) e uma maior resistência viscosa (V) em comparação do incremento da velocidade de cisalhamento entre os ensaios.

Segundo os autores, baseado nas pesquisas de Taylor (1948) e Terzaghi (1941), a resistência ao cisalhamento é a soma da parcela viscosa com a parcela de atrito, onde a primeira acompanha a TTT até um certo ponto e depois retoma a sua trajetória até a ruptura tornando - a única. Os autores definiram que quanto maior a velocidade de cisalhamento, maior a resistência não drenada (Su) e maior a resistência viscosa (Y), e também definiram que a TTE segue pela direita conforme o acréscimo de velocidade de cisalhamento.

O resultado da trajetória de tensões totais e efetivas (TTT e TTE) apresentado acima (figura 38), está conforme aos modelos propostos pelos autores descrito acima, pois com o incremento de velocidade de cisalhamento, ocorreu um acréscimo na resistência não drenada e um acréscimo na resistência viscosa onde os valores foram apresentados na tabela 9. A TTE seguiu para a direita no incremento da velocidade e a TTT foram coincidentes para todos os ensaios, tornando somente uma, conforme a definição dos autores. Os valores da resistência não drenada e da resistência viscosa, podem ser melhor observados na tabela 8, apresentada anteriormente.

Através do resultado obtido e pesquisas sobre o tema, pode – se interpretar, diante das afirmações dos autores, que nos primeiros momentos de incremento de carga em um ensaio, em um curto período de tempo, quem responde de imediato é a parcela viscosa que está ligada à viscosidade da água adsorvida da estrutura da argila, e esta resistência segue até no momento de “quebra” desta estrutura chamado de estado de equilíbrio, prevalecendo então a resistência de atrito entre os grãos, até a sua máxima, chegando à ruptura. (Terzaghi, 1941; Taylor 1948; Martins 2021).

Em relação à poropressão, Mecca (2004), obteve nos resultados da sua pesquisa, valores decrescentes de poropressão com o incremento da velocidade de

cisalhamento, enquanto Godoy (2022) apresentou um modelo afirmando que o valor do incremento de poropressão é único para qualquer acréscimo de velocidade de cisalhamento entre os ensaios, havendo uma divergência no modelo apresentado por Godoy (2022) com o resultado obtido pelo Mecca (2004) quanto ao incremento de poropressão.

Entretanto o resultado apresentado acima para o incremento de poropressão na figura 38, é correspondente aos resultados obtidos pelo Mecca (2004) em que pode – se observar a partir deste, que houve um decréscimo dos valores do incremento de poropressão com o acréscimo da velocidade de cisalhamento entre os ensaios, podendo visualizar melhor os resultados na tabela 9 apresentada anteriormente.

No entanto, observa – se que o valor do incremento de poropressão do ensaio na velocidade de 0,02 mm/min, teve uma diferença considerável em relação ao ensaio na velocidade de 20 mm/min, reforçando ainda a possibilidade de controvérsia quanto a este parâmetro.

Quanto a tensão desviadora, os autores como Godoy (2022), Martins (2021) afirmaram a maior resistência não drenada com o acréscimo de velocidade nos seus modelos, assim como Mecca (2004) obteve este resultado em seu estudo.

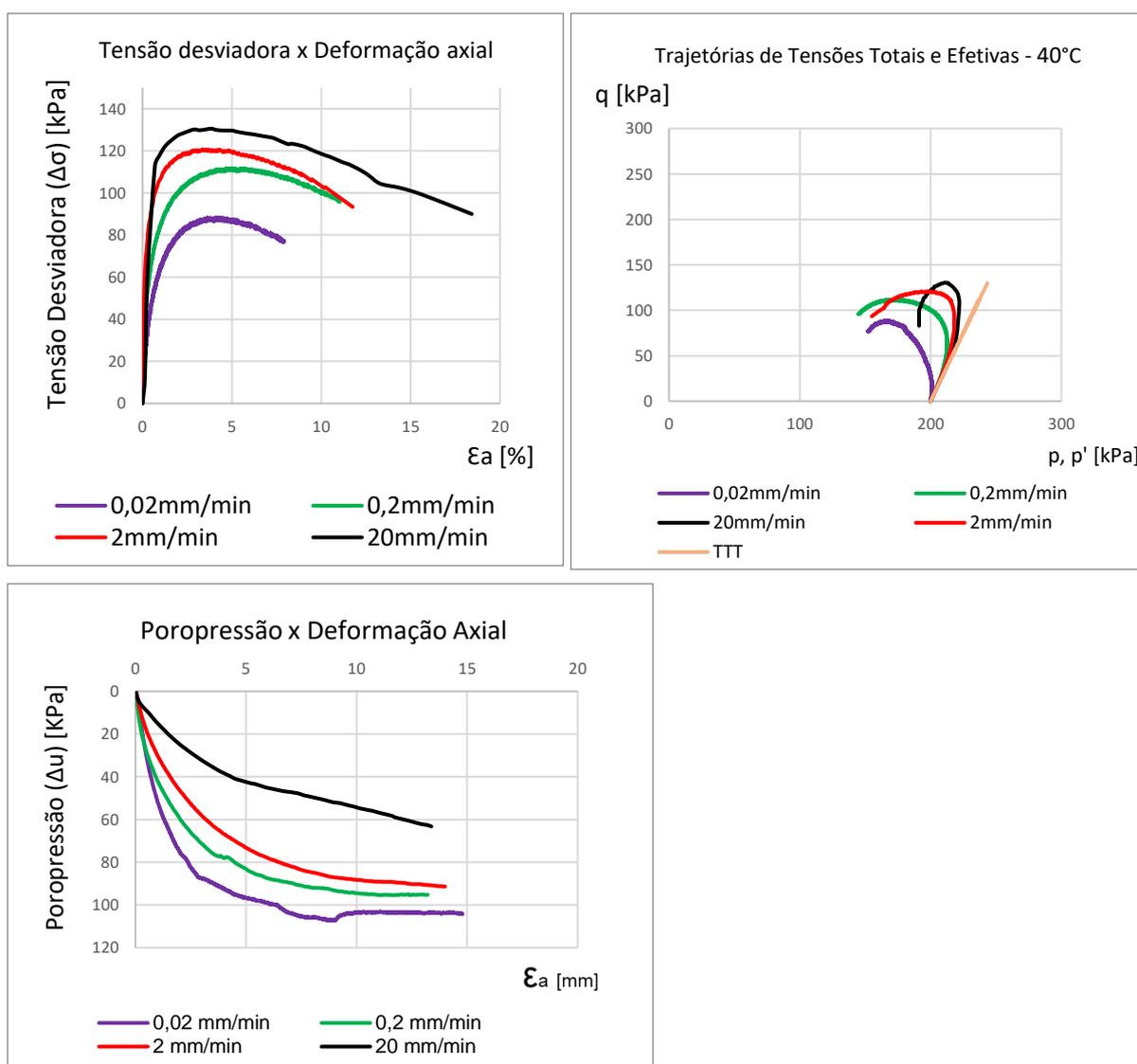
Referente a tensão desviadora, não se obteve nenhuma declaração entre os autores, podendo então interpretar conforme estudos pela literatura da mecânica dos solos, que com a maior resistência não drenada, automaticamente maior tensão desviadora. Isso pode ser comprovado com o resultado dos ensaios do Mecca (2004), que obteve maiores valores de tensão desviadora com o acréscimo de velocidade de cisalhamento como mencionado acima.

Portanto, o resultado apresentado na figura 38 acima, está conforme o resultado do Mecca (2004), obtendo assim maiores valores de tensão desviadora com o acréscimo de velocidade de cisalhamento entre os ensaios, podendo observar melhor os valores na tabela 9 apresentado anteriormente.

### 7.3.2 Resultados para os ensaios triaxiais térmicos na temperatura de 40°C com variação da velocidade de cisalhamento

A seguir serão apresentados os resultados para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento:

**Figura 39 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 40°C**



Fonte: O autor (2024).

Tabela 9 — Parâmetros de resistência para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA					
TEMPERATURA 40°					
BLOCO 2	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	Poropressão ( $\Delta u$ ) máx (Kpa)	Tensão desviadora ( $\Delta \sigma$ ) máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ ) máx (kPa)	Resistência viscosa (V) kPa
	0,02	73,36	88,80	44,40	0,39
	0,2	87,06	111,83	55,92	2,73
	2	74,08	120,79	60,40	6,96
	20	42,37	130,55	65,27	12,30

Fonte: O autor (2024).

A tabela 10 a seguir apresenta os parâmetros de ensaio para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento e em seguida a curva de tensão desviadora e deformação axial e poropressão x deformação axial:

Tabela 10 — Parâmetros de ensaio para a temperatura de 40°C com variação de velocidade de cisalhamento.

PARÂMETROS DE ENSAIO								
TEMPERATURA 40°								
BLOCO 3	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	SATURAÇÃO			ADENSAMENTO MECÂNICO		ADENSAMENTO TÉRMICO	
		Umidade (h%) inicial	Parâmetro B	Parâmetro A	Índice de vazios (e) inicial	Índice de vazios (e) final	Índice de vazios (e) inicial	Índice de vazios (e) final
	0,02	0,602	0,996	0,826	1,131	0,802	0,802	0,614
	0,2	0,598	0,998	0,778	1,122	0,798	0,798	0,597
	2	0,608	0,999	0,613	1,143	0,812	0,812	0,689
	20	0,612	0,999	0,325	1,123	0,795	0,795	0,598
BLOCO 3	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	CISALHAMENTO						
		Umidade (h%) final	Índice de vazios (e) final	Porosidade (n %)	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) g/cm <sup>3</sup>			
	0,02	0,585	0,614	57,26	1,03			
	0,2	0,589	0,597	57,46	1,05			
	2	0,596	0,689	57,18	1,09			
	20	0,591	0,598	57,86	1,07			

Fonte: O autor (2024).

Pode – se observar que os ensaios estão de acordo com as afirmações dos autores quanto a resistência não drenada e a velocidade de cisalhamento, ou seja, quanto maior a velocidade de cisalhamento, maior a resistência não drenada em que os valores da resistência não drenada se apresentam acrescidas com o incremento de velocidade de cisalhamento entre os ensaios de acordo com a tabela acima e a figura x. (Cogliatti (2011), Godoy (2022), Mecca (2004)).

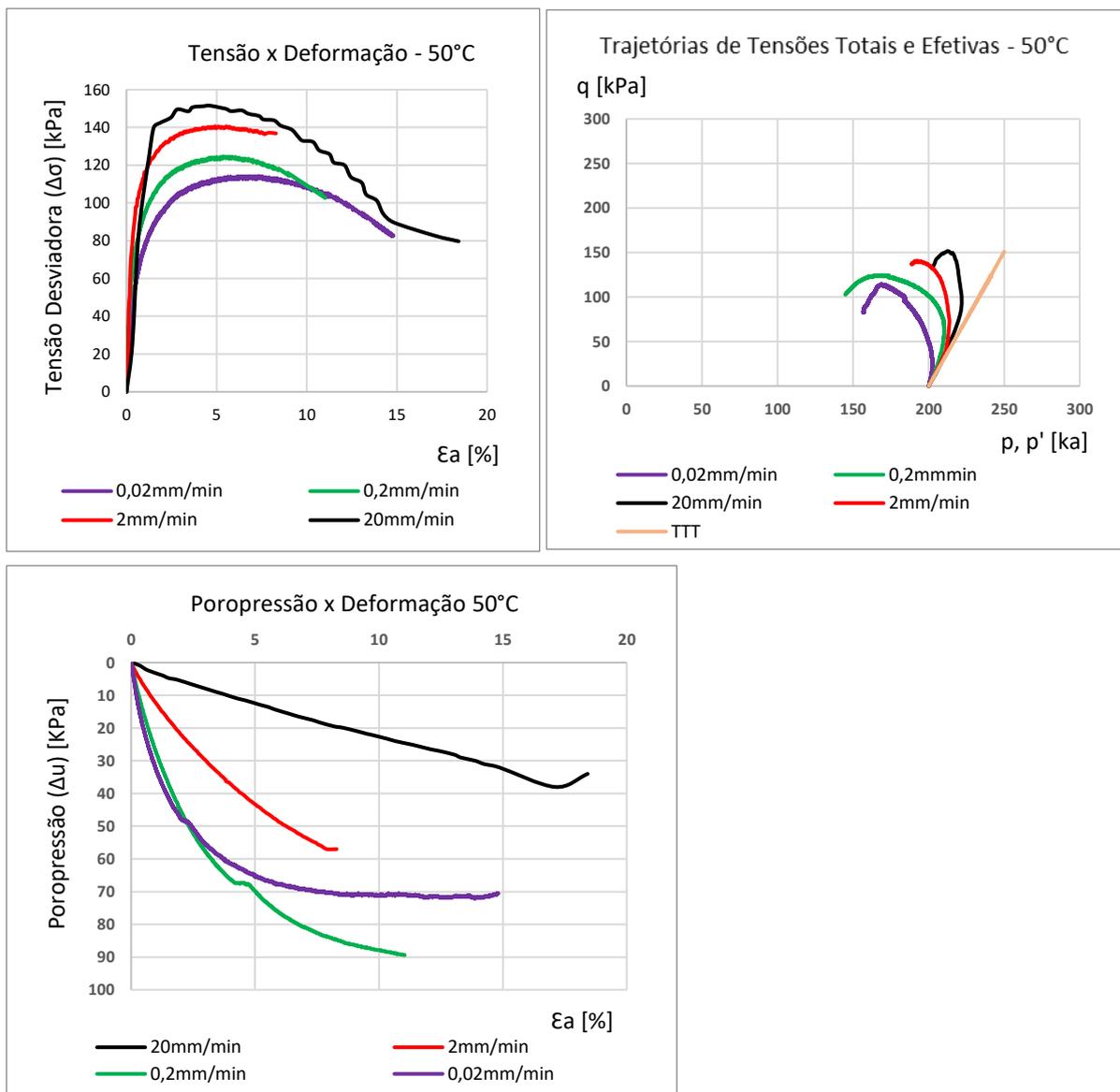
Na figura 39 anterior, foi observado que com acréscimos de velocidade de cisalhamento, maior tensão desviadora e automaticamente, maior resistência não drenada. (Cogliatti (2011), Godoy (2022), Mecca (2004)).

Quanto a poropressão, para a velocidade 0,2mm/min apresentou um incremento de poropressão maior que a velocidade de 0,02, ao contrário da temperatura ambiente, a qual apresentou um valor inferior à velocidade de 0,02mm/min. Como mencionado anteriormente na análise dos incrementos de poropressão na temperatura ambiente com a variação da velocidade de cisalhamento, há uma controversa em relação a este parâmetro, ou seja, este parâmetro não obedece a um padrão e os autores não indicaram o motivo desta variação entre os ensaios com acréscimo de velocidade de cisalhamento nos seus estudos.

### **7.3.3 Resultados para os ensaios triaxiais térmicos na temperatura de 55°C com variação da velocidade de cisalhamento**

A seguir serão apresentadas as trajetórias de tensões totais e efetivas para a temperatura de 55°C com variação de velocidade:

**Figura 40 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 55°C**



Fonte: O autor (2024).

Tabela 11 — Parâmetros de resistência para a temperatura de 55°C com variação de velocidade de cisalhamento.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA					
TEMPERATURA 55°C					
BLOCO 2	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora ( $\Delta \sigma$ ) máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ ) máx (kPa)	Resistência viscosa (V) kPa
	0,02	71,65	114,27	57,14	0,31
	0,2	89,42	124,60	62,30	1,20
	2	57,63	140,58	70,29	4,84
	20	38,04	151,54	75,77	10,24

Fonte: O autor (2024).

Tabela 12 — Parâmetros de ensaio para a temperatura de 55°C com variação de velocidade de cisalhamento.

PARÂMETROS DE ENSAIO									
TEMPERATURA 55°C									
BLOCO 4	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	SATURAÇÃO			ADENSAMENTO MECÂNICO		ADENSAMENTO TÉRMICO		
		Umidade (h%) inicial	Parâmetro B	Parâmetro A	Índice de vazios (e) inicial	Índice de vazios (e) final	Índice de vazios (e) inicial	Índice de vazios (e) final	
	0,02	0,6	0,999	0,627	1,141	0,815	0,815	0,500	
	0,2	0,614	0,999	0,718	1,123	0,791	0,791	0,490	
	2	0,602	0,999	0,410	1,132	0,805	0,805	0,498	
20	0,612	0,998	0,251	1,142	0,812	0,812	0,502		
BLOCO 4	Velocidade de cisalhamento (mm/min)	CISALHAMENTO							
		Umidade (h%) final	Índice de vazios (e) final	Porosidade (n %)	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) g/cm <sup>3</sup>				
	0,02	0,592	0,500	58,26	1,08				
	0,2	0,599	0,490	57,96	1,04				
	2	0,589	0,498	58,02	1,07				
20	0,595	0,502	58,43	1,05					

Fonte: O autor (2024).

Os resultados para as trajetórias de tensões totais e efetivas, a curva de Tensão desviadora e deformação axial, incremento de poropressão x deformação axial para a temperatura de 55°C como apresentados acima, seguiram o mesmo padrão dos resultados para a temperatura de 40°C obtendo maiores valores de resistência não drenada e resistência viscosa com o incremento de velocidade para cada ensaio, inclusive para a curva de poropressão que apresentou um valor maior de incremento de poropressão para a velocidade de 0,2mm/min em relação a velocidade de 0,02 que apresentou um valor menor.

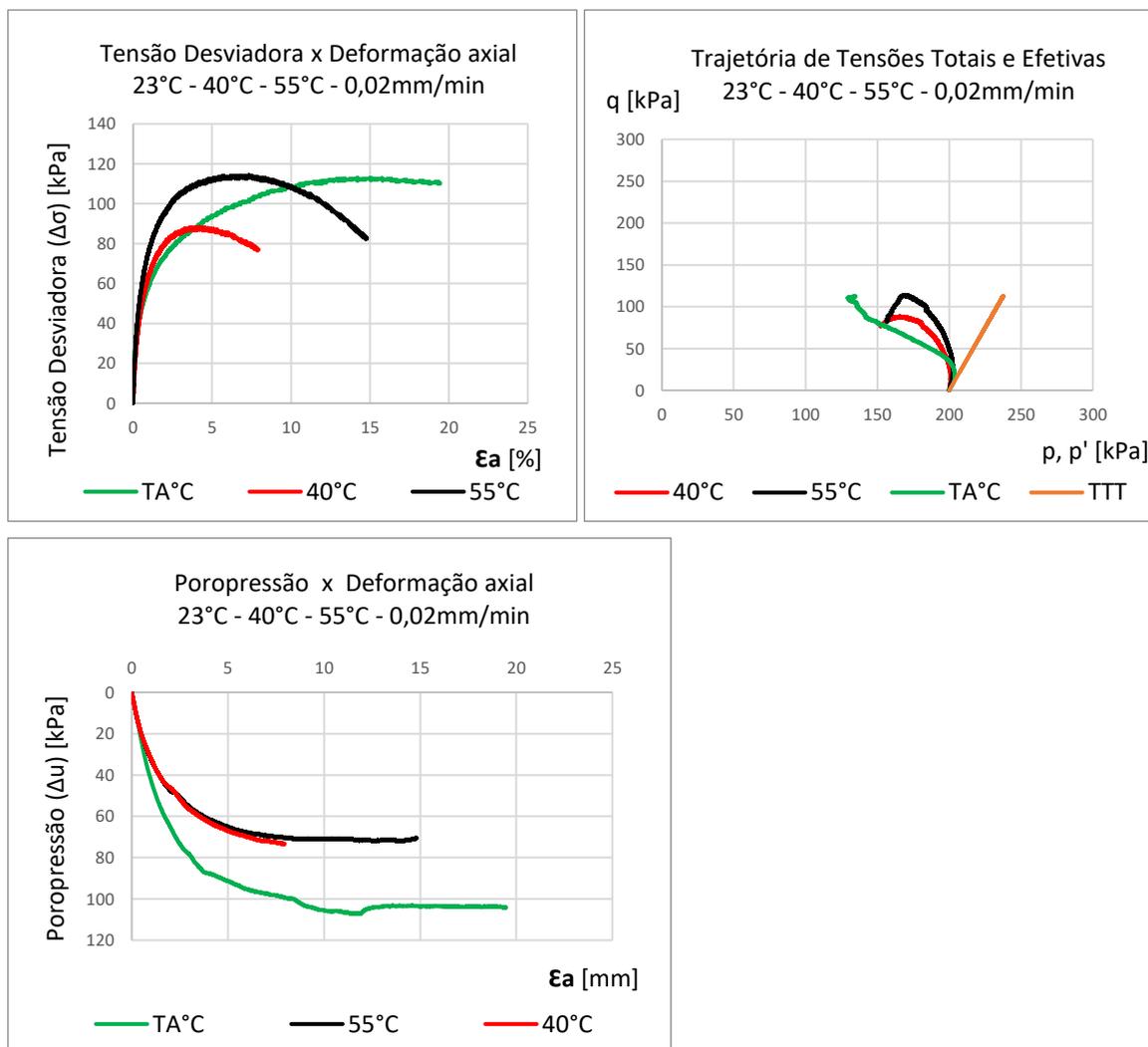
#### **7.3.4 Comparação dos resultados dos ensaios triaxiais com variação de temperatura entre 23°C, 40°C e 55°C**

Todos os ensaios a seguir apresentaram resultados de uma resistência máxima equivalente da temperatura de 55°C com a TA°C e uma resistência máxima menor da temperatura de 40°C com a TA°C para cada velocidade de cisalhamento. (Heckel e Baldi (1990); Laloui e Cekerevac (2004))

A seguir serão apresentadas as trajetórias de tensões efetivas e totais com suas respectivas velocidades em comparação com as temperaturas TA°C, 40°C e 55°C, curvas de tensão desviadora, poropressão e deformação e a envoltória de deformação para resistência máxima para cada temperatura.

#### **7.3.5 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 0,02mm/min com variação de temperatura**

**Figura 41 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 0,02mm/min.**



Fonte: O autor (2024).

**Tabela 13 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com 23°C na velocidade de 0,02mm/min.**

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
Velocidade de cisalhamento: 0,02mm/min				
Temperatura °C	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora( $\Delta\sigma$ )máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ )máx (kPa)	Resistência viscosa (V) (kPa)
23	107,27	112,79	56,40	8,74
40	73,36	88,80	44,40	0,39
55	71,65	114,27	57,14	0,31

Fonte: O autor (2024).

Diante do resultado da figura 41 acima, pode - se observar que a resistência máxima na temperatura de 23°C obteve um valor equivalente à da temperatura de 55°C enquanto nesta máxima da temperatura ambiente a deformação foi de 15,10% e na temperatura de 55°C foi de 4,60%, ou seja, a amostra apresentou mais rígida, com maior resistência em relação à temperatura de 23°C. As comparações nas tensões máximas nas temperaturas serão comparadas no item adiante.

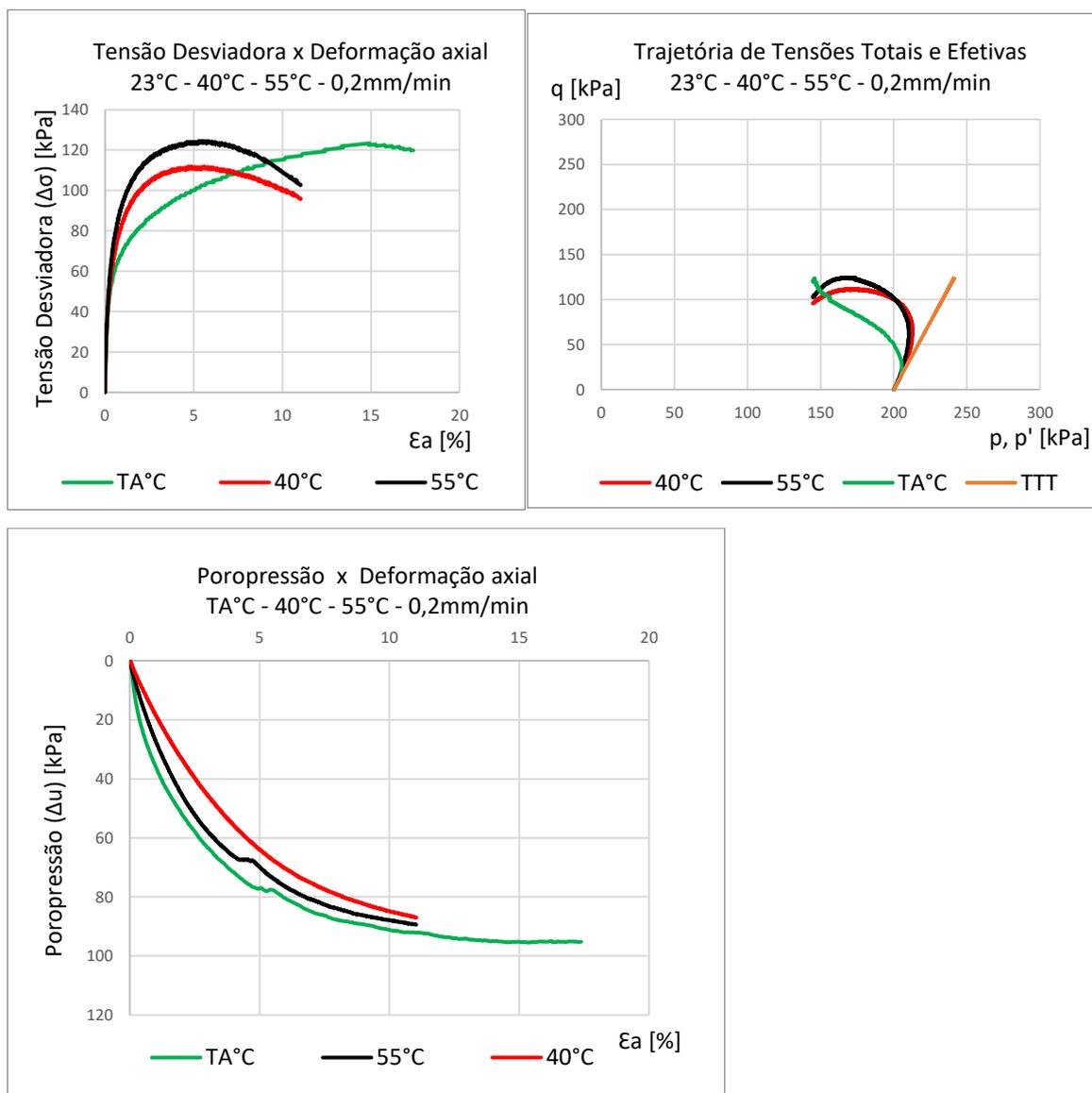
### 7.3.6 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 0,2mm/min com variação de temperatura

Tabela 14 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com TA°C. na velocidade de 0,2mm/min.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
Velocidade de cisalhamento: 0,2mm/min				
Temperatura °C	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora( $\Delta\sigma$ )máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ )máx (kPa)	Resistência viscosa (V) (kPa)
23	95,52	123,42	61,71	14,02
40	87,06	111,83	55,92	2,73
55	89,42	124,60	62,30	1,20

Fonte: O autor (2024).

**Figura 42 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 0,2mm/min.**

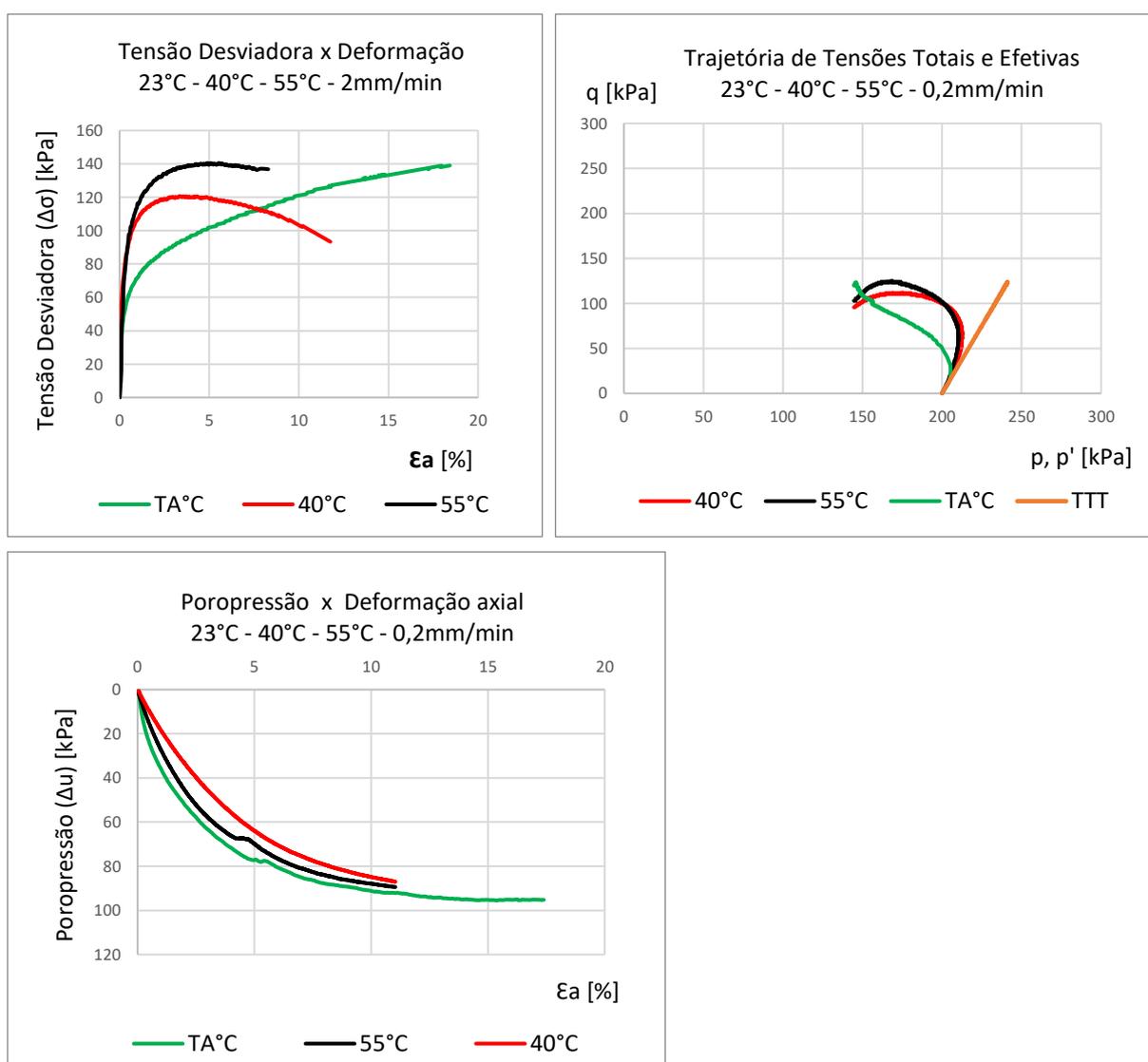


Fonte: O autor (2024).

Diante do resultado da figura 42 acima, pode - se observar que a resistência máxima na temperatura ambiente obteve um valor equivalente à da temperatura de 55°C enquanto nesta máxima da temperatura ambiente a deformação foi de 15,40% e na temperatura de 55°C foi de 5,30%, ou seja, a amostra apresentou mais rígida, com maior resistência em relação à temperatura de 23°C.

### 7.3.7 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 2mm/min com variação de temperatura

Figura 43 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 2mm/min.



Fonte: O autor (2024).

Tabela 15 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com TA°C na velocidade de 2mm/min.

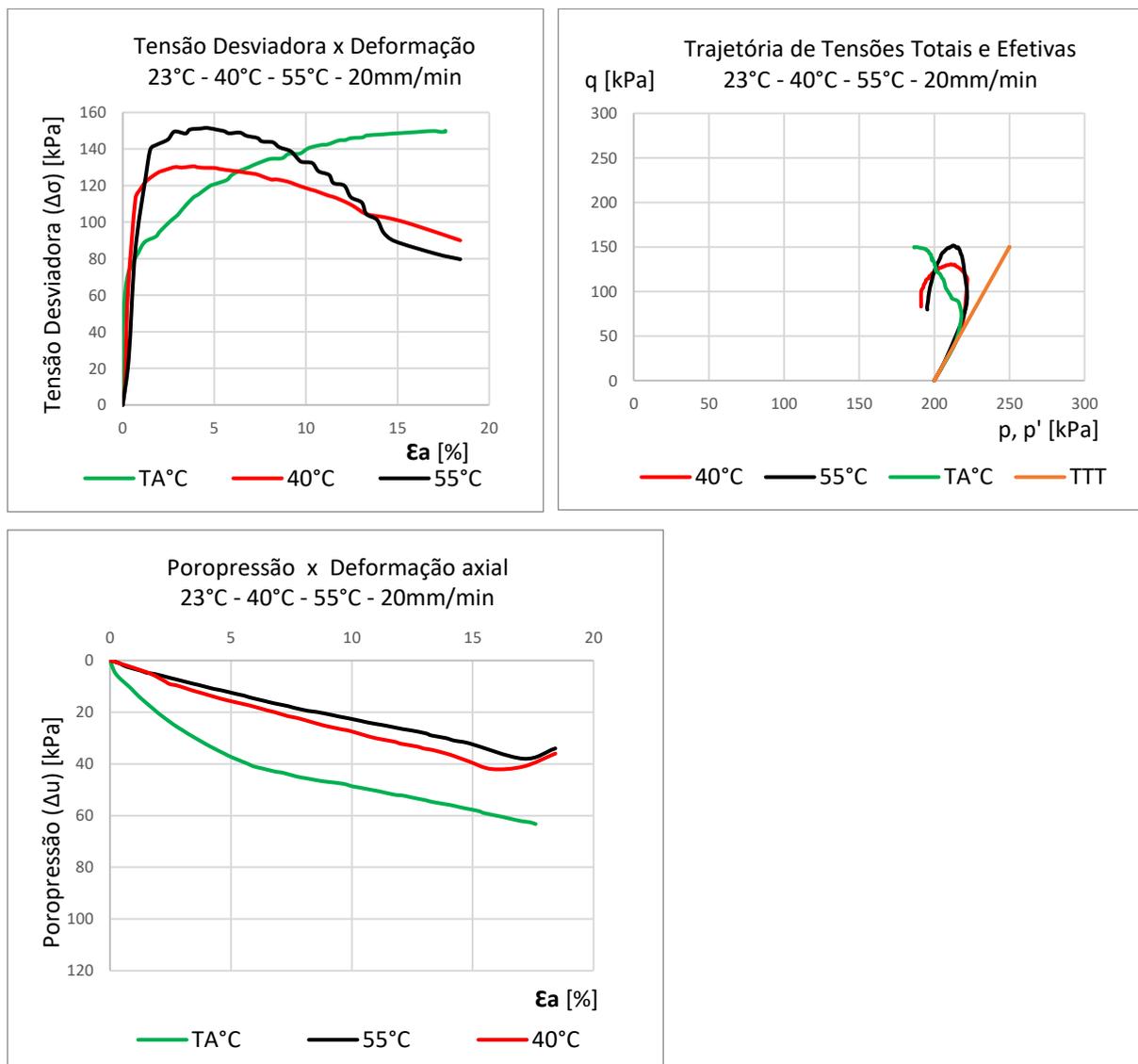
PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
Velocidade de cisalhamento: 2mm/min				
Temperatura °C	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora( $\Delta\sigma$ )máx (kPa)	Resistência não Drenada (Su)máx (kPa)	Resistência viscosa (V) (kPa)
23	91,39	139,04	69,52	27,29
40	74,08	120,79	60,40	6,96
55	57,63	140,58	70,29	4,84

Fonte: O autor (2024).

Diante do resultado da figura 43 acima, pode - se observar que a resistência máxima na temperatura ambiente obteve um valor equivalente à da temperatura de 55°C enquanto nesta máxima da temperatura ambiente a deformação foi de 18,40% e na temperatura de 55°C foi de 4,65%, ou seja, a amostra apresentou mais rígida, com maior resistência em relação à temperatura de 23°C.

### 7.3.8 Resultados para os ensaios triaxiais na velocidade de cisalhamento 20mm/min com variação de temperatura

**Figura 44 — Resultados para trajetórias de tensões efetivas, Tensão desviadora x deformação e poropressão e deformação para a temperatura de 23°C, 40°C e 55°C na velocidade de cisalhamento de 20mm/min.**



Fonte: O autor (2024).

**Tabela 16 — Resultados para os valores dos parâmetros de resistência das temperaturas 40 e 55°C em comparação com 23°C, na velocidade de 20mm/min.**

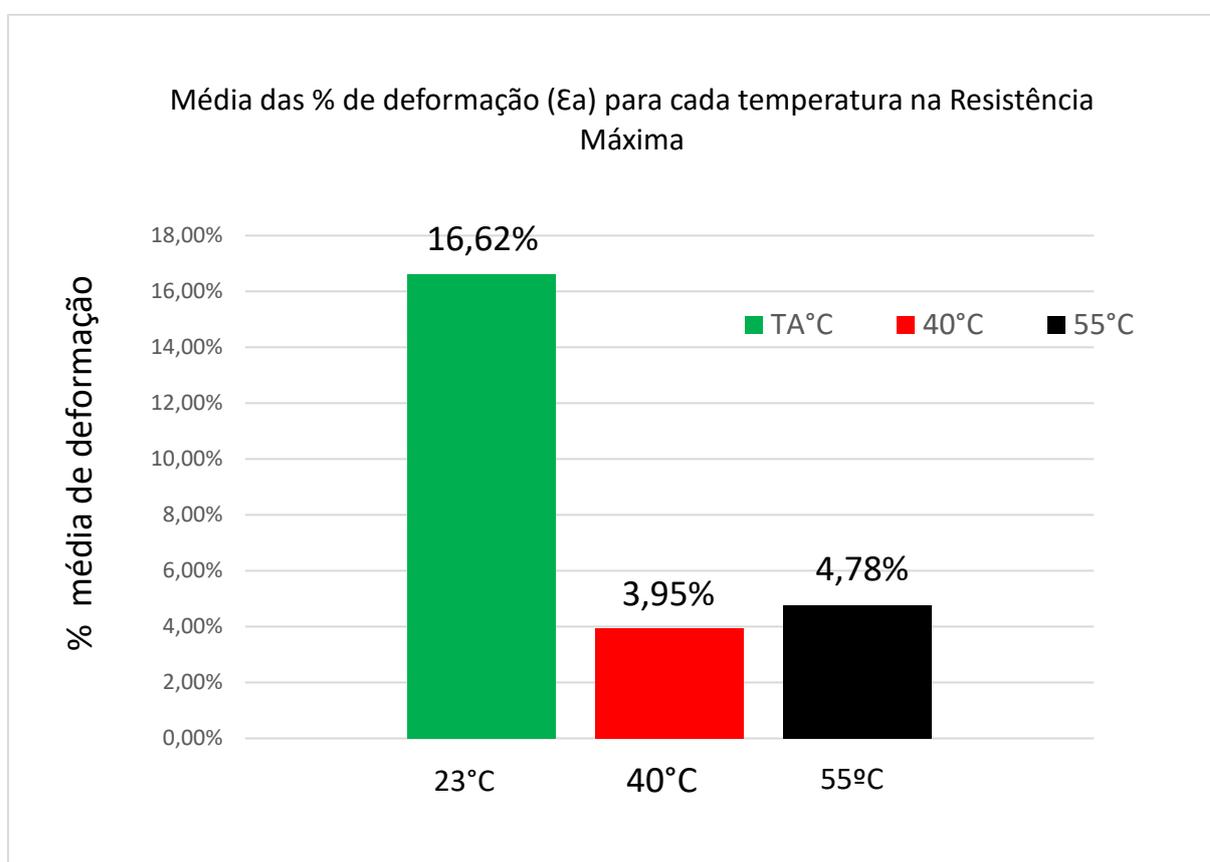
PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
Velocidade de cisalhamento: 20mm/min				
Temperatura °C	Poropressão ( $\Delta u$ ) max (Kpa)	Tensão desviadora( $\Delta\sigma$ )máx (kPa)	Resistência não Drenada ( $S_u$ )máx (kPa)	Resistência viscosa (V) (kPa)
23	63,28	150,03	75,02	40,37
40	42,37	130,55	65,27	12,30
55	38,04	151,54	75,77	10,24

Fonte: O autor (2024).

Diante do resultado da figura 44 acima, pode - se observar que a resistência máxima na temperatura ambiente obteve um valor equivalente à da temperatura de 55°C enquanto nesta máxima da temperatura ambiente a deformação foi de 17,60% e na temperatura de 55°C foi de 4,60%.

Observa - se que cada resistência máxima para cada velocidade obteve - se um valor médio assim como também para cada porcentagem de deformação nessas tensões. O gráfico a seguir mostra o valor médio para as resistências máximas em comparação com cada % de deformação ( $E_a$ ):

**Figura 45 — Porcentagem média de deformação ( $E_a$ ) para cada velocidade de cisalhamento para cada temperatura na resistência máxima para cada velocidade de cisalhamento**

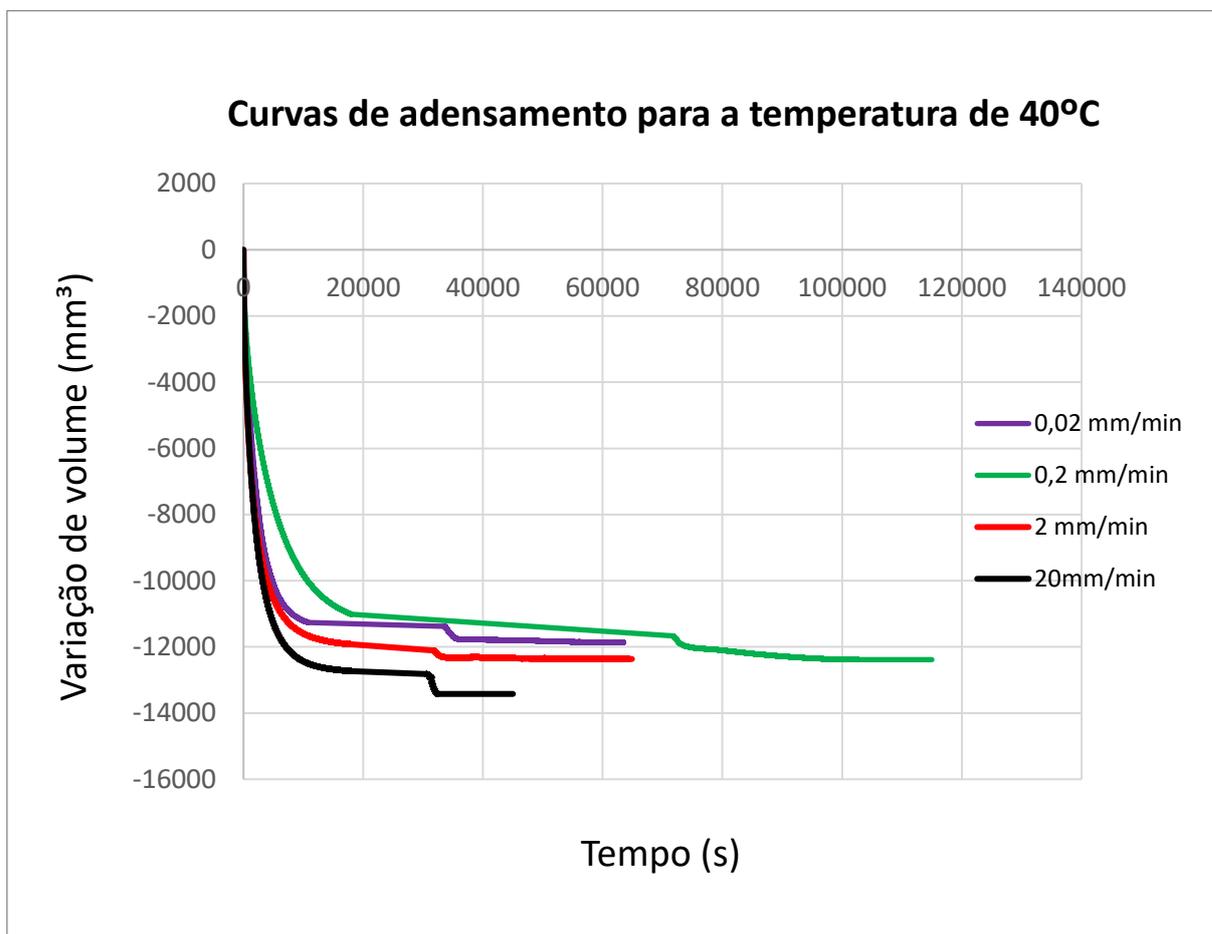


Fonte: O autor (2024).

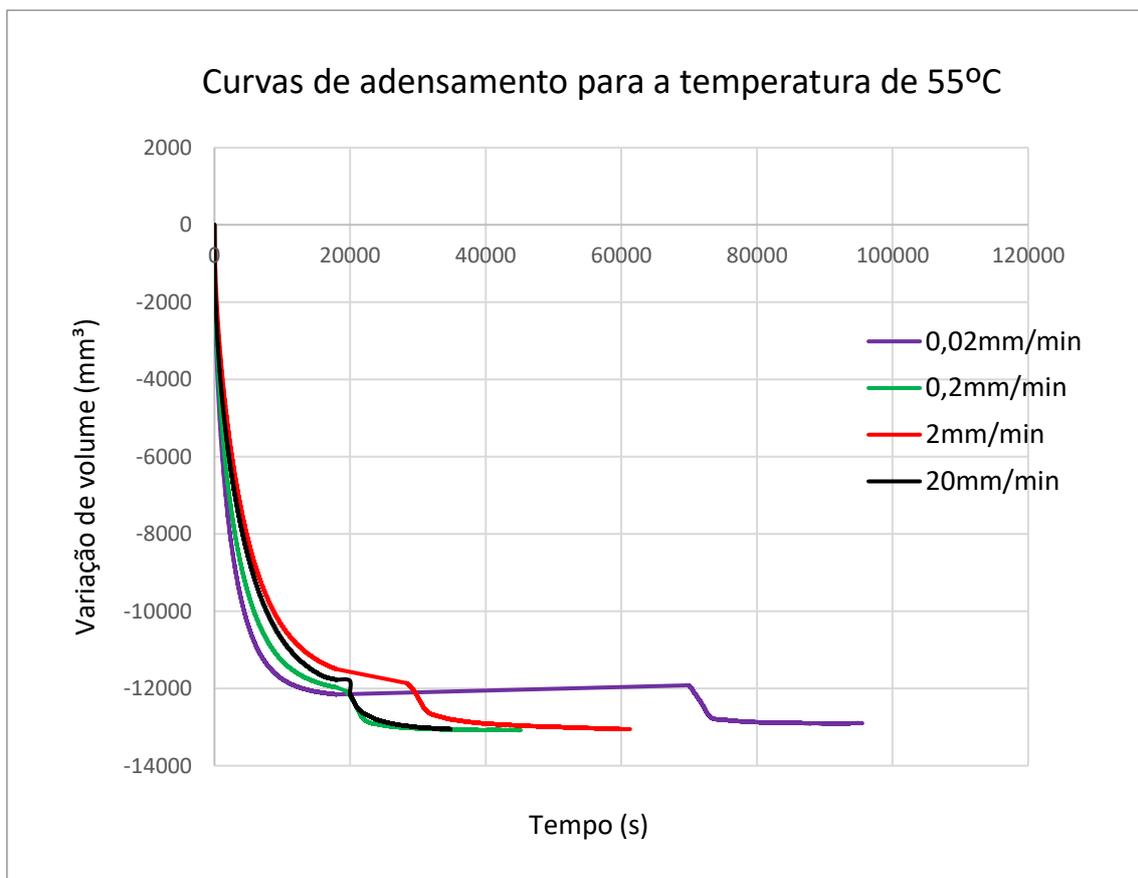
Observa - se que na temperatura ambiente para chegar ao valor médio de resistência máxima de 131,32KPa, as amostras tiveram que deformar em média de 16,62% ao contrário da temperatura de 55°C, que obteve um valor médio equivalente de resistência em menor porcentagem média de deformação (4,78%).

### 7.3.9 Curvas de adensamento

Figura 46 — Curva de adensamento para a temperatura de 40°C



Fonte: O autor (2024).

**Figura 47 — Curva de adensamento para a temperatura de 55°C**

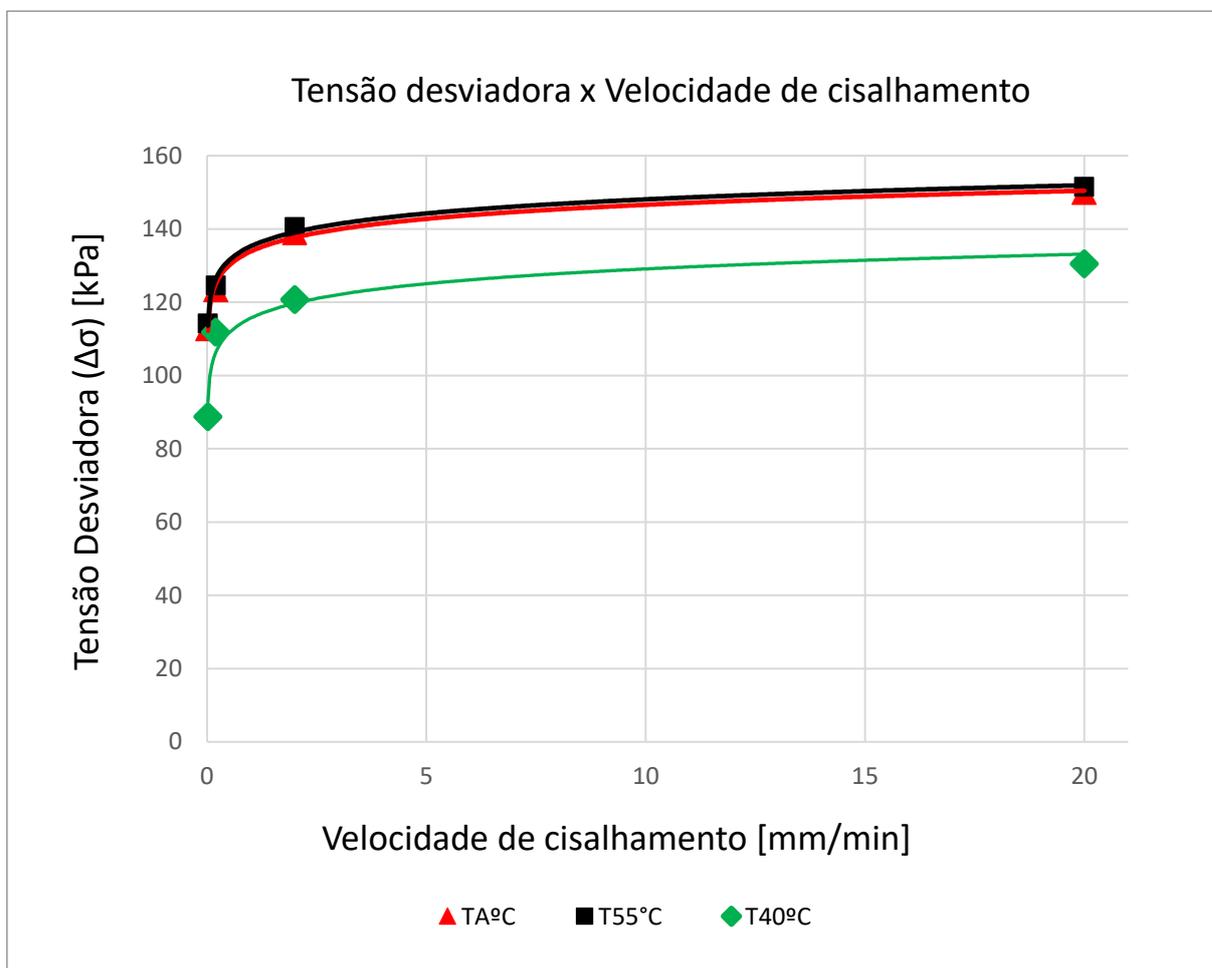
Fonte: O autor (2024).

Como na metodologia o adensamento para os acréscimos de temperatura foi em duas etapas, a curva após o adensamento na temperatura de 23°C comportou como um adensamento secundário.

### 7.3.10 Comparação dos resultados para os ensaios triaxiais com variação de temperatura e velocidade de cisalhamento

#### 7.3.10.1 Comparação entre Tensão máxima desviadora para cada temperatura e velocidade de cisalhamento

Figura 48 — Comparação da resistência ao cisalhamento em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento.

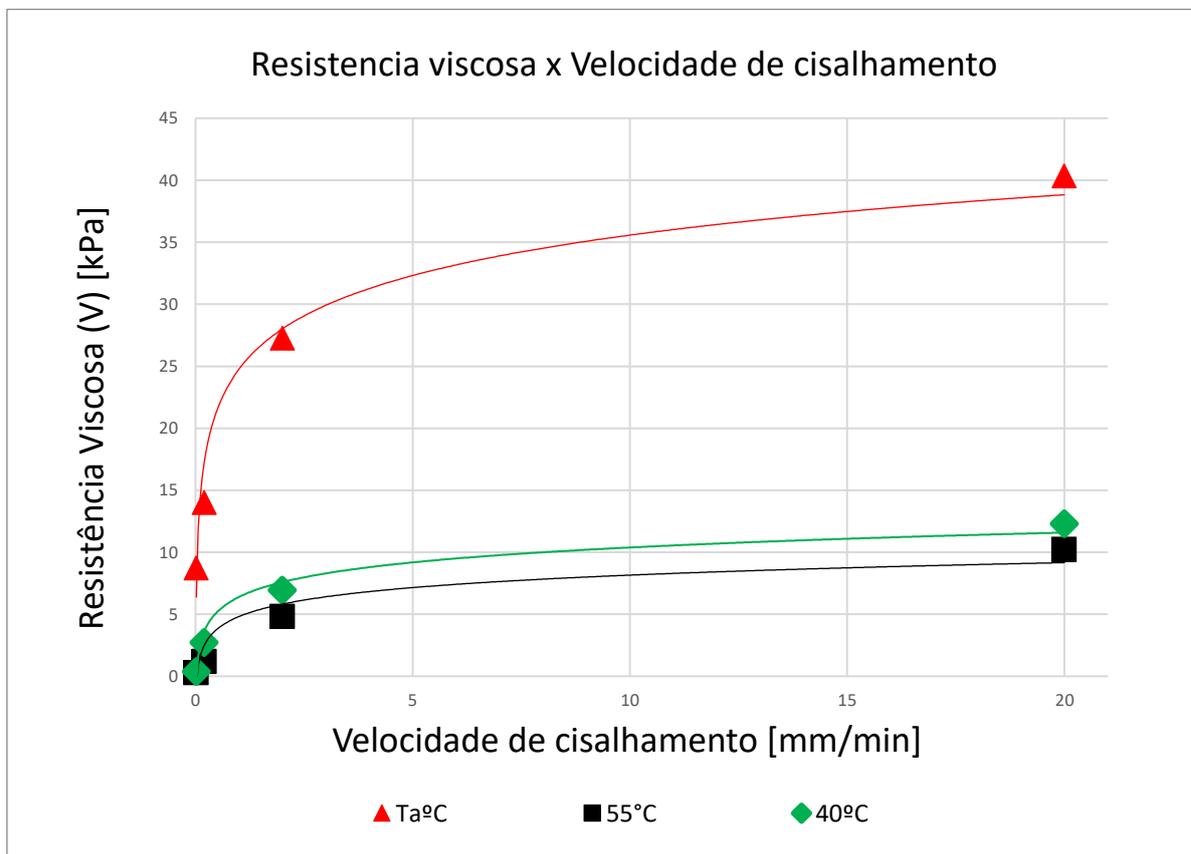


Fonte: O autor (2024).

As resistências não drenadas obtiveram um acréscimo médio de 11% para cada velocidade de cisalhamento proporcional para todas as temperaturas.

### 7.3.10.2 Comparação entre Resistência Viscosa para cada temperatura e velocidade de cisalhamento

Figura 49 — Comparação da resistência viscosa em relação às temperaturas e velocidade de cisalhamento.



Fonte: O autor (2024).

As resistências viscosas obtiveram um decréscimo médio de 80% da temperatura ambiente para as temperaturas de 45° e 55°C proporcional para todas as velocidades de cisalhamento.

## 8. CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados no capítulo anterior referente à metodologia apresentada, pode enumerar as seguintes conclusões:

1. A metodologia utilizada tais como os equipamentos para a moldagem dos corpos de provas garantiram uma semelhança entre os resultados dos parâmetros e propriedades dos ensaios, permitindo os resultados praticamente precisos.
2. Na envoltória de resistência, com o aumento da tensão confinante houve o aumento da resistência e um aumento nos valores de incremento de poropressão.
3. Para os ensaios na temperatura ambiente ( $TA^{\circ}C$ ) com variação de velocidade de cisalhamento, houve um acréscimo de resistência não drenada com incremento de velocidade de cisalhamento, assim como a poropressão também apresentou esse acréscimo para cada velocidade de cisalhamento.
4. Os ensaios na temperatura de  $40^{\circ}C$  apresentou menor resistência ao cisalhamento em relação a  $TA^{\circ}C$  e  $55^{\circ}C$  sendo essas ultimas a resistência ficaram equiparadas.
5. Para os ensaios nas temperaturas de  $40^{\circ}$  e  $55^{\circ}C$  com variação de velocidade de cisalhamento, houve um acréscimo de resistência não drenada com incremento de velocidade de cisalhamento para ambas, exceto a poropressão que houve um decréscimo entre a velocidade de 0,2 e 0,02 para as duas temperaturas.
6. As resistências não drenadas obtiveram um acréscimo médio de 11% para cada velocidade de cisalhamento proporcional para todas as temperaturas.

7. A resistência viscosa entre as temperaturas de 40°C e 55°C teve uma diminuição considerável referente a TA°C de 80%.
8. A resistência viscosa nos incrementos de velocidade de cisalhamento apresentou um aumento gradativo com os acréscimos, possuindo a maior velocidade, uma maior resistência viscosa.

- **SUGESTÕES PARA PROXIMOS TRABALHOS**

Sugere – se realizar mais de um ensaio para cada velocidade para a verificação da variação da poropressão e fazer a análise da variação da poropressão para cada um deles.

Sugere – se realizar o ensaio com uma temperatura mais alta e comparar as taxas de deformação com as temperaturas deste trabalho afim de verificar se houve maior deformação no adensamento em relação com a temperatura ambiente.

Sugere – se realizar os ensaios variando a velocidade em temperaturas menores que 23°C para verificar se a resistência viscosa é maior com a variação da velocidade de cisalhamento em relação as temperatura maiores.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABUEL-NAGA, H. M. et al. Thermomechanical model for saturated clays. *Géotechnique*, v. 59, n. 3, p. 273–278, 2009.

ABUEL-NAGA, H. M.; BERGADO, D. T.; LIM, B. F. Effect of Temperature on Shear Strength and Yielding Behavior of Soft Bangkok Clay. v. 47, n. 3, p. 423–436, 2007.

BAI, B.; GUO, L.; HAN, S. Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling. *Mechanics of Materials*, v. 75, p. 84–94, 2014.

BALDI, G; HUECKEL, T.; PELLEGRINI, R. “Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils.” *Canadian Geotechnical Journal*, v. 25, p. 807–825, 1988.

BALDI, G; HUECKEL, T.; PELLEGRINI, R. “Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils.” *Canadian Geotechnical Journal*, v. 25, p. 807–825, 1988.

BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*. v. 56(2), p. 81-122, 2006.

BRANDON, T.L.; MITCHELL, J.K. Factors Influencing the Thermal Resistivity of Sands. *Journal of Geotechnical Engineering*.ASCE, v. 115, No 12, p. 1683- 1689, 1989.

CAMPANELLA, G.; MITCHELL, K. Influence of temperature variations on soil behavior, 1968.

CARNEIRO, F. Adensamento unidimensional com fluxo radial considerando a viscosidade dos solos e a compressão secundária. Tese de Doutorado. UERJ, Universidade Estadual do Rio de Janeiro. 2019.

CEKEREVAC, C.; Laloui, L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of clay. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 2004; 28:209–228.

COGLIATI, B. Modelos viscosos em mecânica dos solos: análise de uma equação visco-hipoplástica -- ed.rev. – Universidade de São Paulo, SP, 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

COGLIATI, Belén. Modelos viscosos em mecânica dos solos: análise de uma equação visco-hipoplástica. Dissertação de mestrado. USP Universidade de São Paulo, 2011.

DE BRUYN, D.; THIMUS, J.-F. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: The results of an initial laboratory programme. *Engineering Geology*, v. 41, n. 1–4, p. 117–126, 1994.

DELAGE, P.; SULTAN, N.; CUI, J. On The Thermal Consolidation Of Boom Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, n. August, p. 343–354, 2000.

DUARTE, A.P. Avaliação das Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro - RJ, PUC-Rio. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.pucRio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=4794@1>> Acesso em 05 dez, 2022.

ESRIG, M. I. (1969). Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure. *Special Report*, (103), 23.

FAROUKI, O.T. (1981). Thermal properties of soils (No. CRREL-MONO-81-1). Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.

FERNANDES, E. et. Al. Argila bentonita: uma breve revisão das propriedades e aplicações. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 2, 2023.

FERREIRA, M. S. MODELAGEM FÍSICA DO MELHORAMENTO TÉRMICO DE FUNDAÇÕES OFFSHORE EM ARGILA MOLE. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UENF. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2022. Campos dos Goytacazes, RJ. Bibliografia: 133 - 138.

GHAAOWD, I. Thermal Improvement of the Pullout Capacity of Offshore Piles in Soft Clays. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural). San Diego, University da California, p. 196, 2018. GHAAOWD, I; MCCARTNEY, J.S. Centrifuge modeling of temperature effects on the pullout capacity of energy piles in clay. *Deep Foundation Institute*, 43rd Annual Conference, 2018.

GODOY, V. Efeito da Viscosidade no Comportamento Geomecânico de Solos offshore. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2022.

HEMSI, P. Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo paulista considerando a carga variável e o ponto de carga nula. Dissertação de mestrado. EPUSP. 2001.

HOUHOU, R.; SUTMAN, M.; SADEK, S.; LALOUI L.; Microstructure Observations in Compacted Clays Subjected to Thermal Loading. *Engineering Geology*, p. 287, 2021.

HOUSTON, B. S. L.; HOUSTON, W. N.; WILLIAMS, N. D. Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments. v. I, n. 11, p. 1249–1263, 1986.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON W.N.; WILLIAMS, N. D. Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.111(12), p. 1249-1263, 1985.

HUANCOLLO, H. J. M. Estudo experimental de melhoramento de solos moles através da técnica de adensamento térmico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia - Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

Hueckel, T., and Baldi, G. (1990). "Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study." *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 116(12), 1778-1796.

Hueckel, T., Borsetto, M., 1990. Termoplasticidade de solos saturados e xistos: equações constitutivas. *J. Geotech. Eng.* 116 (12), 1765-1777.

JOHNANSEN, O.; Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. Thesis, Norway, Traduzida por USA Corps of Engineers ADA044002, 1975.

Kuntiwattanakul P, Towhata I, Ohishi K, Seko I. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay. *Soils and Foundation* 1995;35(1):147–62.

LALOUI, L. et al. Issues involved with thermoactive geotechnical systems : characterization of thermomechanical soil behavior and soil-structure interface behavior. *The Journal of the Deep Foundations Institute*, v. 8, n. 2, p. 13, 2014.

LALOUI, L.; CEKEREVAC, C. Thermo-plasticity of clays : An isotropic yield mechanism. *Computers and Geotechnics*, v. 30, p. 649–660, 2003.

LALOUI, L.; FRANÇOIS, B. ACMEG-T : soil thermoplasticity model. ASCE, n. March 2014, 2009.

LEPSCH, I. F.; Determining the Soil Erodibility for an Experimental Basin in the Semi-Arid Region Using Geoprocessing. American Journal of Plant Sciences, Vol.8 No.12 p. 19-35, 2011.

MACHADO, I et al. VELOCIDADE DE CARREGAMENTO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. 405-434, 2021.

MARTINS, I. et, al. VELOCIDADE DE CARREGAMENTO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS. Geotecnia nº 152 – julho/julio/july 2021 – pp. 405-434. 2021 Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

MECCA, J. RATE EFFECTS OF RAPID LOADING IN CLAY SOILS. Department of Civil and Structural Engineering University of Shef field, March2004.

MITCHELL, J. K. Fundamentals of Soil Behavior. 2.ed Edition. Wiley, New York, 1999.

P. Delage,1 N. Sultan, and Y.J. Cui. École Nationale des Ponts et Chaussées, CERMES (Geotechnical Department), 6-8 Av. B. Pascal, F-77455 Marne le Vallée CEDEX 2, France. Received July 24, 1998. Accepted August 23, 1999.

PINTO, C. de Souza (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos. São Paulo. Oficina de Textos.

Radhavi, A.; SamaraKoon, John S.; McCartney. Simulation of thermal drains using a new constitutive model for thermal volume change of normally consolidated clays Department of Structural Engineering, University of California San Diego, 2023. La Jolla, CA 92093-0085, USA

RIBEIRO, B. T et. Al. **Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Machado, 37750-000 Machado - MG, Brasil <sup>1</sup>Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, CP 37, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

SAMARAKOON, R.; GHAAOWD, I.; MCCARTNEY, J. S. Impact of Drained Heating and Cooling on Undrained Shear Strength of Normally Consolidated Clay. *Energy Geotechnics*. SEG, p. 243-224, 2019.

Terzaghi, K. (1941) Undisturbed clay samples and undisturbed clays, *Contributions to soilMechanics*, pp. 45-65

TERZAGHI, K. UNDISTURBED CLAY SAMPLES AND UNDISTURBED CLAYS - *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* - July, 1941

VRYZAS, A., TOURCHI, S., & KARDOONI, F. (2017). A critical state based thermo-elasto-plastic constitutive model for structured clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6), 1094-110.

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

ZHANG, N.; WANG, Z. International Journal of Thermal Sciences Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 117, p. 172–183, 2017.