

INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA COMPACTAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA DA ARGILA

Ana Júlia Santos Silva

Bacharelanda do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (jsilva.ajlss@gmail.com)

Ana Lúcia Oliveira Do Carmo

Bacharelanda do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (analoliveirac@gmail.com)

Maria Eduarda Gomes Dos Santos

Bacharelanda do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (mariaeduardags_@hotmail.com)

Eduardo Martins Toledo

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (eduardo.toledo@ueg.br)

Igor Cezar Silva Braga

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA (igorcezar14@hotmail.com)

RESUMO

A compreensão do comportamento de solos argilosos em diferentes condições de umidade é fundamental para o desenvolvimento de projetos e a execução de obras geotécnicas, uma vez que a água afeta diretamente parâmetros como plasticidade, densidade seca e resistência mecânica. Nesse contexto, este estudo avaliou a influência do teor de umidade na compactação e na resistência à compressão não confinada de dois solos argilosos coletados em Anápolis (Amostra 1) e Nerópolis (Amostra 2), ambos no estado de Goiás. A caracterização física inicial revelou diferenças relevantes entre os materiais: a Amostra 1 apresentou umidade natural média de 14,91%, enquanto a Amostra 2 alcançou 26,05%, indicando maior retenção hídrica. Os limites de liquidez (40,13% e 48,11%) e plasticidade (9% e 15%) resultaram em índices de plasticidade de 31,13% e 33,11%, classificando ambas como argilas altamente plásticas. Nos ensaios de compactação Proctor, a Amostra 1 apresentou umidade ótima média de 30,9% e massa específica seca máxima entre 1,515 e 1,553 g/cm³; já a Amostra 2 apresentou umidade ótima entre 10,9% e 12,1%, com densidades secas variando de 1,497 a 1,533 g/cm³, evidenciando comportamentos distintos frente à variação de umidade. No ensaio de resistência à compressão simples, foram observadas tensões de ruptura entre 201 e 358 kPa para a Amostra 1 e entre 167 e 400 kPa para a Amostra 2. No entanto, não foi possível estabelecer correlação confiável entre teor de umidade e resistência devido ao controle inadequado da umidade durante a moldagem dos corpos de prova. Conclui-se que a umidade exerce influência significativa no comportamento físico e mecânico das argilas estudadas, embora a relação com a resistência só possa ser comprovada com ensaios conduzidos sob controle hídrico rigoroso. O estudo reforça a importância desse controle em obras geotécnicas, especialmente na execução de camadas compactadas.

PALAVRAS-CHAVE: plasticidade; caracterização física; proctor; densidade seca; tensão de ruptura.

1 INTRODUÇÃO

A geotecnia é uma área da engenharia civil que estuda as propriedades físicas e mecânicas dos solos, fornecendo subsídios essenciais para o dimensionamento e execução de obras de infraestrutura, como fundações, pavimentos e barragens. Entre os diversos aspectos abordados, a compactação é a capacidade do solo a resistir a esforços, como a compressão, destacam-se por sua importância prática, pois estão diretamente relacionadas à estabilidade e à segurança das construções (Coduto, 2017).

A compactação é o processo responsável por aumentar a densidade do solo por meio da redução dos vazios entre as partículas sólidas, o que resulta em maior resistência mecânica e menor deformabilidade. Esse procedimento, quando realizado de forma adequada, assegura que o solo apresente comportamento satisfatório sob carregamentos estruturais, evitando recalques e falhas nas fundações (Budhu, 2015).

Nos solos argilosos, a presença de partículas finas e a alta capacidade de retenção de água tornam a variação da umidade um fator crítico. Pequenas alterações nesse teor podem modificar as propriedades mecânicas do solo, interferindo na sua resistência à compressão e na sua capacidade de suporte (Gouvêa, 2018). Dessa forma, compreender a influência da umidade na compactação e resistência à compressão da argila é essencial para garantir a estabilidade das estruturas construídas, principalmente em solos suscetíveis a deformações elevadas.

Justifica-se, portanto, a realização deste estudo pela relevância prática que o tema possui na engenharia civil, especialmente em regiões onde o solo argiloso é predominante. Compreender a relação entre o comportamento da argila e a variação de umidade, e comprovar a influência que a umidade pode ocasionar na qualidade e durabilidade de obras civis, como recalques diferenciais, trincas e rupturas estruturais.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar o impacto de diferentes teores de umidade nas propriedades mecânicas de solos argilosos, por meio de ensaios laboratoriais de compactação e resistência à compressão não confinada da argila. Para alcançar esse propósito, foram definidos objetivos específicos que englobam a coleta e preparação de amostras representativas de argila para a realização dos ensaios laboratoriais, a determinação de seus parâmetros físicos — incluindo os limites de consistência —, a execução do ensaio de compactação Proctor para identificação da umidade ótima e da densidade seca máxima, a realização de ensaios de resistência à compressão não confinada em diferentes teores de umidade e, por fim, a análise da relação entre o teor de umidade e a resistência à compressão da argila.

O desenvolvimento deste trabalho visa contribuir para o conhecimento da relação entre a umidade e o respectivo comportamento da argila, podendo ser utilizado como uma ferramenta de embasamento para constatações teóricas e até mesmo, técnicas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O solo é um material de construção de relevância semelhante ao aço e ao concreto, já que a estrutura construída está direta ou indiretamente apoiada nele; portanto, o estudo da geotecnia é útil para compreender as minúcias de sua natureza, bem como do seu comportamento (Santos; Daibert, 2013). Sua origem costuma se dar por decomposição de rochas através de alterações físicas ou químicas, denominadas de intemperismo, e pode possuir matéria de origens minerais e orgânicas (Murrieta, 2018).

Os tipos de solos são identificados através da classificação granulométrica, que analisa principalmente uma das características físicas do grão, o seu diâmetro. A Tabela 1 traz a classificação granulométrica de acordo com a faixa dos diâmetros.

Tabela 1 – Classificação Granulométrica

Classificação	Diâmetro dos grãos
Seixo/ Pedregulho	Maior que 4,8 mm
Areia	De 0,05 a 4,8 mm
Silte	De 0,005 a 0,05 mm
Argila	Inferior a 0,005 mm

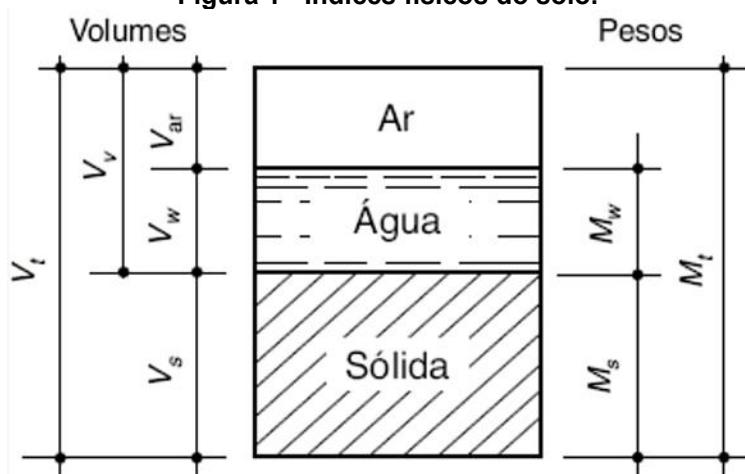
Fonte: Adaptado de Pinto (2025).

Segundo Sheard (1991), areia, silte e argila apresentam comportamentos bem distintos. A areia é formada por grãos maiores, com pouca coesão, e por isso não mantém forma nem quando úmida. O silte possui partículas muito finas e lisas, que retêm e liberam água com facilidade; apesar disso, ainda não apresenta coesão suficiente para ser moldado com estabilidade. Já a argila, composta por partículas extremamente pequenas e minerais como cálcio, magnésio e potássio, retém água com mais eficiência, o que aumenta sua coesão e permite que seja moldada sem se desagregar, porém, a classificação granulométrica não foi realizada devido a uma falha de atenção. A seguir, estão apresentadas as principais características da argila; a influência da umidade em solos argilosos; conceitos de compactação e compressão de solos.

2.1 UMIDADE NOS SOLOS

A estrutura física do solo é composta por sólidos, líquidos e gases. A parte sólida é de partículas de minerais e de matéria orgânica. O líquido normalmente é a água, e o gás é representado pelo ar. O volume total do solo é o somatório dos volumes dos sólidos, dos líquidos e dos gases. O que não é sólido é denominado de vazio; o vazio pode ser preenchido por água ou por ar. Se o vazio estiver preenchido por água, o solo é dito saturado; caso o vazio estiver preenchido por ar, o solo é tido por seco (Budhu, 2015). Na Figura 1 estão representados os índices físicos do solo.

Figura 1 - Índices físicos do solo.



Fonte: Caputo, 2022.

Onde:

V_t : é o volume total do solo;
 V_s : é o volume do sólido;
 V_v : é o volume de vazios;

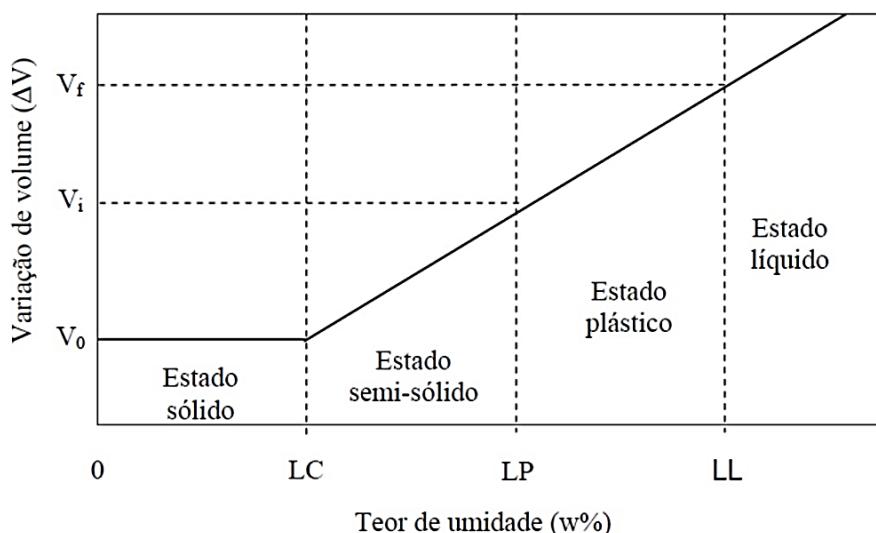
V_w : é o volume da água;
 V_{ar} : é o volume do ar;
 M_t : é a massa total;
 M_s : é a massa do sólido;
 M_w : é a massa da água.

Para entender os diferentes comportamentos da argila diante de diferentes teores de umidade, faz-se necessário estudar seus estados físicos. São os Limites de Atteberg que mostram as mudanças sofridas pela argila, desde seu estado aparentemente seco até um estado com alta saturação. Em Budhu (2015), os Limites de Atteberg são definidos:

- Limite de Liquidez (LL): marca a transição do estado plástico para o estado líquido do solo. Neste ponto, o solo flui como se fosse um líquido, e não possui moldabilidade nem consistência.
- Limite de Plasticidade (LP): com menos umidade do que o limite anterior, neste ponto, o solo adquire um comportamento plástico, ou seja, sofre deformações sem que ocorra a presença de fissuras e pode ser moldado sem se romper.
- Limite de Contração (LC): à medida que o solo perde umidade, ele se contrai, perde volume e passa para o estado sólido. Neste ponto, alterações volumétricas não mais acontecem, pois quase toda a água foi removida. Esse limite determina a capacidade de contração do solo.

A Figura 2 mostra a relação entre a umidade e o comportamento do solo em relação aos Índices de Atteberg.

Figura 2 – Carta de plasticidade



Fonte: Marinho, 2020.

Para além dos Limites de Atteberg, Budhu (2015) apresenta alguns índices auxiliares para a estimativa de parâmetros mecânicos, como o índice de plasticidade (IP) e o índice de consistência (IC).

O índice de plasticidade determina a plasticidade do solo e quanto maior for a quantidade de argila, maior será o IP. É calculado pela Equação 1:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

IP: índice de plasticidade;
LL: limite de liquidez (em %);
LP: limite de plasticidade (em %).

A Tabela 2 apresenta a classificação da plasticidade, baseada no valor do IP.

Tabela 2 - Índice de plasticidade

Nomenclatura	Índice de plasticidade
Não plásticos	IP<1
Ligeiramente plásticos	1<IP<7
Moderadamente plásticos	7<IP<17
Altamente plásticos	17<IP<35
Extremamente plásticos	IP>35

Fonte: Adaptado IAEG, 1979.

O índice de consistência determina o grau da consistência do solo em relação ao seu teor de umidade. É calculado pela Equação 2:

$$IC = \frac{LL - h}{IP} \quad (2)$$

Onde:

IC: índice de consistência;
LL: limite de liquidez (em %);
IP: índice de plasticidade;
h: teor de umidade (em %).

A Tabela 3 mostra os valores do Índice de Consistência e suas respectivas classificações.

Tabela 3 - Índice de consistência

Nomenclatura	Índice de consistência
Muito mole	IC<0,50
Mole	0,50<IC<0,65
Média	0,65<IC<0,85
Rija	0,85<IC<1,00
Dura	IC>1,00

Fonte: Adaptado NBR 6502, 1995.

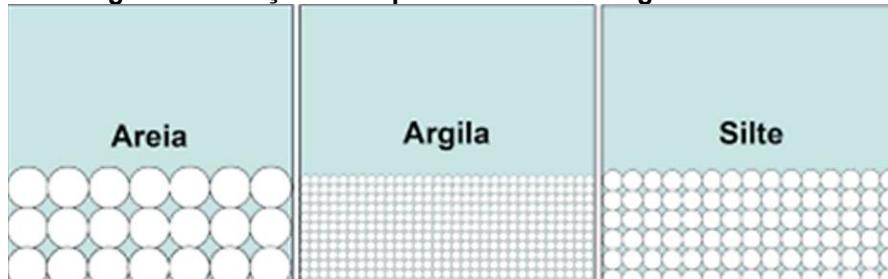
Outras propriedades relacionadas à umidade nos solos são a porosidade e a permeabilidade. A permeabilidade, também chamada de condutividade hidráulica, é definida pela capacidade de a água fluir através do solo pela presença de vazios na massa que permitem a passagem de fluídos de um ponto com maior energia para outro ponto com

menor energia; condições como índice de vazios, distribuição dos poros entre os grãos e grau de saturação podem afetar a permeabilidade (Elhakim, 2016).

A porosidade é a presença de espaços vazios (poros) entre as partículas, os quais podem estar preenchidos por ar ou água e são divididos em microporos (responsáveis pela retenção de água no solo) e macroporos (promovem a drenagem e aeração); solos arenosos possuem maioritariamente macroporos e por isso, não retêm bem a água. Já solos argilosos detêm microporos, os quais aumentam a absorção de água (Cavadas *et al.*, 2020).

Os poros estão relacionados com a infiltração, permeabilidade e drenagem, pois as interconexões entre eles criam caminhos condutores; a areia, por ter macroporos, drena mais rapidamente do que a argila, que tem microporos, conforme Figura 3.

Figura 3 - Relação entre porosidade e drenagem dos solos



Fonte: Lepsch (2002).

Em Aksu *et al.* (2015), o modelo de estimativa da permeabilidade e porosidade é baseado em três fatores: dimensão dos poros; grãos e área de superfície e foi estabelecido que a permeabilidade diminui com a diminuição dos grãos. Também se estabeleceu que, quando a angularidade dos grãos aumenta, é esperado que a porosidade também aumente.

Outro índice relacionado à umidade é o grau de saturação, que é a porcentagem de água presente nos vazios do solo. A Equação 3 para seu cálculo é vista em Caputo (1988):

$$S = \left(\frac{V_a}{V_v} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

S: saturação, expressa em porcentagem;

V_a : volume de água (cm^3);

V_v : volume de vazios (cm^3).

2.2 CARACTERÍSTICAS DA ARGILA

Para o estudo do solo argiloso, é necessário analisar suas características físicas, mecânicas e químicas, conforme apontam Santos (2016) e Murrieta (2018), que destacam a relevância desses parâmetros para compreender o comportamento dos solos finos. A Figura 4 apresenta um exemplo de solo argiloso, cuja coloração mais avermelhada e a textura compacta e coesa são características comuns desse tipo de solo, conforme descrito por Lepsch (2002) e Pereira *et al.* (2019).

Figura 4 – Solo Argiloso



Fonte: Syngenta Digital, 2021

2.2.1 Características físicas

As propriedades físicas dos solos abrangem granulometria, estrutura, agregação, porosidade, densidade, consistência e cor (Santos, 2016). A granulometria indica o tamanho das partículas; no caso das argilas, os grãos são menores que 0,005 mm, o que as caracteriza como solos finos. A estrutura corresponde ao modo como as partículas se organizam em agregados e interfere diretamente na estabilidade e no comportamento do solo em obras (Capeche, 2008). A agregação resulta da união das partículas por coesão ou pela ação de agentes cimentantes, como óxidos e matéria orgânica (Carvalho, 1991). A porosidade diz respeito ao volume de vazios do solo, fundamentais para a circulação de ar e água (De Jesus *et al.*, 2017). A densidade relaciona a massa seca ao volume total, havendo relação inversa com a porosidade: solos mais densos apresentam menor quantidade de vazios (Alves *et al.*, 2007). A consistência expressa a resistência à deformação, variando conforme o teor de umidade. Por fim, a cor está associada à presença de minerais e matéria orgânica; solos vermelhos indicam maior teor de óxidos de ferro, os pretos possuem mais matéria orgânica e os cinzas mostram menor capacidade de retenção de água.

2.2.2 Características mecânicas

As propriedades mecânicas envolvem adensamento, resistência ao cisalhamento, à compressão e à tração. O adensamento, segundo a NBR 6502, ocorre quando um solo saturado perde água dos poros ao ser carregado; em argilas, o processo é lento devido aos poros reduzidos. A adição de cal estabiliza argilas ao promover agregação e reduzir variações volumétricas, formando compostos cimentantes que aumentam a resistência (Azevedo, 2010). A resistência ao cisalhamento melhora com teores maiores de cal e maior tempo de cura, que ampliam a coesão entre partículas (Martins, 2023). Na resistência à compressão, solos mais compactos e bem drenados suportam tensões maiores antes da deformação plástica; a tensão de escoamento marca essa transição (Burland, 1990). A resistência à tração é geralmente baixa, mas argilas apresentam valores maiores devido à coesão entre partículas (Villar *et al.*, 2007). Além da cal, o cimento também é empregado para melhorar o comportamento mecânico e a segurança em obras.

2.2.3 Características químicas

As argilas são compostas por argilominerais, matéria orgânica, sais e minerais residuais, o que influencia diretamente suas propriedades (Rodriguez, 2013). A interação desses minerais com a água controla a plasticidade e o comportamento hidrofílico do solo (Calaresi *et al.*, 2014). Os argilominerais resultam do intemperismo químico e dividem-se em três grupos principais: caulinita, ilita e montmorilonita (Queiroz, 2016). Sua estrutura é formada por camadas de filossilicatos, conectadas por ligações químicas e por ligações de hidrogênio das hidroxilas (Rodriguez, 2013).

2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO - NBR 7182:2025

A compactação de solos tem como objetivo reduzir os vazios e aumentar a densidade, melhorando resistência e estabilidade. De acordo com a 7182 (ABNT, 2025), o processo consiste na aplicação de energia mecânica para aproximar as partículas, sendo essencial controlar o teor de umidade, a energia aplicada e o método de compactação. A norma estabelece os procedimentos de laboratório para determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo, parâmetros fundamentais para definir o grau de compactação desejado em campo. Conforme a curva obtida no ensaio, valores de umidade abaixo do ideal reduzem a eficiência da compactação, enquanto umidades excessivas provocam perda de resistência por saturação dos poros.

Segundo a NBR 7182, os equipamentos utilizados devem reproduzir, em escala reduzida, a energia aplicável em campo, podendo operar por impacto, vibração ou amassamento. Em obras, a especificação também segue diretrizes da norma, que recomenda o uso de rolos lisos, pés-de-carneiro, pneumáticos ou placas vibratórias conforme o tipo de solo e o objetivo da compactação. A escolha adequada do equipamento influencia diretamente o ganho de densidade e a homogeneidade das camadas.

Os princípios descritos na norma são compatíveis com autores clássicos. Proctor, pioneiro no estudo da compactação, mostrou que cada solo possui uma combinação ótima entre energia e umidade que gera máxima densidade (Silva, 2008). De forma complementar, Nawaz *et al.* (2013) e Budhu (2015) destacam que o aumento de densidade reduz compressibilidade, permeabilidade e deformações volumétricas, contribuindo para maior resistência do material. Assim, a compactação deve seguir os limites definidos pela curva Proctor obtida conforme a NBR 7182, garantindo segurança e desempenho em obras como aterros, pavimentação e fundações. Compactações insuficientes ou excessivas podem gerar recalques, fissuras e perda de estabilidade, o que reforça a necessidade de controle rigoroso do processo.

2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA DA ARGILA - NBR 12770:2022

Keller *et al* (2011) descreve a compressão como a relação entre tensões aplicadas ao solo e parâmetros do estado de compactação, como a taxa de vazios; amostras moldadas em formato cilíndrico são submetidas à tensão em um equipamento de compressão uniaxial.

A aplicação de uma tensão provoca diferentes reações; no primeiro momento, é estabelecido o “estado elástico”, no qual a deformação pode ser revertida ao estado original quando a tensão é retirada; em seguida, o “estado plástico”, cuja deformação permanece após a retirada da tensão; a partir daí, surgem fissuras que levam a ruptura (Caputo, 1988). A compressibilidade, como fator importante para analisar o comportamento do solo ao receber as cargas da infraestrutura construída sobre ele, é entendida como a predisposição de ocorrer perda de volume sob tensões; alguns coeficientes para entender a

compressibilidade são o coeficiente de compressibilidade, o índice de compressão e o coeficiente de consolidação (Singh, Noor, 2012).

O solo, ao receber as cargas da estrutura, sofre assentamento, que é uma deformação vertical, cujo acontecimento pode promover rachaduras, inclinações e problemas de fundação; tal comportamento é observado tanto antes da construção (para definir o melhor tipo de fundação e tomar medidas preventivas que garantam a segurança) como depois (para realizar correções que garantam a vida útil da edificação), focando sempre na garantia da estabilidade da obra (Freire, 2023). Para relacionar a resistência à compressão simples (RCS), em kPa e a consistência da argila, Floriano (2016) fornece dados da Tabela 4.

Tabela 4 - Relação entre consistência da argila e RCS.

Consistência da argila	RCS (kPa)
Muito mole	RCS<25
Mole	25
Média	50
Rija	100
Muito rija	200
Dura	RCS>400

Fonte: Adaptado Floriano (2016)

Para analisar a resistência, o solo em diferentes umidades deve ser colocado em moldes cilíndricos, cuja altura deve ser de 2 a 2,5 vezes o valor do diâmetro, então levados a uma prensa, que aplicará carga progressivamente até acontecer a ruptura. Durante o ensaio, um dispositivo associado à prensa traça a curva tensão- deformação, que mostra por meio de valores numéricos o comportamento do material (Caputo, 1988).

A relação entre compactação e resistência à compressão simples é amplamente discutida na literatura. Segundo Budhu (2015) e Caputo (2022), quanto maior a eficiência da compactação, maior a densidade seca obtida, resultado do rearranjo das partículas, redução dos vazios e aumento do contato entre os grãos, fatores que elevam a resistência do solo. Esses autores também destacam que o excesso de umidade reduz a resistência, pois a água ocupa os vazios e afasta as partículas, diminuindo a coesão e a capacidade de suporte.

De forma sintetizada, o comportamento do solo pode ser descrito conforme Budhu (2015):

- (a) Compactação na umidade ótima: resulta em maior densidade seca e, consequentemente, maior resistência; melhor em umidade ótima;
- (b) Solo compactado abaixo da umidade ótima: apresenta densidade menor e reduzida capacidade de suporte;
- (c) Solo compactado acima da umidade ótima: pode até atingir boa densidade, mas tende a perder resistência devido ao excesso de água entre as partículas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve como finalidade avaliar de forma detalhada a influência de diferentes teores de umidade na compactação e na resistência à compressão não confinada de solos argilosos provenientes de duas localidades distintas do estado de Goiás: Anápolis e Nerópolis. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais e Solos no Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás (UniEVANGÉLICA), em Anápolis (GO), seguindo as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) referentes aos ensaios realizados. O ensaio de resistência à compressão não confinada da argila foi executado no Instituto Federal Goiano – Campus Trindade (GO), devido à disponibilidade do equipamento de ruptura.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS E NORMAS APLICÁVEIS

Os ensaios foram realizados conforme os roteiros experimentais elaborados de acordo com as seguintes Normas que estão relacionadas na Tabela 5:

Tabela 5 – ENSAIOS REALIZADOS E RESPECTIVAS NORMAS TÉCNICAS

Ensaios	Norma técnica (ABNT)	Finalidade
Teor de Umidade	NBR 6457:2024	Determinar a quantidade de água presente no solo natural e compactado.
Massa Específica dos Sólidos	NBR 17212:2025	Determinar a densidade das partículas sólidas do solo.
Limite de Liquidez	NBR 6459:2016	Identificar o teor de umidade em que o solo passa do estado plástico para líquido.
Limite de Plasticidade	NBR 7180:2016	Identificar o teor de umidade em que o solo passa do estado semissólido para plástico.
Ensaio de Compactação (Proctor Normal)	NBR 7182:2025	Determinar a umidade ótima e a densidade seca máxima do solo.
Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo	NBR 12770:2022	Avaliar a resistência do solo compactado em diferentes teores de umidade.

Fonte: Adaptado das normas ABNT NBR 6457:2024; NBR 17212:2025; NBR 7182:2025; NBR 12770:2022

3.3 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A coleta, identificação e preparação das amostras seguiram as recomendações da ABNT NBR 6457 (2021), que estabelece os procedimentos para manuseio, transporte e preparo de solos destinados a ensaios de caracterização e compactação. As amostras foram coletadas manualmente com o uso de enxadão e pá, em dois pontos distintos: A Amostra 1 (A1) — coletada na Região Norte do município de Anápolis, nas dependências da Fazenda Escola da UniEVANGÉLICA, área representativa de solos argilosos utilizados em atividades acadêmicas e experimentais — e A Amostra 2 (A2) — coletada na Região Norte de Nerópolis, nas proximidades da Cerâmica Master, local caracterizado pela presença de solos argilosos explorados para uso cerâmico. Cada amostra apresentou aproximadamente 30 kg, totalizando cerca de 60 kg de material. As coletas foram realizadas em camadas superficiais de solo, em locais livres de contaminação orgânica, assegurando a representatividade dos materiais. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos vedados e devidamente identificadas. No laboratório da UniEVANGÉLICA, os materiais

foram destorreados e peneirados na peneira de 4,8 mm, conforme prescrito pela NBR 6457:2024, para eliminar partículas grosseiras e padronizar o material para os ensaios.

A escolha das cidades de Anápolis e Nerópolis justificou-se pela presença de solos argilosos com características distintas, permitindo comparar materiais de origens e comportamentos geotécnicos diferentes. Antes da coleta, foi realizada uma análise tático-visual preliminar, conforme definições de descrição de solos da ABNT NBR 6484:2020 e orientações de inspeção em campo apresentadas na ABNT NBR 9604 (2016). Ambos os materiais apresentaram coloração avermelhada, textura fina e forte coesão, indicando se tratar de solos predominantemente argilosos. A Amostra 1, proveniente de área rural submetida ao intemperismo natural, tende a apresentar estrutura pedológica mais desenvolvida, enquanto a Amostra 2, coletada em área industrial de exploração cerâmica, tende a apresentar maior plasticidade e retenção hídrica. Essas diferenças justificaram a seleção dos pontos de coleta, permitindo uma comparação mais abrangente no estudo.

Nas Figuras 5 e 6, são apresentadas as imagens das duas amostras coletadas — a de Anápolis-GO (A1) e a de Nerópolis-GO (A2) — evidenciando visualmente as diferenças de coloração, textura e plasticidade observadas entre os solos.

Figura 5 – Amostra 1 - Solo coletado em Anápolis (GO)



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 6 – Amostra 2 - Solo coletado em Nerópolis (GO)



Fonte: Autoria própria (2025).

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

A caracterização física foi conduzida para definir os parâmetros básicos de identificação e comportamento de cada amostra, sendo realizados os seguintes ensaios: Teor de umidade natural; Massa específica dos sólidos; Limite de liquidez e Limite de plasticidade.

3.4.1 Teor de umidade natural (NBR 6457:2024)

A determinação do teor de umidade natural foi realizada conforme a NBR 6457:2024, utilizando aproximadamente 50 g de solo para cada determinação. Para cada amostra (A1 e A2), foram executados três ensaios independentes, permitindo o cálculo de uma média representativa. Inicialmente, as cápsulas metálicas foram pesadas vazias, obtendo-se a massa do recipiente seco, identificada como m_3 . Em seguida, cerca de 50 g

de solo destorrado foram colocados na cápsula, a qual foi novamente pesada, registrando-se a massa do conjunto solo úmido + cápsula (m_1). Após essa etapa, as cápsulas destampadas foram colocadas na estufa a 110 °C, permanecendo até atingir massa constante, garantindo completa evaporação da água contida no solo. Após a secagem, as cápsulas foram retiradas da estufa com auxílio de pinça metálica, colocadas no dessecador até atingirem temperatura ambiente e, então, novamente pesadas para obtenção da massa do conjunto solo seco + cápsula (m_2).

Com os valores de m_1 , m_2 e m_3 , o teor de umidade foi calculado pela equação prescrita na norma. A média dos três valores obtidos para cada amostra foi utilizada como o teor de umidade natural representativo das argilas de Anápolis (A1) e Nerópolis (A2).

3.4.2 Massa específica dos sólidos (NBR 17212:2025)

A determinação da massa específica dos sólidos, conduzida conforme a NBR 17212:2025, foi iniciada com a preparação da amostra de solo de acordo com a NBR 6457. Após a secagem e homogeneização, separou-se uma porção representativa de solo, destinada a ser utilizada como massa da amostra (m_s). Em paralelo, realizou-se a limpeza, secagem e estabilização térmica do balão volumétrico (picnômetro), que foi posteriormente pesado vazio para obtenção de sua massa de referência. Na etapa seguinte, colocou-se o solo seco em um recipiente com água destilada, onde permaneceu em imersão pelo tempo necessário para permitir a completa penetração da água entre as partículas, favorecendo a expulsão do ar interno.

Figura 7 – Ensaio da Massa específica dos sólidos



Fonte: Autoria própria (2025)

Após esse período, o solo foi transferido integralmente para o balão volumétrico, utilizando-se um funil de vidro. Lavou-se cuidadosamente o béquer e o funil, assegurando que nenhum material fosse perdido durante a transferência. Com o solo já no interior do balão, adicionou-se água destilada até aproximadamente metade do volume do frasco e iniciou-se o processo de retirada de ar aprisionado. Aplicou-se vácuo, com agitação intermitente, para promover o desprendimento de bolhas aderidas ao solo. Esse procedimento foi repetido até que não houvesse formação visível de novas bolhas, garantindo, assim, a remoção eficiente do ar. Em seguida, completou-se o volume do balão com água destilada até próximo da marca de calibração. Quando necessário, aplicou-se

nova etapa de vácuo para eliminar qualquer ar residual. Após estabilização à temperatura ambiente, ajustou-se cuidadosamente o nível da água até que o menisco coincidisse exatamente com a marca de referência. A superfície externa do balão foi então seca para evitar interferência na pesagem. Por fim, pesou-se o conjunto balão+solo+água, massa utilizada posteriormente nos cálculos da massa específica dos sólidos. Também foi realizada a pesagem do balão volumétrico contendo apenas água destilada até a marca de referência, etapa essencial para a determinação correta do volume interno e finalização do ensaio conforme previsto na norma. A Figura 7 mostra o picnômetro:

Com esses valores — m_s , m_1 , m_2 e a massa específica da água à temperatura do ensaio $\rho_w (T)$ — a massa específica dos sólidos foi calculada. Esse procedimento foi realizado separadamente para cada amostra, fornecendo os valores de massa específica dos sólidos representativos referentes a A1 e A2.

3.4.3 Limite de liquidez (NBR 6459:2016)

A determinação do limite de liquidez foi realizada conforme a NBR 6459:2016, utilizando o aparelho de Casagrande. Inicialmente, foi preparada uma amostra úmida e homogênea, que foi colocada na concha do equipamento, preenchendo-a de maneira uniforme. Em seguida, a massa de solo foi dividida em duas partes por meio da abertura de uma ranhura central, confeccionada cuidadosamente com um cinzel padrão, garantindo que as paredes da ranhura permanecessem simétricas. Com a amostra posicionada, a manivela do aparelho foi acionada, permitindo que a concha realizasse quedas livres sucessivas. A cada impacto, observou-se o fechamento gradual da ranhura, até que as bordas se unissem ao longo de 13 mm de comprimento, conforme especificado pela norma. No momento do fechamento, retirou-se uma pequena porção da região onde a ranhura se uniu, destinada à determinação do teor de umidade correspondente.

Figura 8 – Ensaio do Limite de Liquidez



Fonte: Autoria própria (2025).

O material remanescente na concha foi transferido para uma cápsula de porcelana, adicionando-se água destilada para ajustar novamente a consistência. A amostra foi homogeneizada com auxílio de uma espátula e reutilizada para repetição do procedimento,

a fim de obter cinco pontos experimentais com diferentes combinações de número de golpes e teor de umidade. Após a determinação dos cinco valores de umidade e seus respectivos números de golpes, os dados foram utilizados para construir um gráfico em escala logarítmica, no qual o eixo x representou o número de golpes e o eixo y representou o teor de umidade. Uma reta foi ajustada aos pontos experimentais, permitindo identificar o ponto correspondente a 25 golpes, definido pela norma como o limite de liquidez (LL) do solo. A Figura 8 ilustra essa etapa do procedimento.

3.4.4 Limite de plasticidade (NBR 7180:2016)

O limite de plasticidade foi determinado conforme a NBR 7180:2016. Inicialmente, a amostra de solo preparada foi colocada em uma cápsula de porcelana, sendo amassada vigorosamente com auxílio de uma espátula até formar uma pasta homogênea, com consistência claramente plástica. Em seguida, aproximadamente 10g dessa pasta foram retirados e moldados manualmente na forma de uma pequena bola, que foi então rolada sobre uma placa de vidro esmerilhada até adquirir o formato de um cilindro alongado.

Durante o processo de rolamento, observou-se o comportamento do cilindro. Caso ele se fragmentasse antes de atingir 3mm de diâmetro, o material era devolvido à cápsula, adicionava-se uma pequena quantidade de água e a mistura era homogeneizada por cerca de três minutos antes de repetir novamente o rolamento. Por outro lado, se o cilindro atingisse 3mm de diâmetro sem se fragmentar, o material também era retornado à cápsula para ser novamente amassado e submetido ao processo, garantindo que o rompimento ocorresse no diâmetro correto.

Quando o cilindro finalmente fragmentou com 3mm de diâmetro e aproximadamente 100mm de comprimento — medida verificada com auxílio de gabarito — os fragmentos resultantes foram colocados em um recipiente adequado e utilizados para a determinação da umidade correspondente. Esse procedimento foi repetido até se obter três valores de umidade, os quais foram comparados entre si.

Os resultados foram considerados satisfatórios quando nenhum dos três valores diferiu mais de 5% da média. O limite de plasticidade (LP) foi então calculado como a média desses valores, expressa em porcentagem e aproximada para o inteiro mais próximo, conforme exigência da norma.

O índice de plasticidade (IP) foi posteriormente obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), representando o intervalo de umidade no qual o solo apresenta comportamento plástico.

3.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR (NBR 7182:2025)

O ensaio Proctor foi executado com o cilindro e o soquete pequenos, aplicando-se 26 golpes em cada uma das três camadas, conforme determina a NBR 7182. Primeiramente, o molde foi fixado na base e colocado um papel-filtro, para evitar que o solo grudasse na superfície metálica durante a extração. Em seguida, foi utilizada a amostra previamente preparada e, com auxílio de uma proveta, adicionou-se água até atingir um teor de umidade inicial cerca de 5% abaixo da umidade ótima presumida. Esse solo foi bem homogeneizado em uma bandeja plástica.

A compactação foi feita camada por camada, sempre com o soquete caindo em queda livre, e tomando cuidado para distribuir os golpes de forma uniforme. Após a última camada, removeu-se o material excedente com a régua biselada. Na sequência, foi retirado o corpo de prova com o extrator e separou-se uma pequena porção para determinar o teor de umidade (w).

O solo restante foi destorrado e peneirado, e então voltou-se a acrescentar água, aumentando a umidade em cerca de 2% para produzir o ponto seguinte da curva. Esse procedimento foi repetido até obter cinco pontos, contemplando tanto o ramo seco quanto o úmido da curva de compactação.

Com os valores de umidade e as massas medidas, foi calculada a massa específica seca (ρ_d) e construída a curva de compactação, que apresentou o formato parabólico típico. A partir dela, identificou-se a densidade seca máxima e o teor de umidade ótimo de cada amostra, parâmetros essenciais para orientar a moldagem dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão simples. A Figura 9 apresenta um dos corpos de prova após a moldagem.

Figura 9 – Ensaio de Compactação Proctor



Fonte: Autoria própria (2025).

3.6 MOLDAGEM E CONSERVAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com base nas umidades ótimas obtidas no ensaio Proctor, foram moldados dez corpos de prova cilíndricos por amostra, totalizando vinte unidades destinadas ao ensaio de compressão não confinada da argila. As dimensões adotadas foram 10cm de diâmetro e 12,81cm de altura, resultando em uma relação altura/diâmetro inferior ao intervalo recomendado pela NBR 12770:2022. Essa limitação ocorreu devido aos moldes de corpo de prova disponíveis no laboratório. Como não havia moldes que atingissem a proporção 2,0–2,5, utilizou-se o molde do próprio ensaio Proctor, que era o único disponível e compatível com o material. Assim, os corpos de prova foram moldados dentro dos limites materiais do laboratório.

Apesar da restrição geométrica, manteve-se o rigor na compactação, na homogeneidade das camadas e no controle do teor de umidade, garantindo coerência entre todos os corpos de prova. As amostras foram moldadas com umidades abaixo, próxima e acima da umidade ótima, e posteriormente armazenadas em ambiente de umidade controlada até o ensaio de ruptura.

3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA DE SOLO COESIVO

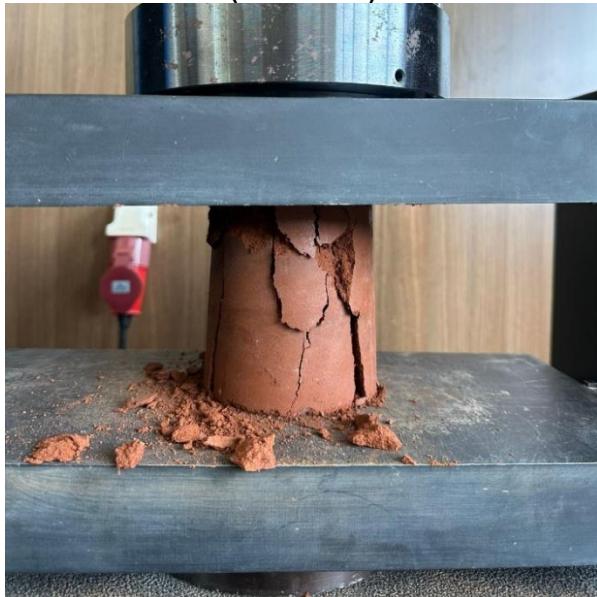
Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados no Laboratório de Solos do IF Goiano – Campus Trindade, utilizando uma prensa hidráulica com controle de carregamento e medidor de deslocamento acoplado.

Cada corpo de prova foi centralizado na prensa e submetido a carregamento axial contínuo até a ruptura, com velocidade de deformação axial constante, de acordo com a NBR 12770:2022. Foram registrados os valores de carga aplicada, deslocamento e deformação axial, possibilitando a construção das curvas tensão x deformação.

Após a ruptura, foram observados o modo de fratura e o comportamento mecânico dos corpos de prova: amostras com umidade inferior à ótima apresentaram ruptura frágil e desagregação abrupta, enquanto aquelas próximas à umidade ótima apresentaram comportamento mais coeso e ruptura plástica.

Os valores de tensão de compressão simples, representados por (q_u) , correspondem à relação entre a carga máxima aplicada e a área média da seção transversal do corpo de prova, conforme procedimento definido pela NBR 12770:2022 para o ensaio de resistência à compressão não confinada. Os resultados foram expressos em quilopascal (kPa). As Figuras 10 e 11 apresentam exemplos dos corpos de prova no momento da ruptura durante o ensaio.

Figura 10 – Ensaio de resistência à compressão não confinada de solo coesivo (Amostra 1)



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 11 – Ensaio de resistência à compressão não confinada de solo coesivo (Amostra 2)



Fonte: Autoria própria (2025).

3.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados, foram confeccionados gráficos relacionando o teor de umidade das amostras com os valores de resistência à compressão simples obtidos nos ensaios. Esses gráficos permitiram visualizar o comportamento de cada solo ao longo das diferentes condições de umidade, possibilitando comparar as curvas e identificar tendências de aumento ou redução de resistência. A interpretação foi feita observando-se as diferenças entre as amostras e avaliando se variações no teor de umidade provocaram mudanças perceptíveis no desempenho mecânico dos corpos de prova. Dessa forma, a análise gráfica forneceu uma base clara e objetiva para compreender como a umidade influenciou diretamente os valores de resistência obtidos no estudo.

Nesse processo, utilizou-se a análise de regressão, recurso estatístico empregado para ajustar uma linha de tendência aos pontos experimentais. Esse ajuste permite estimar valores intermediários e compreender a relação entre as variáveis. O parâmetro associado a essa regressão é o coeficiente de determinação (R^2), que expressa o quanto o modelo

ajustado representa os dados observados. Em termos práticos, valores de R^2 próximos de 1 indicam que a curva de tendência descreve bem o comportamento dos pontos experimentais; valores mais baixos sinalizam maior dispersão. O R^2 é fornecido pelo próprio software de plotagem das curvas (como Excel), a partir do ajuste matemático aplicado aos dados.

Para o ensaio de compactação Proctor, a análise percentual no ensaio de compactação foi realizada seguindo os passos abaixo:

- Calculou-se a umidade média dos pontos que compõem cada curva.
- Substituiu-se essa umidade média nas equações das curvas A e B para obter a massa específica aparente seca correspondente.
- O valor encontrado foi multiplicado pelo coeficiente de determinação (R^2) fornecido pela linha de tendência.
- Por fim, a variação percentual entre as curvas foi determinada comparando-se os valores resultantes.

Procedimento semelhante foi aplicado ao ensaio de resistência à compressão não confinada, considerando-se: a umidade média; a deformação média; o cálculo da pressão p ; a multiplicação de p pelo coeficiente de determinação (R^2); e, por fim, a obtenção da variação percentual entre as curvas de cada amostra.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIO DO TEOR DE UMIDADE

A Amostra 1 forneceu os valores de umidade de $w_1 = 15,51\%$, $w_2 = 14,96\%$ e $w_3 = 14,25\%$, com uma umidade média de 14,91%. Já a amostra 2 apresentou valores de $w_1 = 29,28\%$, $w_2 = 23,40\%$ e $w_3 = 25,47\%$ e sua umidade média foi de 26,05%. Verificou-se a presença de fração de argila através da análise tátil/visual, conforme a NBR 6484:2020, a qual instrui que, ao friccionar o solo entre os dedos, a argila deve apresentar-se macia ao tato. O exame visual também foi realizado para constatar a característica argilosa, pois as amostras disponibilizaram grãos não visíveis a olho nu, com partículas inferiores a 0,1 mm.

Tabela 6 – ENSAIO DO TEOR DE UMIDADE

	A1	A2
W_1	15,51%	29,28%
W_2	14,96%	23,40%
W_3	14,25%	25,47%
w média	14,91%	26,05%

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2 ENSAIO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A uma temperatura de ensaio de 23 °C, a Amostra 1 apresentou massa específica de 1,273 g/cm³. Já a Amostra 2, ensaiada a 24 °C, forneceu o valor de 2,045 g/cm³. A literatura aponta que valores mais elevados de massa específica estão associados a menores índices de vazios (CAPUTO, 2022), o que tende a aumentar o contato entre partículas e melhorar o comportamento mecânico do solo. Burland (1990) e Budhu (2015) destacam que solos com menor volume de vazios apresentam maior resistência e menor deformabilidade. Assim, a Amostra 2, por possuir massa específica superior, possivelmente apresenta menor índice de vazios e maior capacidade de suporte quando comparada à

Amostra 1, que, por sua vez, tende a apresentar maior volume de vazios e menor resistência.

4.3 ENSAIO DO LIMITE DE LIQUIDEZ

Ao realizar o cálculo para a Amostra 1, o limite de liquidez encontrado foi de 40,13%; esse é o valor da umidade para 25 golpes do ensaio. A Amostra 2 apresentou limite de liquidez de 48,11%. Solos com maior valor de LL são mais plásticos e contêm maior presença de minerais argilosos do que outros.

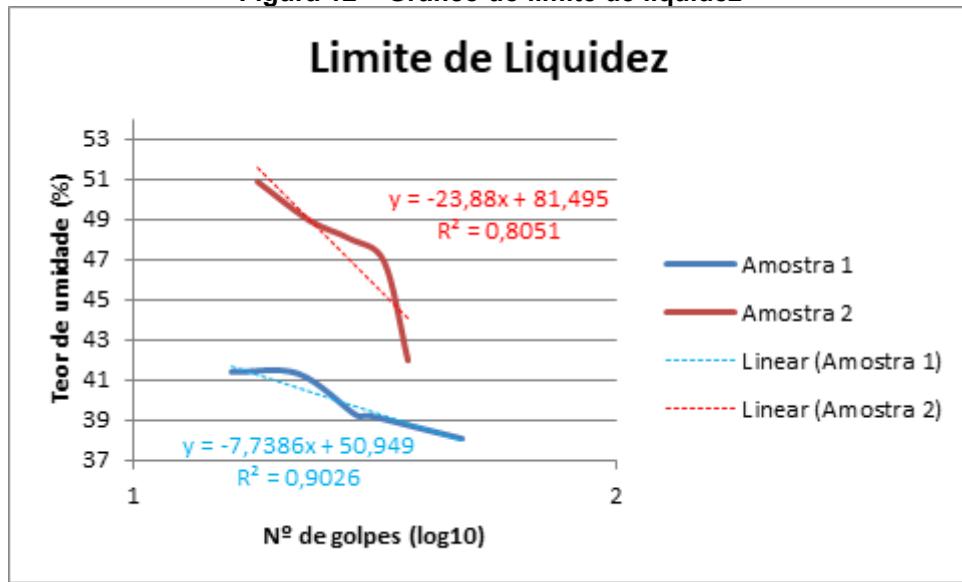
Com os valores de LL e LP, é possível calcular o Índice de Plasticidade dos solos. Para a Amostra 1, o IP será de 31,13% e para a Amostra 2, o IP é de 33,11%. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 7, a qual permite verificar que IP entre 17% e 35% caracterizam solos como altamente plásticos. Ambas as amostras contêm elevada fração argilosa, característica que suscita boa retenção de água. A permanência no estado plástico nessa faixa de umidade colabora para que o solo seja moldado sem sofrer deformações ou rupturas.

Tabela 7 – ENSAIO DO LIMITE DE LIQUIDEZ

Amostra 1			Amostra 2		
Nº de golpes	Log Nº de golpes	Umidade (%)	Nº de golpes	Log Nº de golpes	Umidade (%)
48	1,681241237	38,07	37	1,568201724	41,99
31	1,491361694	39,2	33	1,51851394	46,89
29	1,462397998	39,23	28	1,447158031	48,03
22	1,342422681	41,29	23	1,361727836	48,95
16	1,204119983	41,38	18	1,255272505	50,85

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 12 – Gráfico do limite de liquidez



Fonte: Autoria própria (2025).

Os valores obtidos para LL, LP e IP também permitem confirmar a natureza argilosa dos materiais ensaiados. Conforme estabelecido pela literatura geotécnica e pelos critérios de Atterberg, somente solos coesivos — especialmente argilas — apresentam plasticidade mensurável por meio desses limites. Os Índices de Plasticidade calculados (31,13% para

A1 e 33,11% para A2) enquadraram ambas as amostras na faixa de solos altamente plásticos, compatível com a presença dominante de fração argilosa. Essa interpretação é coerente com a análise tátil-visual realizada durante a coleta, conforme critérios de descrição da ABNT NBR 6502 e recomendações da NBR 9604, na qual já haviam sido observadas textura fina, coloração avermelhada e elevada coesão. Assim, os resultados laboratoriais reforçam e confirmam a identificação preliminar de que tanto a Amostra 1 quanto a Amostra 2 correspondem a solos predominantemente argilosos.

4.4 ENSAIO DO LIMITE DE PLASTICIDADE

A NBR 7180 estabelece que o limite de plasticidade será encontrado quando, de três umidades calculadas, seus valores não podem desobedecer ao intervalo de 5% da média das umidades obtidas. O valor do LP será expresso em porcentagem aproximado pelo inteiro mais próximo da média.

A Amostra 1 foi moldada de acordo com a exigência da norma e disponibilizou os seguintes teores de umidade: $w_1 = 8,47\%$; $w_2 = 8,67\%$ e $w_3 = 8,82\%$. Considerando o intervalo de confiança de 8,22% - 9,08%, o LP médio encontrado, 8,65%, foi considerado satisfatório. Portanto, o LP da Amostra 1 é aproximado para o inteiro mais próximo, LP(1) = 9,00%. Por outro lado, a Amostra 2 concedeu os seguintes valores: $w_1 = 14,52\%$; $w_2 = 14,65\%$ e $w_3 = 15,53\%$ e LP médio de 14,83%. O intervalo de confiança de 14,09% - 15,57% apontam resultado satisfatório; logo, o LP da Amostra 2 também é aproximado para o inteiro mais próximo, LP (2) = 15,00%, permanecendo dentro do intervalo estabelecido.

4.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

AMOSTRA 1:

Realizou-se a análise percentual da variação da massa específica aparente seca em relação à umidade, conforme descrito no Item 3.8 deste trabalho. Como visto na Tabela 8, as variações são pequenas no ramo seco da curva e aumentam à medida que a umidade sobe. O ramo úmido da curva teve as maiores variações observadas, sendo que o último ponto de umidade apresentou a maior, de 3,75%. Nota-se a importância do rigor estabelecido pela NBR 7182:2025 na variação de umidade, pois à medida que ela aumentou, as curvas apresentaram maior variação. As linhas de tendência obtidas foram similares e sinalizam que, apesar da variação, as curvas têm desempenhos muito próximos.

As umidades ótimas e massas específicas aparentes secas máximas apresentaram valores aproximados, reforçando o comportamento semelhante das duas curvas de compactação traçadas. Encontra-se a umidade ótima calculando o x do vértice da Equação da Figura 13. A umidade ótima foi de 30,61% e o p_d máximo foi de 1,515 g/cm³ para a curva A. Para a curva B, os valores foram de 31,32% e 1,553 g/cm³. As Tabelas 8 e 9 abarcam os dados das curvas de compactação de A1 e A2 e a Figura 13 e 14 expõem o gráfico com as equações que descrevem o comportamento das curvas.

Tabela 8 – Ensaio Proctor Amostra 1

Curva A		Curva B	
w (%)	p_d (g/ cm ³)	w (%)	p_d (g/ cm ³)
18,27	1,307	23,04	1,443
21,26	1,399	25,33	1,488
29,31	1,525	30,45	1,530
36,54	1,485	35,90	1,490
38,99	1,438	37,16	1,474

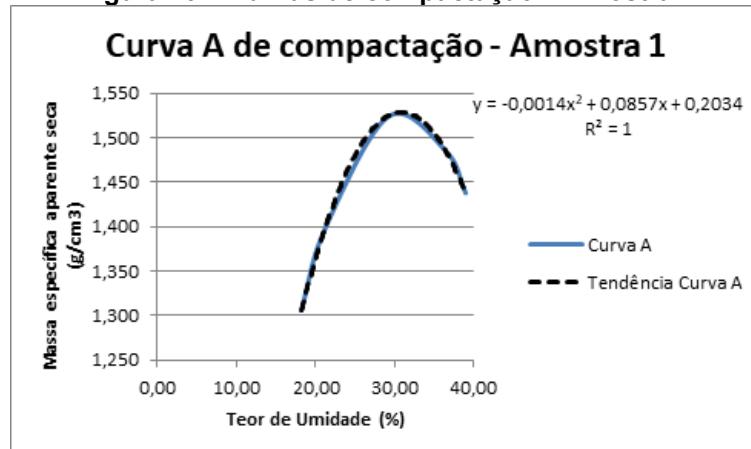
Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 9 – Análise percentual Amostra 1

Análise percentual - Amostra 1					
w média (%)	p _d A (g/cm ³)	p _d B (g/cm ³)	p _d xR ² A	p _d xR ² B	Variação entre as curvas (%)
20,655	1,376	1,395	1,376	1,391	1,08
23,295	1,440	1,465	1,440	1,461	1,44
29,88	1,514	1,555	1,514	1,550	2,32
36,22	1,471	1,527	1,471	1,522	3,35
38,075	1,437	1,498	1,437	1,493	3,75

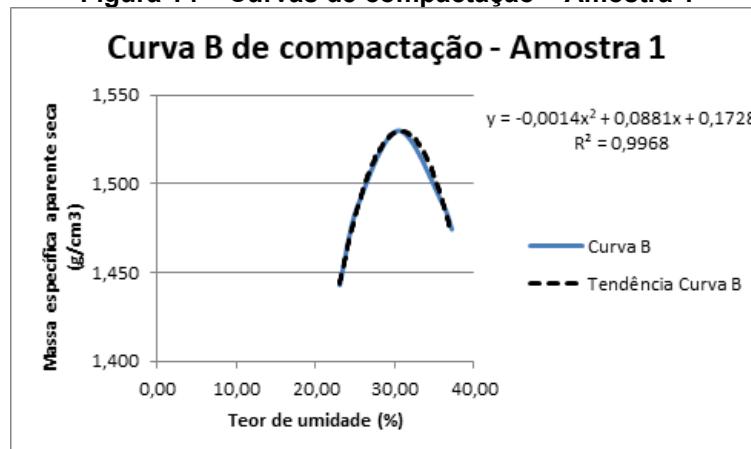
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13 – Curvas de compactação – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – Curvas de compactação – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

AMOSTRA 2:

A análise percentual exibiu variações abaixo de 2% para as umidades tratadas e esse resultado indica o comportamento extremamente parecido das curvas. A maior variação apresentada na Tabela 10, de 1,66%, foi vista no último ponto de umidade da curva. Reitera-se a observação da relevância do rigor da NBR 7182:2025 ao tratar das variações de umidade nos ensaios. As umidades ótimas e massas específicas aparentes secas máximas apresentaram valores aproximados, novamente reforçando o comportamento similar das duas curvas de compactação traçadas. Para a curva A, obteve-se umidade ótima de 11,46% e massa específica aparente seca máxima de 1,536 g/cm³. A

curva B apresentou os valores de 11,08% e 1,530 g/cm³. As Tabelas 10 e 11 descrevem o comportamento de compactação da Amostra 2 e a Figura 15 e 16 ilustram graficamente tal comportamento.

Tabela 10 – Ensaio Proctor Amostra 2

Curva A		Curva B	
w (%)	p _d (g/cm ³)	w (%)	p _d (g/cm ³)
3,49	1,082	3,69	1,103
5,28	1,266	5,57	1,282
10,87	1,533	9,58	1,525
11,62	1,523	12,16	1,516
13,65	1,497	13,27	1,502

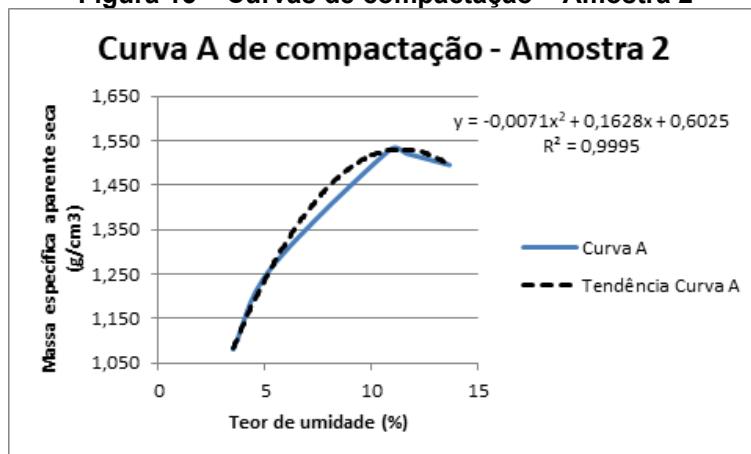
Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 11 – Análise percentual Amostra 2

Análise percentual - Amostra 2					
w média (%)	p _d A (g/cm ³)	p _d B (g/cm ³)	p _d xR ² A	p _d xR ² B	Variação entre as curvas (%)
3,59	1,095	1,086	1,095	1,084	1,00
5,43	1,277	1,277	1,276	1,274	0,16
10,23	1,525	1,524	1,524	1,521	0,20
11,89	1,534	1,525	1,534	1,521	0,85
13,46	1,507	1,485	1,507	1,482	1,66

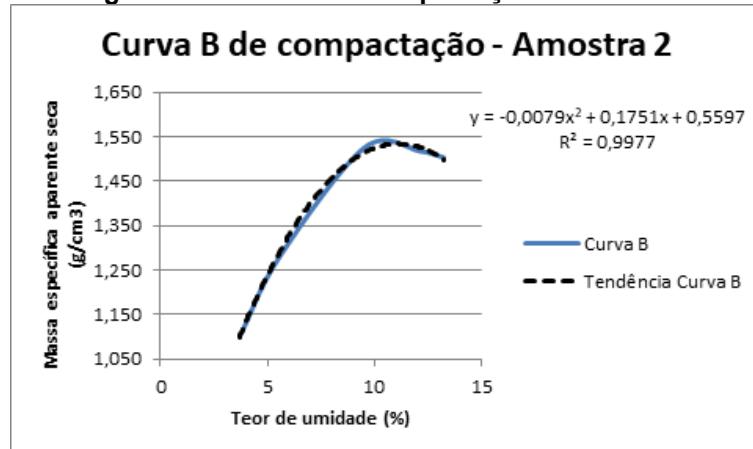
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 15 – Curvas de compactação – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 – Curvas de compactação – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

4.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

A análise dos resultados mostrou que as variações de umidade entre os corpos de prova foram muito pequenas, o que acabou influenciando diretamente o comportamento mecânico observado nos ensaios. Quando comparado os valores moldados com as umidades medidas antes da ruptura, percebeu-se que, na prática, a diferença real ficou abaixo do que era esperado para representar faixas distintas de umidade. Em boa parte das amostras, essa diferença ficou menor que 3%, valor que, segundo Caputo (2022) e Budhu (2015), não é suficiente para provocar mudanças significativas nas propriedades de resistência de solos argilosos. Na Amostra 1, por exemplo, a intenção era trabalhar com teores em torno de 25%, 30% e 35%. Apesar disso, os valores obtidos acabaram concentrados entre 18,9% e 23,3%, o que representa uma variação pequena e sem um padrão crescente. Na Amostra 2 ocorreu algo parecido: mesmo existindo valores extremos entre 13% e 22,9%, a maior parte dos corpos de prova ficou entre 13% e 18%, novamente sem espaçamento claro entre os pontos. Isso indica que, mesmo tendo moldado os corpos de prova com umidades diferentes, essas diferenças praticamente se perderam ao longo do intervalo entre a moldagem e o ensaio. Um dos fatores que provavelmente contribuiu para essa pouca variação foi a envelopagem inadequada. Como vários autores explicam — entre eles Koch (2024), Oliveira Júnior et al. (2022) e Keller et al. (2011) — solos finos perdem umidade com facilidade quando não estão devidamente isolados. Assim, mesmo pequenas exposições ao ar podem reduzir o teor de água de forma homogênea em todos os corpos de prova, o que faz com que todos tendam a um mesmo valor final, anulando as diferenças inicialmente programadas. Essa condição pode ser observada nos resultados, já que alguns corpos de prova ficaram com valores de umidade praticamente iguais, chegando a variar menos de 1% entre si. Com isso, não foi possível identificar um comportamento claro de aumento ou diminuição da resistência em função do teor de umidade, já que o parâmetro praticamente não se alterou entre os ensaios.

Como encaminhamento para estudos futuros, seria recomendável utilizar um método de envelopagem certificada, aplicando dupla camada de filme plástico ou acondicionamento em recipientes completamente herméticos logo após a moldagem. Isso ajudaria a garantir que cada corpo de prova realmente permanecesse com o teor de água definido inicialmente, permitindo que a influência da umidade na resistência fosse analisada com precisão e segurança estatística. As Tabelas 12 e 13 contêm as tensões resistidas por cada corpo de prova, enquanto os gráficos completos das curvas de tensão × deformação e a análise percentual detalhada encontram-se no Apêndice A, que reúne todos os gráficos referentes ao ensaio de compressão das Amostras 1 e 2.

Tabela 12 – Resistência à compressão da amostra 1

Amostra 1 - Curva A					
w (%)	19,01	20,14	20,7	20,94	21,21
def.	0,028	0,0377	0,0451	0,0343	0,0353
p (kPa)	292,29	201,39	322,19	300,3	358,29
Amostra 1 - Curva B					
w (%)	18,91	20,42	20,58	20,63	23,38
def.	0,037	0,034	0,0445	0,0529	0,0473
p (kPa)	127,87	377,99	236,33	240,59	314,74

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 13 - Resistência à compressão da amostra 2

Amostra 2 - Curva A					
w (%)	13,05	15,1	18,81	21,68	22,92
def.	0,0328	0,0594	0,0535	0,07	0,0905
p (kPa)	167,89	324,69	296,15	288,02	241,74
Amostra 2 - Curva B					
w (%)	13,12	13,93	14,78	19,93	22,33
def.	0,0315	0,03	0,0679	0,0472	0,0879
p (kPa)	176,48	266,89	400,66	349,63	225,42

Fonte: Autoria própria (2025).

5 CONCLUSÃO

A análise realizada permitiu avaliar com maior precisão a influência da umidade nas amostras de solos argilosos provenientes de Anápolis e Nerópolis. No ensaio de teor de umidade, a Amostra 1 apresentou umidade média de 14,91%, enquanto a Amostra 2 atingiu 26,05%.

A massa específica dos sólidos no ensaio também evidenciou diferenças significativas entre os materiais: a Amostra 1 apresentou valor de 1,273 g/cm³, ao passo que a Amostra 2 alcançou 2,045 g/cm³, indicando, teoricamente, menor índice de vazios e melhor capacidade de suporte para a Amostra 2, conforme apontado na literatura técnica.

Nos ensaios de limites de liquidez e plasticidade, a Amostra 1 apresentou Limite de Liquidez (LL) de 40,13% e Limite de Plasticidade (LP) de 9,00%, resultando em um Índice de Plasticidade (IP) de 31,13%. Já a Amostra 2 apresentou LL de 48,11%, LP de 15,00% e IP de 33,11%. Ambos os valores de IP situam-se na faixa de 17% a 35%, classificando os solos como altamente plásticos, característica típica de solos argilosos com elevada capacidade de retenção de água e boa moldabilidade.

No ensaio de compactação Proctor, a Amostra 1 apresentou umidade ótima de 30,61% e massa específica aparente seca máxima de 1,515 g/cm³ (Curva A), enquanto na Curva B foram obtidos 31,32% e 1,553 g/cm³, respectivamente. Para a Amostra 2, a umidade ótima foi de 11,46% e a massa específica seca máxima de 1,536 g/cm³ (Curva A), e 11,08% e 1,530 g/cm³ (Curva B). Esses resultados confirmam a coerência entre as curvas obtidas e o comportamento esperado para solos argilosos, evidenciando boa reprodutibilidade do ensaio.

Entretanto, o ensaio de resistência à compressão não confinada não apresentou resultados consistentes com a hipótese inicial. Na Amostra 1, os teores de umidade dos corpos de prova concentraram-se entre 18,9% e 23,3%, enquanto na Amostra 2 a maioria dos valores permaneceu entre 13% e 18%, com variações inferiores a 3% entre diversos corpos de prova, e em alguns casos inferiores a 1%. Essa baixa variabilidade, possivelmente causada por falhas na envelopagem e no armazenamento das amostras, comprometeu a análise da influência da umidade na resistência, tornando impossível identificar uma tendência clara de aumento ou diminuição da resistência em função do teor de água.

Dessa forma, conclui-se que, embora os demais ensaios tenham apresentado resultados coerentes e de acordo com a literatura estudada durante a produção deste artigo, o ensaio de compressão não confinada não apresentou os resultados previstos. Em razão de falhas no procedimento e no armazenamento dos corpos de prova, os valores encontrados não corroboraram a hipótese inicial. Para atingir resultados confiáveis, seria indispensável repetir o ensaio com maior rigor e atenção às etapas prescritas pelas normas técnicas.

Em síntese, o estudo reforça que o controle da umidade é um dos fatores mais determinantes no comportamento dos solos argilosos, influenciando diretamente parâmetros como plasticidade, compactação e resistência. A diferença observada entre as amostras ressalta a importância de conhecer as características físicas e mecânicas dos solos que serão trabalhados nas obras, pois tais diferenças exigem diferentes técnicas ou tratamentos para que haja a viabilização da edificação. Portanto, sua correta determinação e manutenção são essenciais para garantir a segurança e o desempenho adequado em obras geotécnicas e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Mônica Regina Marques Palermo de; NOVAES, Amanda Cardoso; GUARINO, Alcides Wagner Serpa. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*, v. 25, p. 1145-1154, 2002.
- AKSU, I.; BAZILEVSKAYA, E.; KARPYN, Z. T. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, v. 7, p. 1-13, 2015.
- AL-ANI, Thair; SARAPÄÄ, Olli. Clay and clay mineralogy. Physical-chemical properties and industrial uses, p. 11-65, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos – Classificação. Rio de Janeiro. 1995.
- AZEVEDO, André Luis Cairo de. Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010.
- BARAKAN, Shima; AGHAZADEH, Valeh. The advantages of clay mineral modification methods for enhancing adsorption efficiency in wastewater treatment: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 3, p. 2572-2599, 2021.

BELGHAZDIS, Mohammed; HACHEM, El-Kaber. Clay and clay minerals: a detailed review. *International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS)*, v. 4, n. 2, p. 54-75, 2022.

BUDHU, Muni. *Soil mechanics and foundations*. New York: John Wiley & Sons, 2000.

BUDHU, Muni. *Soil mechanics fundamentals*. John Wiley & Sons, 2015.

BURLAND, John B. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, v. 40, n. 3, p. 329-378, 1990.

CALARESI, Anna Carolina Marques Ayres *et al.* Relação das propriedades de três argilas caulíníticas com o teor de matéria orgânica. *Anais*, p. 380-388, 2014.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos*. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. *Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. E-book. ISBN 9788521638032.

CAVADAS, Bento *et al.* Uma abordagem interdisciplinar à porosidade dos solos em contexto de formação de professores. *Revista Experiências em Ensino de Ciências*, v. 15, n. 1, p. 194-206, 2020.

CLASSIFICAÇÃO de solos. Portal Embrapa, 2021

CODUTO, Donald P. *Geotechnical engineering: principles and practices*. 2. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2017.

ELHAKIM, Amr F. Estimation of soil permeability. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 3, p. 2631-2638, 2016.

FREIRE, Nanda. Assentamento: Conceito e Aplicações na Engenharia. Nanda Freire, 12 jul. 2023. Disponível em: <https://www.nandafreire.com.br/glossario/assentamento-conceito-e-aplicacoes-na-engenharia/>. Acesso em 12 abr. 2025.

FLORIANO, Cleber. *Mecânica dos solos*. 1 ed. Porto Alegre: SAGAH, 2016.

IAEG, Rock. Soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Eng. Geol. Mapping. *Bulletin of the IAEG*, n. 24, p. 235–274, 1979.

KELLER, Thomas *et al.* Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v. 163, n. 1-2, p. 13-23, 2011.

KOCH, Taline. Influência da variação de umidade pós-compactação na deformabilidade de um solo argiloso laterítico empregado como subleito rodoviário. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024.

LEPSCH, Igo F. *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

MARINHO, Filipe. Limite de liquidez e limite de plasticidade. Guia da Engenharia, 4 mai. 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/limite-liquidez-plasticidade/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

MARTINS, Rebeca Cavchia. Avaliação da influência da composição solo-cal-tiras de polietileno tereftalato (PET) na resistência ao cisalhamento de solo argiloso. 2023.

MURRIETA, Pedro. Mecânica dos Solos. 1 ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018.

NAWAZ, Muhammad Farrakh; BOURRIE, Guilhem; TROLARD, Fabienne. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, p. 291-309, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcy de; JUCÁ, José Fernando Thomé; GUEDES, Flávio Leônicio; ARAGÃO JÚNIOR, Wilson Ramos; SANTOS JÚNIOR, José Ivan dos. Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solos argilosos com fibras. COBRAMSEG, 2022.

PEREIRA, Marcos Gervasio *et al.* Formação e caracterização de solos. 2019.

PEREIRA, Nayana Alves. Porosidade do solo: como os poros influenciam a infiltração e o armazenamento de água no solo? Agroadvance, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-porosidade-do-solo/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

QUEIROZ, Rudney C. Geologia e geotecnica básica para engenharia civil. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

RODRÍGUEZ, Jaqueline Ruiz. Estudo da viabilidade geológica, geotécnica e geoquímica de solos argilosos como barreiras selantes-Vale do Ribeira (SP), 2013.

SANTOS, Monique Nascimento dos. Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra. Orientadores: Khosrow Ghavami, André Ricardo Alves Guedes Pinto. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, Palloma Ribeiro Cuba dos; DAIBERT, João D. Análise dos Solos. 1 ed. Rio de Janeiro: Érica, 2013.

SHEARD, R. W. Sand, silt and clay. Sport Turf Newslett. Disponível em: <https://www.sportsturfcanada.com/>. Acesso em: 26 jul. 2021.

SILVA, Albaniza Maria da *et al.* Avaliação de um solo em termos de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, considerando resultados de diferentes tipos de compactação. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 39, n. 3, p. 41-47, 2016.

SILVA, Leonardo Rodrigues Eiras. Compactação do solo. Monografia defendida e aprovada na Universidade São Francisco, 2008.

SINGH, Amardeep; NOOR, Shahid. Soil compression index prediction model for fine grained soils. *Int. J. Innov. Eng. Technol.*, v. 1, n. 4, p. 34-37, 2012.

SINGH, Nakshatra Bahadur. Clays and clay minerals in the construction industry. Minerals, v. 12, n. 3, p. 301, 2022.

SOBREIRA, Danielle Savala Vieira *et al.* Comparação entre os métodos de compactação de solos por impacto e por amassamento. 2014.

VELDE, Bruce (Ed.). Origin and mineralogy of clays: clays and the environment. Springer Science & Business Media, 2013.

VERRUIJT, Arnold. Consolidation of soils. Encyclopedia of Hydrological Sciences, p. 15, 2008.

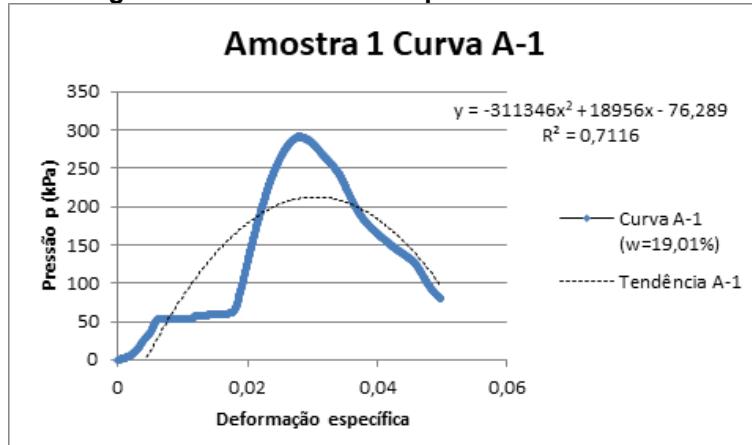
VILLAR, L. F. S.; DE CAMPOS, T. M. P.; ZORNBERG, J. G. Relação entre a resistência à tração obtida via ensaio brasileiro, a succção e índices físicos de um solo. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador–Bahia, 2007.

YALCIN, Ali. The effects of clay on landslides: A case study. Applied Clay Science, v. 38, n. 1-2, p. 77-85, 2007.

APÊNDICE A

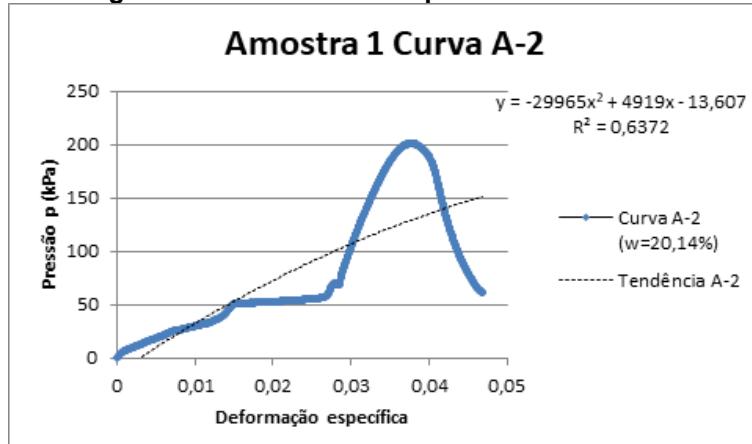
Figuras referentes ao ensaio de compressão da Amostra 1 - Curva A:

Figura 17 – Curvas de compressão – Amostra 1



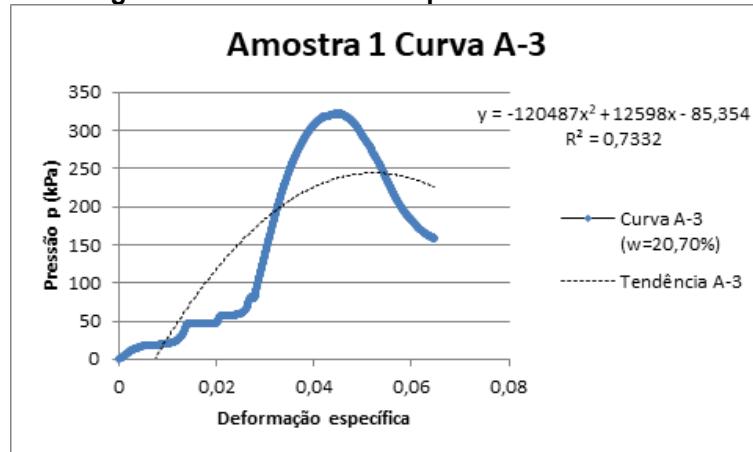
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18 – Curvas de compressão – Amostra 1



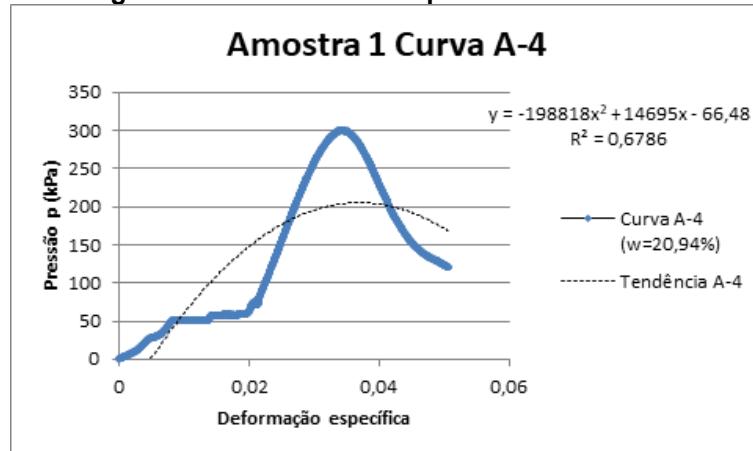
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 19 – Curvas de compressão – Amostra 1



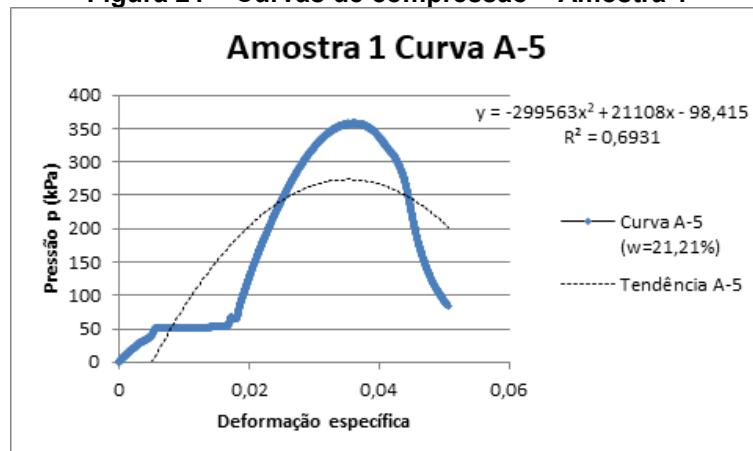
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 20 – Curvas de compressão – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

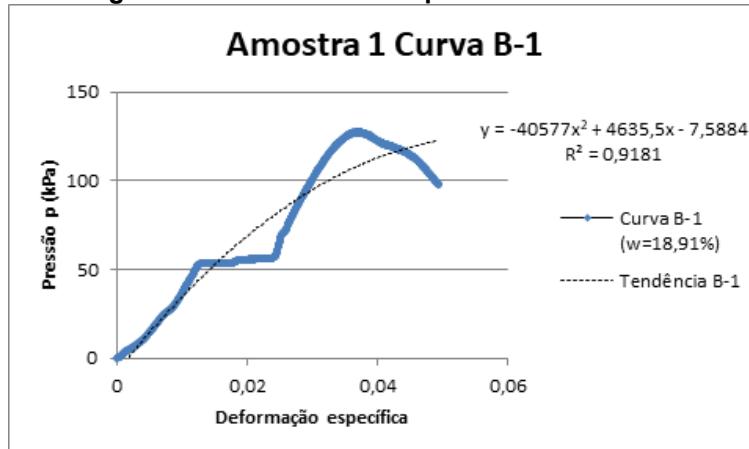
Figura 21 – Curvas de compressão – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

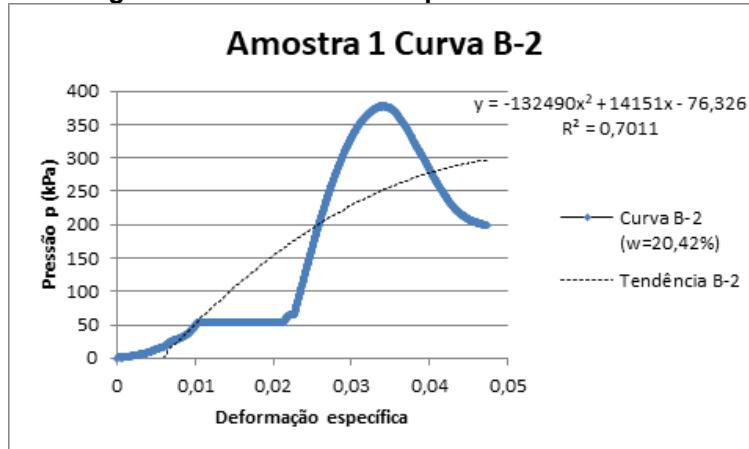
Figuras referentes ao ensaio de compressão da Amostra 1 - Curva B:

Figura 22 – Curvas de compressão – Amostra 1



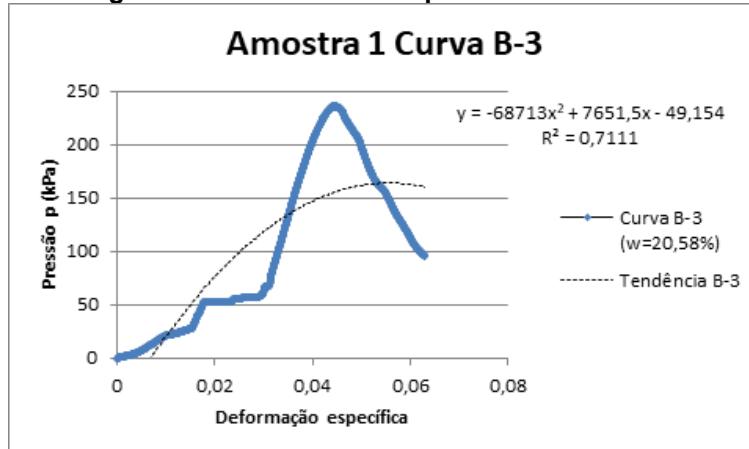
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 23 – Curvas de compressão – Amostra 1



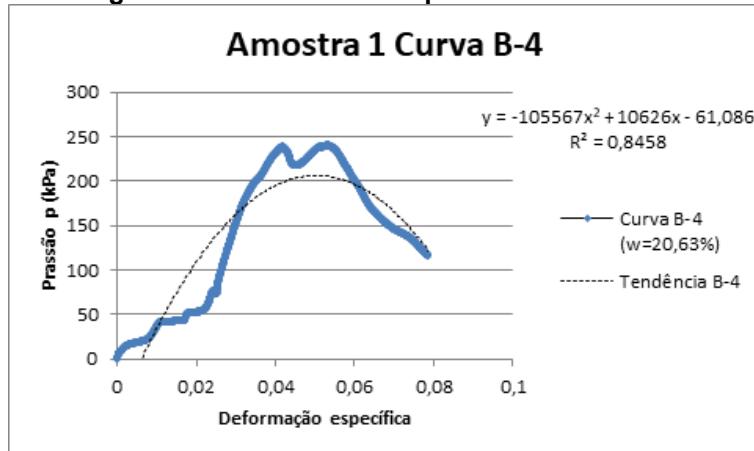
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 24 – Curvas de compressão – Amostra 1



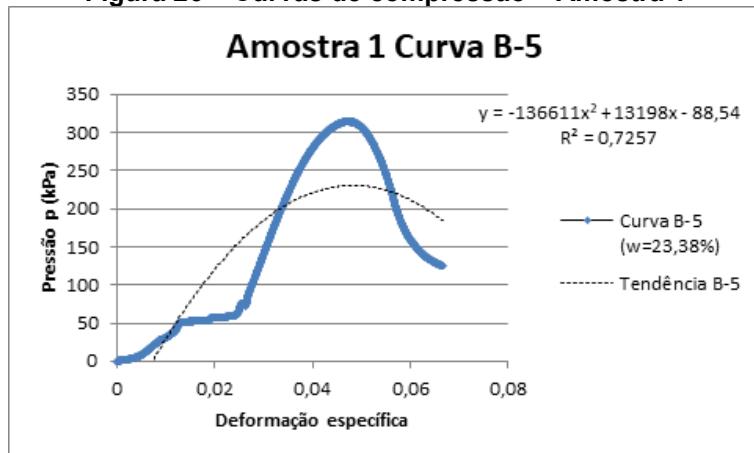
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 – Curvas de compressão – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 26 – Curvas de compressão – Amostra 1



Fonte: Autoria própria (2025).

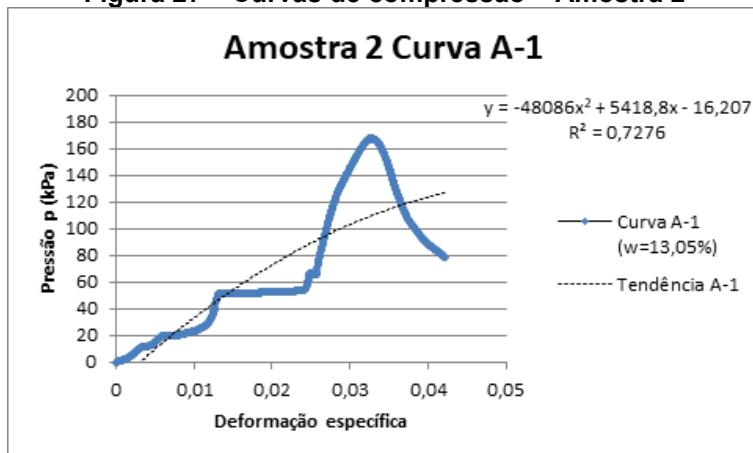
Tabela referente à análise de percentual da Amostra 1:

Análise percentual - Amostra 1						
w média (%)	def. média	p A (kPa)	p B (kPa)	pxR² A	pxR² B	Var. entre as curvas (%)
18,96	0,0325	210,922	100,2059	150,0919	91,9990	38,41
20,28	0,0359	124,227	260,7082	79,1577	182,7825	56,69
20,64	0,0448	237,214	155,7235	173,9254	110,7350	36,33
20,79	0,0436	196,277	201,5290	133,1935	170,4532	21,86
22,30	0,0413	262,384	-	181,8582	-	100,00
				9401555790,9511	6822709037,4932	

Fonte: Autoria própria (2025).

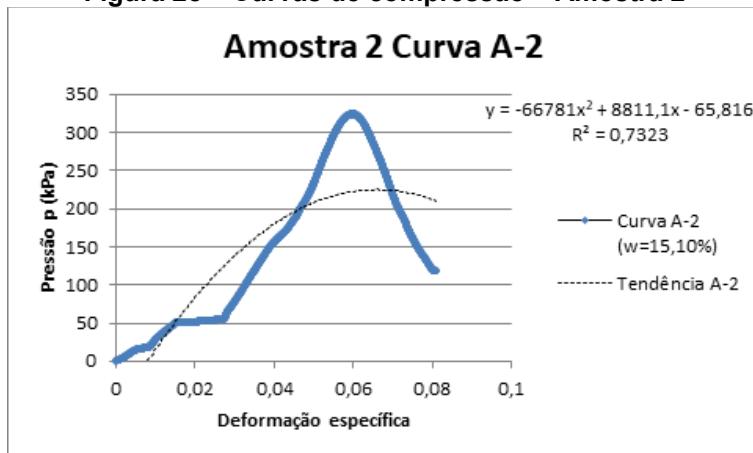
Figuras referentes ao ensaio de compressão da Amostra 2 - Curva A:

Figura 27 – Curvas de compressão – Amostra 2



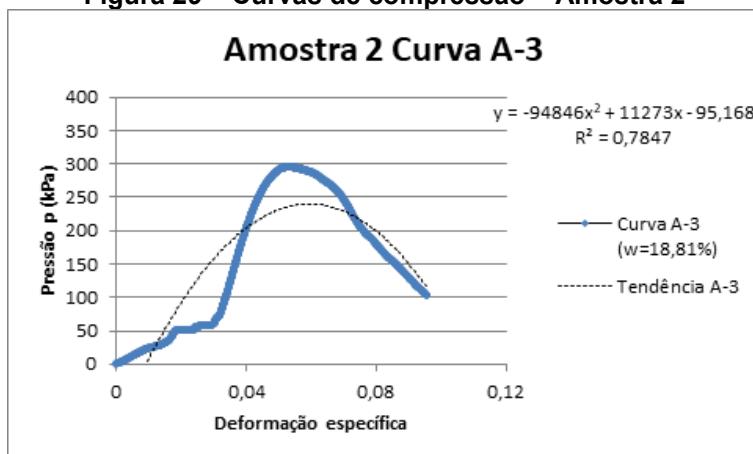
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 28 – Curvas de compressão – Amostra 2



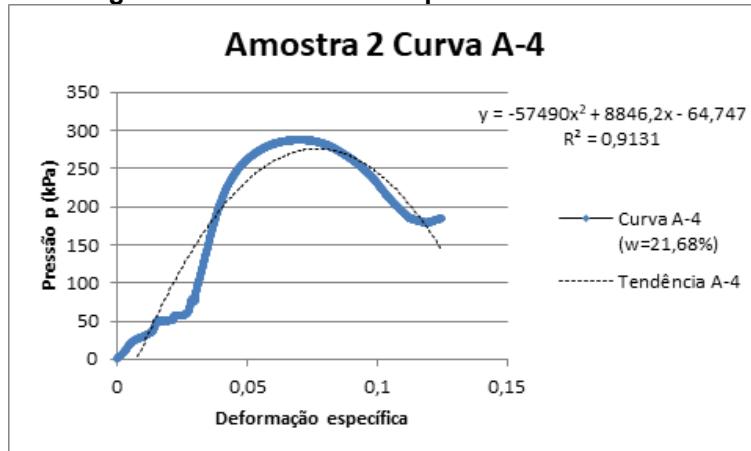
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29 – Curvas de compressão – Amostra 2



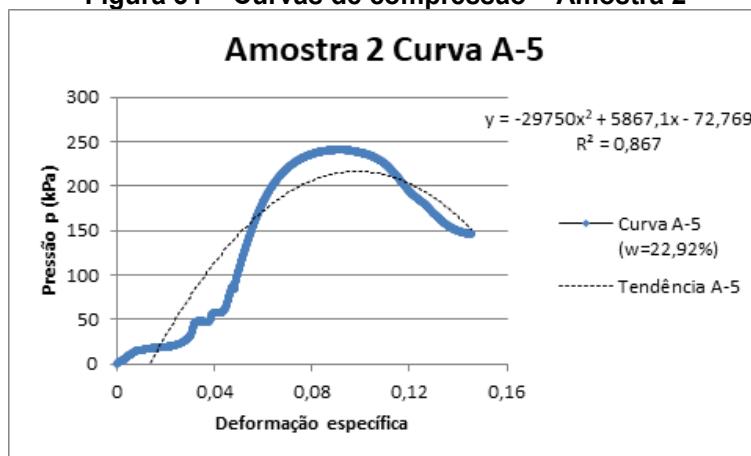
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 30 – Curvas de compressão – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

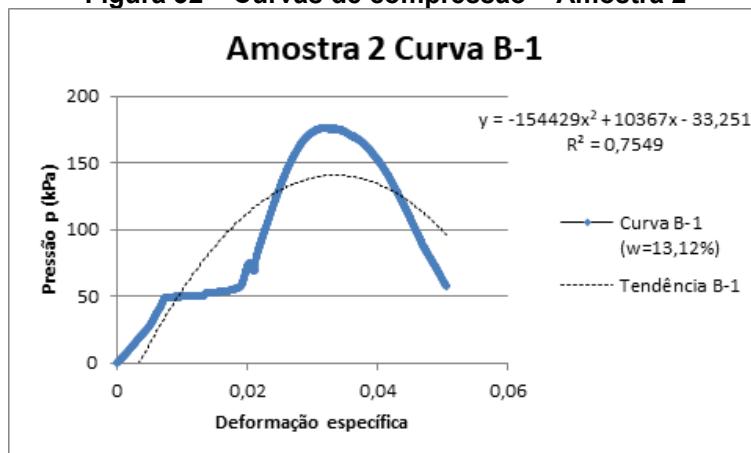
Figura 31 – Curvas de compressão – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

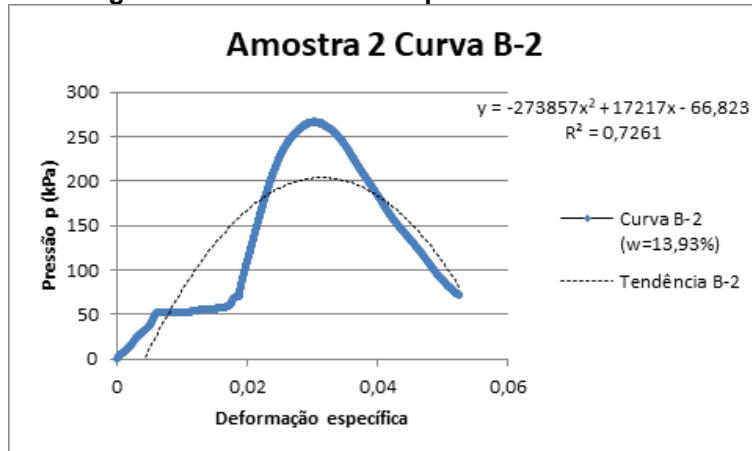
Figuras referentes ao ensaio de compressão da Amostra 2 - Curva B:

Figura 32 – Curvas de compressão – Amostra 2



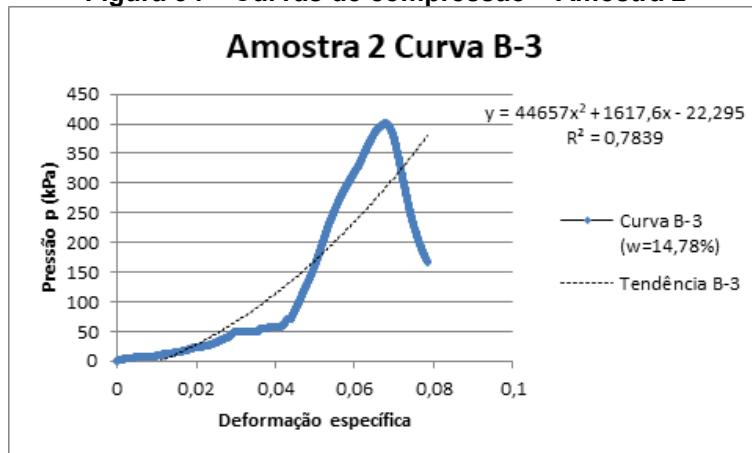
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 33 – Curvas de compressão – Amostra 2



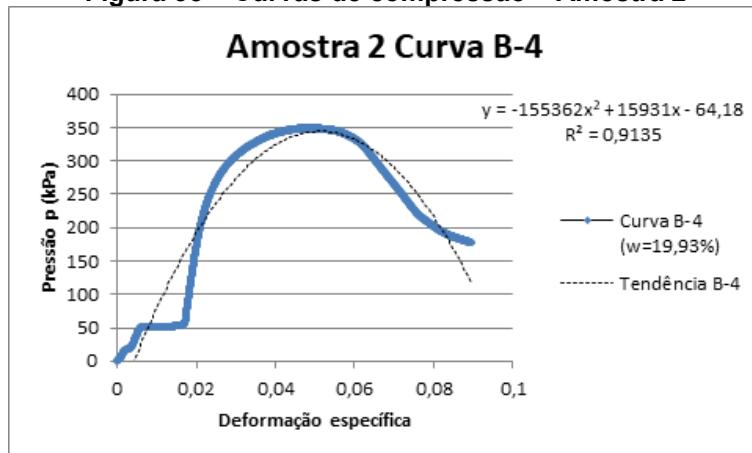
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 34 – Curvas de compressão – Amostra 2



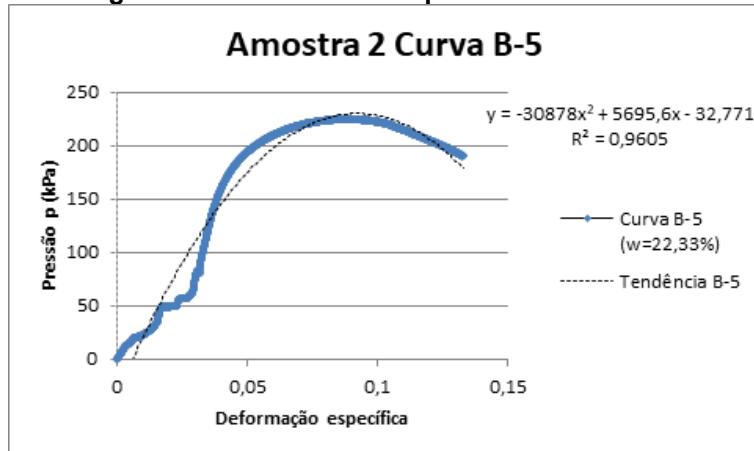
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 35 – Curvas de compressão – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 36 – Curvas de compressão – Amostra 2



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela referente à análise de percentual da Amostra 2:

Análise percentual - Amostra 1						
w média (%)	def. média	p_A (kPa)	p_B (kPa)	$p_x R^2 A$	$p_x R^2 B$	Var. entre as curvas (%)
13,09	0,0322	108,305	140,4268	78,8025	106,0082	25,66
14,52	0,0447	194,606	155,5860	142,5098	112,9710	20,73
16,80	0,0607	239,644	-88,6449	188,0486	-69,4888	136,95
20,81	0,0586	256,222	335,8697	233,9563	306,8170	23,75
22,63	0,0892	213,866	229,5379	185,4221	220,4711	15,90

Fonte: Autoria própria (2025).