

Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Silto-Arenoso na Região de Bragança: Ensaio de Corte Direto

Issan Pereira da Silva Júnior

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão,
para obtenção do Grau de Mestre em: Engenharia da Construção.

Versão após a defesa pública.

Orientado por:

Professor Doutor António Miguel Verdelho Paula

Professor Doutor José Alexandre de Carvalho Gonçalves

Bragança

2020

Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Silto-Arenoso na Região de Bragança: Ensaio de Corte Direto

Issan Pereira da Silva Júnior

Dissertação apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
do Instituto Politécnico de Bragança, para obtenção do Grau de Mestre em:

Engenharia da Construção.

No âmbito da dupla diplomação com a *UniEvangelica*.

**Relatório da UC de Projeto Profissional
Mestrado em Engenharia Construção
Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

Orientado por:

Professor Doutor António Miguel Verdelho Paula

Professor Doutor José Alexandre de Carvalho Gonçalves

Bragança

2020

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que amo!

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre abençoou e esteve ao meu lado durante esta caminhada.

Em especial aos meus pais Issam e Marlene, a minha irmã Bárbara Luisa e toda a minha família, que ao longo de todos esses anos sempre apoiaram e permaneceram comigo nessa trajetória. Apesar da distância, a todo momento foram os principais provedores de incentivo e amor. Pessoas que sempre acreditaram em mim e nunca mediram esforços para me dar as condições de chegar até aqui.

Também aos meus grandes amigos, pela amizade e companheirismo que tivemos em todos esses anos, em especial Karina Andrade, Mariana Castanheiro, Maria Cristina Muniz, Rafael Palmeira, Rita Rodrigues e Thales Abrão, que sempre acompanharam e auxiliaram na realização desse trabalho. Assim como a todos os amigos e colegas que fiz em Portugal e no Brasil, que se tornaram pessoas especiais e ajudaram bastante nessa nova experiência de vida, tornando sempre mais fácil e especial toda a trajetória.

Aos meus orientadores Professor PhD. António Miguel Verdelho Paula e Professor Doutor José Alexandre de Carvalho Gonçalves, por aceitar esse desafio e fornecer todo o suporte e dedicação para a realização deste trabalho, mas também a todos os professores que já tive durante este percurso, os quais tenho muito orgulho e devo todo o meu conhecimento.

Agradeço também ao IPB e a UniEvangélica que sempre disponibilizou todos os recursos necessários, e a todos os seus funcionários, em especial a Engenheira Hermínia Moares e os técnicos do Laboratório de Geotecnia do IPB, por sempre fornecerem todo o apoio indispensável para a realização deste trabalho, além do Engenheiro José Batista,

que juntamente com o Professor José Alexandre de Carvalho Gonçalves, tornaram viável a execução do corte direto automatizado.

Por fim, as pessoas que mesmo indiretamente fizeram parte de toda essa trajetória.

A todos, muito obrigado !

Resumo

As crescentes inovações da construção civil implicam numa maior necessidade de estudos detalhados da estrutura geotécnica do local de implantação, contudo, a pluralidade de maciços terrosos origina pesquisas de alta complexibilidade, o que tem impulsionado o desenvolvimento de estudos e ensaios cada vez mais modernos e detalhados. Em vista disso, esta dissertação vem como uma contribuição literária para a avaliação do comportamento mecânico dos solos, com ênfase no ensaio de corte direto automatizado. Para isso, a proposta deste trabalho busca caracterizar a resistência mecânica de um solo arenoso-siltoso localizado na região de Bragança-Portugal através dos equipamentos de corte direto associado a uma configuração experimental baseada na abordagem LabVIEW, sensores LVDT e uma placa de aquisição de dados. Dessa forma, a configuração descrita garante repetibilidade e automação dos dados, evitando erros humanos durante a realização dos ensaios. O corte direto é o mais antigo e usual teste laboratorial para avaliar os parâmetros mecânicos dos solos através do critério de Mohr-Coulomb e é orientado pela norma ASTM D-3080/D-3080M-11. Ao decorrer da dissertação, são apresentadas as principais generalidades dos ensaios laboratoriais, as etapas do ensaio de corte direto e as metodologias para utilização do equipamento e realização dos ensaios. Sendo ao final, apresentada a análise dos resultados obtidos, o que permite verificar que o solo estudado é de baixa compacidade e apresenta características de rotura plástica, além de demonstrar que a velocidade de carregamento não apresentou uma influência significativa na capacidade resistente dos solos testados sob mesma tensão normal.

Palavras-chave: Caracterização mecânica; corte direto; ensaio laboratorial.

Abstract

The growing innovations of construction imply a greater need for detailed studies of the geotechnical structure of the location. However, the plurality of earthy massifs originates highly complex research, which has driven the development of increasingly modern and detailed studies and tests. In this scenario, this dissertation comes as a literary contribution to the evaluation of the mechanical behaviour of soils, with emphasis on automated direct shear. The purpose of this study is to characterise the mechanical strength of a sandy-silt soil located in the region of Bragança-Portugal. This is was made through direct shear equipment associated with an experimental configuration based on the LabVIEW approach, LVDT sensors and a data acquisition board. The configuration described ensures repeatability and automation of the data, avoiding human errors during the tests. Direct shear is the oldest and most usual laboratory test to evaluate the mechanical parameters of soils through the Mohr-Coulomb criterion and is guided by the ASTM D-3080/D-3080M-11 standard "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions". During the dissertation, the main generalities of laboratory tests, the stages of the direct shear test and the methodologies for using the equipment and conducting the tests are presented. The results allow to verify that the analysed soil is of low compactness and presents characteristics of plastic rupture. The analysis also demonstrated that the loading speed did not have a significant influence on the resistant capacity of the tested soil under same normal stress.

Keywords: Mechanical characterisation; direct shear; laboratory test.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento Teórico	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Considerações Iniciais	4
2.2	Resistência ao Corte do Solo	5
2.3	Generalidades de Ensaios Laboratoriais de Caracterização Mecânica e de Deformabilidade de Solos	10
2.3.1	Ensaio de Corte Direto	11
2.3.2	Ensaio Triaxial	13
2.3.3	Ensaio de Corte Direto Simples - (DSS)	15
2.3.4	Ensaio Edométrico	17
2.4	Ensaio de Corte Direto	19
2.5	Considerações Finais	28
3	Programa de Trabalhos	30
3.1	Considerações Iniciais	30
3.2	Descrição do Trabalho de Ensaios	31
3.2.1	Amostragem	31
3.2.2	Ensaios de Caracterização Física do Solo	34

3.2.2.1	Ensaio de Limites de Atterberg	34
3.2.2.2	Pesos Volúmicos e Teor em Água	35
3.2.2.3	Ensaio de Compactação Proctor	35
3.2.2.4	Ensaio de Granulometria	36
3.2.2.5	Classificação Unificada do Solo	38
3.3	Preparação da Amostra em Laboratório	39
3.4	Equipamento de Corte Direto	42
3.4.1	Dispositivo de Corte	42
3.4.2	Caixa de Corte	44
3.4.3	Painel de Controle	45
3.4.4	Dispositivo de Carregamento	46
3.4.5	Sistema de Aquisição de Dados	47
3.5	Considerações Finais	50
4	Apresentação de Resultados	51
4.1	Considerações Iniciais	51
4.2	Metodologia de Ensaio	52
4.3	Resultados e Análises	56
4.4	Considerações Finais	64
5	Conclusão	65
5.1	Conclusões Finais	65
5.2	Propostas de Trabalhos Futuros	67
	Bibliografia	69

Lista de Tabelas

3.1	Programa de trabalhos para a execução do ensaio de corte direto	31
3.2	Resultados do Ensaio dos Limites de Atterberg.	34
3.3	Resultados dos Pesos Volúmicos e do Teor em Água.	35
3.4	Resultado do Ensaio de Compactação Proctor.	36
3.5	Frações e Distribuições Granulométricas da amostra	38
3.6	Diâmetros Efetivos e Valor dos Coeficientes	38
3.7	Nomenclaturas da Classificação Unificada - <i>ASTM D 2487-98</i> [1].	39
3.8	Parametrização dos Índices Físicos da Amostra Indeformada.	41
4.1	Valores de tensões tangenciais máximas para cada ensaio realizado.	59
4.2	Equações "y" das retas formadas pelo critério de Mohr-Coulomb.	63
4.3	Parâmetros de coesão e ângulo de atrito para diferentes taxas de corte.	63

Lista de Figuras

2.1	Exemplos simplificados de rotura mecânica dos solos em: corte em taludes, paredes de retenção e fundações [2].	5
2.2	a) Tensão de Corte no bloco; b) representação das tensões de corte.	6
2.3	Zona fraca, zona de corte e superfície de de corte, [3].	7
2.4	Esquema simplificado do processo de dimensionamento de estruturas geotécnicas com base em ensaios de laboratório, [4].	11
2.5	Caixa de corte utilizado no ensaio de Corte Direto do Laboratorio de Geotecnica da Estig-IPB.	12
2.6	Ensaio de Compressão Triaxial: esquema detalhado do aparelho [4]	14
2.7	Ensaio de corte direto simples: esquema simplificado do aparelho [4]	15
2.8	a) Estado de tensão-deformação de corte simples; b) estado de tensão existente numa outra amostra submetida a ensaio no aparelho representando na Figura [2.7]. [4]	16
2.9	Analogia de Terzaghi relativa ao comportamento do solo fino saturado.	17
2.10	Esquema simplificado do ensaio edométrico. [4]	18
2.11	a)Equipamento de Corte desenvolvido por Collin; b)Princípio inicial do controle de tensão na caixa de corte. [2]	20
2.12	Esquema de um aparelho de corte direto [4].	21
2.13	a) Diagrama de Morh-Coulomb (Tensão Efetiva Vertical); b)Curva “Tensão de Corte vs Deslocamento de Corte” para 3 ensaios de Corte Direto.	22
2.14	Rotação das tensões principais num ensaio de corte direto. [4]	24
2.15	Efeito do corte na estrutura dos grãos em areias [2].	25

2.16	Característica de corte nas areias densas e soltas:(a)tensão de corte e (b)mudança de volume, ambas plotadas contra o deslocamento [2].	26
2.17	Derivação do tempo de rotura a partir da curva de consolidação.	28
3.1	Local de retirada das amostras para estudo.	32
3.2	a)Corte no terreno em estudo; b)Vala aberta para cravação dos moldes. . .	33
3.3	a)Regularização manual da superfície; b)Cravação dos amostradores no solo; c)Escavação manual para retirada dos moldes	33
3.4	Gráfico da Curva de Compactação Proctor	36
3.5	Gráfico da Curva Granulométrica.	37
3.6	a)Compactador; b) Camada de solo escarificada; c) Amostra final reconstituída.	42
3.7	Dispositivo de Corte do Ensaio de Corte Direto.	43
3.8	a) Painel de Controle do Ensaio; b) Sistema de Alavanca para aplicação de Força Axial; c) Suporte da Caixa de Corte; d) Caixa de Corte.	43
3.9	Esquema transversal da caixa de corte.	45
3.10	Desenho esquemático do Painel de Controle;	46
3.11	a)Alavanca e Pesos; b)Sistema de aplicação da carga axial ; c) Anel dinamométrico.	47
3.12	Painel de Interface do usuário.	48
3.13	Instrumentação LVDT para aparelhos de corte direto.	49
4.1	Esquema plano de desenvolvimento do ensaio.	52
4.2	a) Caixa de corte com a ligação; b) Placas de montagem; c)Caixa de corte finalizada.	53
4.3	a) Processo de consolidação da amostra; b)Gráfico da consolidação em função da raiz quadrada do tempo.	54
4.4	a) Rotura da amostra após o ensaio de corte direto; b) Amostras ensaiadas.	56

4.5	Curva "Tensão de Corte x Deslocamento"para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 75 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.	58
4.6	Curva "Tensão de Corte x Deslocamento"para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 150 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.	58
4.7	Curva "Tensão de Corte x Deslocamento"para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 300 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.	59
4.8	Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal"para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 75 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.	61
4.9	Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal"para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 150 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.	61
4.10	Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal"para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 300 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.	62
4.11	Diagrama de Mohr-Coulomb para 9 testes realizados sobre variações cargas verticais e velocidades de deslocamento.	62

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento Teórico

As crescentes inovações tecnológicas no setor da construção civil têm permitido cada vez mais a utilização de materiais e processos que facilitam a edificação de estruturas consideradas de alta complexibilidade. Por consequência, obtém-se uma maior necessidade de estudos detalhados acerca da estrutura geotécnica do local e sua parametrização, com o objetivo de evitar um possível colapso da estrutura por falhas geotécnicas.

Nesse contexto, é importante salientar a alta dificuldade de estudos referente ao comportamento dos maciços terrosos, dado sua elevada diversidade, anisotropia e heterogeneidade em seu estado natural, os quais apresentam grande dependência do seu histórico de tensões. Essa pluralidade de maciços tem impulsionado o desenvolvimento e as modernizações dos estudos e ensaios baseados nas teorias clássicas e modernas.

Essas modernizações permitem que a engenharia geotécnica analise e identifique as características físicas e mecânicas do solo de fundação de forma detalhada, o que permite prever de maneira precisa como será o comportamento do maciço após aplicação de carga, quantificar a sua capacidade resistente e identificar fatores que influenciam esses aspectos, diminuindo as possíveis anomalias a serem provocadas pela estrutura da construção no solo. Como resultado, obtém-se estruturas de fundação mais seguras e econômicas.

Contudo, nas reconrentes obras de construção civil, ainda são recorrentes anomalias e acidentes provocados pela falta ou pouco estudo dos parâmetros geotécnicos. Sendo assim, para esses muitos problemas de engenharia, a definição correta da capacidade resistente ao corte dos solos é importante e recorrente, já que se traduz na correta obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno, obtidos de forma rápida e econômica através do ensaio de corte direto.

Este tipo de ensaio é o mais antigo e usual método para caracterizar a resistência do solo quanto a ação de corte e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb, determinando os referidos parâmetros através da relação entre tensão normal, tensão de corte e deslocamentos horizontais. Todavia, os ensaios são realizados em termos de tensões efetivas verticais, não permitindo a medição de pressões neutras e nem a drenagem da amostra.

1.2 Objetivos

O desenvolvimento do presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento mecânico de um solo localizado na região de Bragança-Portugal quando exposto a ação de corte, através da realização de ensaios com o equipamento de corte direto automatizado, estando as amostras indeformadas e reconstituídas sujeitas a variadas cargas axiais e velocidades de carregamento. Sendo posteriormente realizada uma completa análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

Portanto, os objetivos específicos são:

- Estudar o efeito da ação de corte nos solos e os ensaios correntes;
- Explicar o funcionamento do Ensaio de Corte Direto;
- Realizar ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica no solo em estudo;
- Avaliar a automatização do equipamento e suas principais vantagens;
- Analisar o resultado dos parâmetros e a influência da velocidade de carregamento.
- Elaborar uma conclusão dos resultados obtidos.
- Propor possíveis trabalhos futuros para o complemento deste já realizado.

1.3 Estrutura da Dissertação

A desenvolvimento desta dissertação foi realizada e estruturada em cinco capítulos, os quais estão divididos da seguinte forma:

No Capítulo 1, é apresentado o tema da pesquisa e seus objetivos, as motivações pertinentes para a realização dos estudos e por fim a forma como o texto está estruturado.

No Capítulo 2, é abordado todo o estado de arte, expondo os principais pontos teóricos relacionados a caracterização mecânica nos solos. É primeiramente apresentado todos os princípios sobre a resistência ao corte e seus principais parâmetros, além de realizar uma breve descrição de alguns testes correntes para caracterizar o solo. E por fim, é abordado de forma detalhada o ensaio de corte direto.

No Capítulo 3, são detalhados os planos de trabalhos. É realizada a descrição de todo o equipamento de corte direto e a sua modernização e automatização, além dos resultados ds ensaios de caracterização física do solo em estudo e seus resultados, a forma como foi realizado os ensaios e por fim, os procedimentos realizados (materiais e métodos) de forma a garantir futuras reproduções dos ensaios.

No Capítulo 4, são demonstrados os resultados obtidos através dos ensaios de corte direto, e posteriormente realizado de forma sensível a análise de todos os resultados obtidos.

No Capítulo 5 é realizada uma apresentação das conclusões que podem ser obtidas a partir dos resultados dos ensaios em conjunto com o embasamento teórico. Terminando com a exposição de possíveis trabalhos futuros para o complemento deste trabalho já realizado.

Por fim, é importante salientar que a maior parte de desenvolvimento do presente trabalho foi realizado em um período no qual decorreu a Pandemia do Corona Vírus, em 2020, não sendo possível a completa realização dos ensaios apresentados e propostos no programa de trabalhos do Capítulo 3.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

A heterogeneidade de comportamento dos maciços terrosos em seu estado natural, é um complexo mecanismo de estudo, sobretudo pela dificuldade de análise do seu histórico de tensões. Contudo, a partir dos princípios clássicos e empíricos da mecânica dos solos, diversos estudiosos têm desenvolvido ensaios e fundamentos para suprir as variadas necessidades impostas pela crescente evolução nas obras de construção civil, sobretudo nas apresentadas na Figura 2.1.

É nesse contexto, que em muitos problemas de engenharia, tais como: projetos de fundações, paredes de contenção, aterros e escavações, faz-se necessário um correto estudo laboratorial para obter os parâmetros de caracterização mecânica do solo, sobretudo os denominados coesão e ângulo de atrito interno, já que são partes essenciais para determinar a capacidade resistente do solo quando submetido à ação de corte.

Assim, é relevante ressaltar que esta ação ocorre quando uma determinada força é aplicada sobre a superfície de solo, fazendo com que as suas partículas deslizem uma sobre as outras, criando então uma superfície de corte. Em decorrência, a capacidade resistente a esse fenômeno é dada pela máxima tensão de corte que o solo pode resistir antes de entrar em rotura.

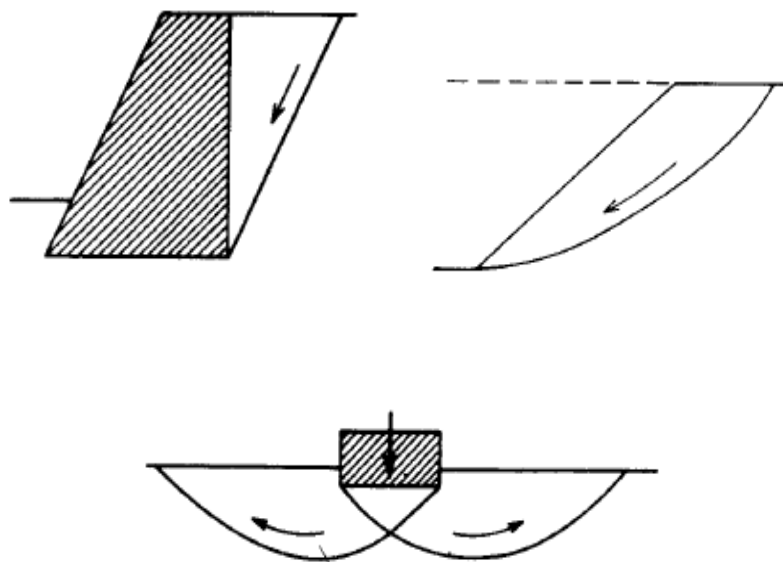


Figura 2.1: Exemplos simplificados de rotura mecânica dos solos em: corte em taludes, paredes de retenção e fundações [2].

Por fim, é importante ressaltar que neste capítulo é apresentado um estado de arte referente a resistência mecânica dos solos quando submetido à ação de corte, bem como uma breve explicação sobre a teoria clássica de Coulomb e os principais parâmetros que a compõe. Posteriormente, é abordada a importância e a generalidades dos ensaios laboratoriais de caracterização mecânica e de deformabilidade dos solos, além dos principais ensaios existentes para tal finalidade. Ao final, é exposto os princípios fundamentais e as metodologias do ensaio de corte direto.

2.2 Resistência ao Corte do Solo

A capacidade resistente de um solo é dada pelas características coesivas e friccionais que suas partículas apresentam entre si, sendo definida como a máxima tensão de corte que o solo pode suportar sem sofrer ruptura [5]. Logo, os principais fatores que influenciam a capacidade de um maciço a ação de corte são a sua distribuição de partículas, densidade, teor em água e a estrutura de formação do solo [6].

Em conformidade com a Figura 2.2 a), a referida tensão de corte é dada pela razão entre a força estática (F) aplicada no solo e a área de contato definida. Essas tensões atuam paralelamente ao plano considerado e são configuradas quando as forças tendem a provocar um deslizamento das camadas, uma sobre a outra, conforme apresentado na Figura 2.2 b), sendo responsáveis por promover uma deformação de corte na estrutura do solo.

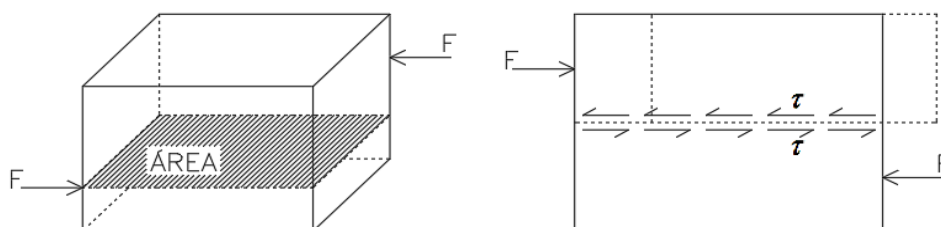


Figura 2.2: a) Tensão de Corte no bloco; b) representação das tensões de corte.

Além disso, é importante ressaltar que os solos arenosos apresentam uma capacidade resistente que depende majoritariamente do ângulo de atrito interno do solo, enquanto os solos de formação argilosa/siltosa são dependentes dos parâmetros de coesão e fricção interna das partículas [7].

A ruptura do solo é caracterizada pela formação de uma superfície de corte contínua em sua massa. Existindo, por conseguinte, uma camada de solo em torno da superfície de corte que perde suas características durante o processo de ruptura, formando a zona cortada e, que em seguida, desenvolve a superfície de corte [8]. Este processo é bem caracterizado, tanto em ensaios de corte direto, como nos escorregamentos de taludes e pode ser visto na Figura 2.3.

Contudo, no estudo da ruptura de um solo, o conhecimento da evolução do estado de tensão é um fator determinante, já que no sistema de eixos existe uma fronteira que separa os estados de tensão compatíveis com a resistência do solo, sendo designada de envolvente de ruptura, cuja equação corresponde ao critério de ruptura do solo [9]. Além disso, a representação do estado de tensão para todas as direções pode ser efetuada através do

Círculo de Mohr ou por meio de um sistema p (centro do círculo de Mohr) – q (tensão de corte máximo), o qual cada estado é representado pelo ponto em que a tensão tangencial é máxima.

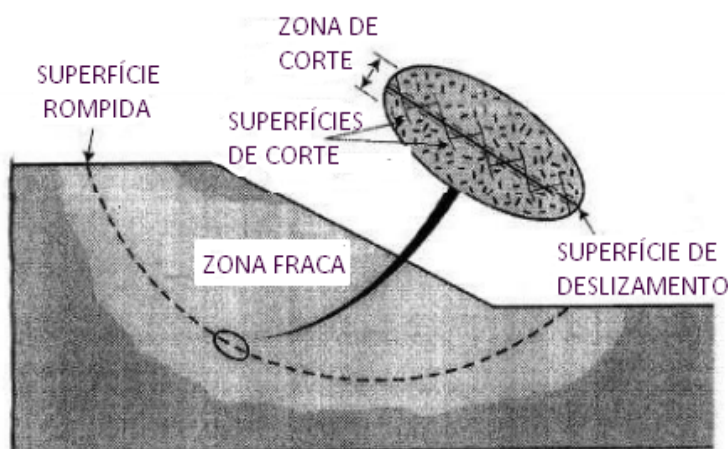


Figura 2.3: Zona fraca, zona de corte e superfície de de corte, [3].

Por fim, a metodologia aplicada aos critérios de rotura pode ser dada pelo princípio de Mohr-Coulomb, onde um solo coesivo entra em rotura num ponto, quando num par de facetas ou planos que passam nesse ponto é atingido uma dada relação entre as componentes normal e a tangencial, e em contrapartida, para os materiais de coesão nula a rotura é dada quando a tensão total atinge uma dada obliquidade em relação à normal, já que a razão entre tensões tangenciais e normais é dada pela tangente do ângulo de atrito [9].

Em outros casos pode ser utilizado o critério de Tresca, onde o solo entra em rotura num ponto, quando numa faceta ou conjunto de facetas passando por esse ponto se atinge um dado valor de tensão tangencial. Neste caso, a grandeza de uma das componentes de tensão ocasiona a rotura, pelo que os estados de tensão compatíveis com a resistência do solo estão limitados por uma envolvente paralela ao eixo das tensões normais. O solo que obedece a esse critério é designado por puramente coesivos, onde a fricção interna é nula [9], contudo, estes critérios de rotura são os mais simples, além de serem definidos a partir da teoria clássica.

Teoria de Mohr-Coulomb

Desenvolvido por Charles Augustin de Coulomb e Christian Otto Mohr, o critério da envolvente de rotura de Mohr-Coulomb, apresentada na Equação 2.1, é um modelo matemático que relaciona a resistência máxima de corte e a tensão normal aplicada na superfície de um solo. O fundamento teórico utilizado na equação caracteriza um solo drenado, estabelecendo que o comportamento é controlado pela tensão efetiva, sendo necessário conhecer a pressão da água nos poros (representado por μ).

Dessa forma, faz se necessário estabelecer que para solos saturados, a tensão normal (representada por σ') é dado por: $\sigma'_m = \sigma_n - \mu$, promovendo a equação a:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu) \cdot \tan(\phi') = c' + \sigma'_m \cdot \tan(\phi') \quad (2.1)$$

Dado que:

- c' é a coesão do solo, e
- ϕ' é o ângulo de atrito interno.
- σ'_m é a tensão efetiva do solo

Por fim, é importante ressaltar que para solos saturados que não permitem a completa drenagem dos poros, a equação em termos de tensões totais é mais aplicável, contudo, nesse tipo de solo o ângulo de fricção interna é nulo ($\phi = 0$), logo:

$$\tau = C_u \quad (2.2)$$

Onde C_u é dado como a resistência não drenada do solo, em termos de tensões totais e seu valor é dependente do teor de humidade do solo em estudo.

Coesão

A coesão (representado por c) é caracterizada como a força de atração entre as superfícies das partículas existente no solo, sendo classificada entre real ou aparente. A primeira classe apresentada é descrita como as que expõem um resultado através dos agentes cimentantes,

tais como o teor de óxidos e argilas silicatadas [10], além de uma atração entre partículas próximas por meio de forças eletrostáticas [11], sendo apenas esta utilizada nos problemas de engenharia.

No entanto, a coesão aparente é definida como sendo aquela que apresenta resultados a partir da tensão superficial da água nas capilaridades do solo, promovendo a formação de meniscos entre as partículas de solos parcialmente saturados, os quais tendem a se aproximar e constituir uma parcela da resistência ao corte [12].

Além disso, é importante ressaltar que a composição das partículas de um determinado maciço de solo pode ou não apresentar coesão entre si. Os solos designados como não coesivos, são aqueles cujo comportamento ao corte é ditado apenas pelo atrito entre suas partículas e seu imbricamento, conforme a equação 2.3, apresentando propriedades que garantem rápida drenagem das pressões neutras, exibindo em sua maioria, comportamentos drenados.

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (2.3)$$

Entretanto, os solos coesivos são apontados como aqueles cuja coesão é provocada pelas forças de atração de natureza eletroquímica na superfície das partículas. Contudo, esses tipos de maciços apresentam um comportamento diferente quando comparado o comportamento à curto e longo prazo, além de sofrer grande influência do teor de umidade, já que demoram a dissipar as pressões neutras devido sua alta impermeabilidade.

Ângulo de Atrito

O ângulo de atrito (representado por ϕ) é definido como a característica friccional entre as partículas do solo, onde seu valor máximo é estipulado como sendo o maior ângulo que a força de corte transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que ocorra o corte do solo no plano de ruptura, sendo tal valor proporcional ao aumento da tensão normal. Além do mais, é importante ressaltar que o valor desse parâmetro é dependente de algumas propriedades físicas do solo, tais como: grau de

compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia no solo [5].

2.3 Generalidades de Ensaios Laboratoriais de Caracterização Mecânica e de Deformabilidade de Solos

Os ensaios laboratoriais constituem-se como um importante elemento para avaliar e solucionar os problemas inerentes à engenharia geotécnica, permitindo obter de forma detalhada, as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de um determinado solo. A utilização desses ensaios se destaca pela alta capacidade de controlar os estados de tensão e deformação do solo, bem como as condições de drenagem, permitindo estudos detalhados e de maior precisão para caracterizar o comportamento tensão-deformação, promovendo melhores dimensionamentos geotécnicos.

O esquema apresentado na Figura 2.4, permite caracterizar de forma genérica os procedimentos realizados nos ensaios laboratoriais. Primeiramente, as amostras são recolhidas do local a ser analisado, e posteriormente levadas ao laboratório, onde são submetidos a uma identificação física do material, através de ensaios rotineiros, e complementadas através dos procedimentos de caracterização mecânica. A partir disso, os resultados obtidos são correlacionados com as teorias da mecânica dos solos, de forma a permitir a obtenção dos valores paramétricos de resistência e deformabilidade do solo, sendo então utilizados para o dimensionamento das estruturas geotécnicas.

Por outro lado, os ensaios laboratoriais ainda são sensivelmente menos utilizados que os ensaios realizados in-situ, sobretudo pela limitação de amostras recolhidas e a dificuldade de obtê-las com qualidade em solos arenosos. Além disso, os processos de realização são mais demorados, já que exigem maior morosidade em sua execução, o que os caracterizam como procedimentos mais caros. Contudo, é importante ressaltar que os ensaios de laboratório e de campo não se excluem, mas se completam, dado que as limitações de um daqueles dois tipos de ensaios, constituem as potencialidades do outro e vice-versa [9].

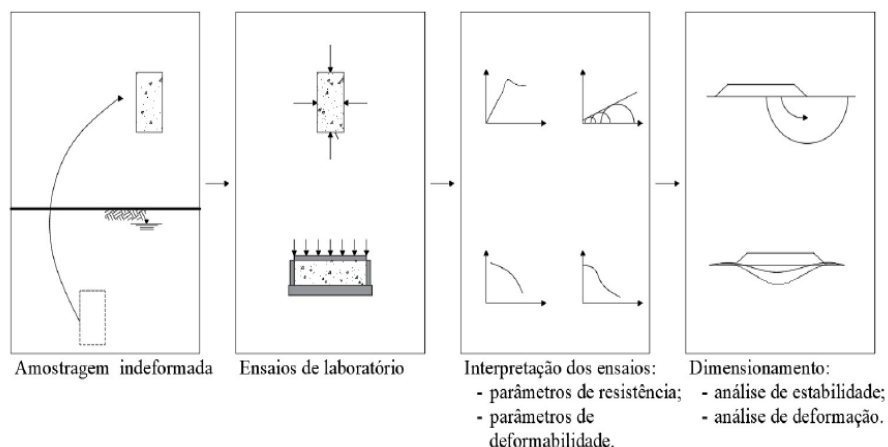


Figura 2.4: Esquema simplificado do processo de dimensionamento de estruturas geotécnicas com base em ensaios de laboratório, [4].

2.3.1 Ensaio de Corte Direto

A metodologia simples e ágil que é empregada no procedimento de corte direto, possibilita que este ensaio seja muito utilizado para determinar a resistência ao corte drenado e consolidado de um determinado maciço. Para isso, de modo a exemplificar o método de teste padrão e o âmbito de aplicação para esse tipo de ensaio, foi criada a normativa internacional ASTM 3080 [13].

A referente normativa descreve que o ensaio é realizado a partir do armazenamento da amostra de solo, dentro de uma caixa dividida horizontalmente em duas metades moveis, sendo que a rotura do solo é efetuada sobre um plano definido. Sobre este plano as principais ações atuantes são provocadas por uma carga vertical de consolidação definida antes da realização do ensaio e aplicada na parte superior da amostra, além de uma carga horizontal variável e crescente, originada por uma taxa de deslocamento relativo entre as metades da caixa.

Geralmente, obtém-se os resultados a partir de três ou mais ensaios, sendo em cada um aplicada uma determinada força vertical de volume constante. Então determina-se as resistências máximas (de pico), que posteriormente correlacionadas com as tensões normais, viabiliza a elaboração da reta intrínseca da teoria de Mohr-Coulomb, sendo possível

obter os principais parâmetros de resistência ao corte, tais como: a coesão e o ângulo de atrito interno, sendo o primeiro dado pela intersecção da reta com a ordenada e o segundo pelo grau de inclinação da reta formada. Além disso, a medição dos deslocamentos verticais são úteis para avaliar a variação volumétrica da amostra em relação ao deslocamento horizontal.



Figura 2.5: Caixa de corte utilizado no ensaio de Corte Direto do Laboratorio de Geotecnica da Estig-IPB.

É importante ressaltar que os procedimentos de ensaio são efetuados com baixas velocidades de deslocamento, principalmente sobre os solos argilosos, para que seja possível a dissipação completa da pressão de água nos poros ao longo da rotura, possibilitando a obtenção de resultados em termos de tensões efetivas.

Por fim, é importante destacar que as deficiências presentes no ensaio são destacados pela impossibilidade de controle da drenagem, a uniformidade de deformação na amostra, a possibilidade de a rotura não ocorrer no plano mais fraco, já que ela é forçada a ocorrer em um plano já definido e a incapacidade de obter as tensões em outros planos que não seja no plano horizontal de rotura, provocando também a rotação das tensões principais.

2.3.2 Ensaio Triaxial

Atualmente, o ensaio de compressão triaxial é o mais completo e utilizado equipamento laboratorial para a caracterização mecânica dos solos. As evoluções tecnológicas permitiram que esse equipamento fosse capaz de suprir as incapacidades dos outros equipamentos, permitindo o controle das deformações, do carregamento e da drenagem nas amostras. Possibilitando também, medir a variação volumétrica no interior da amostra e controlar a poro pressão durante a realização dos ensaios drenados ou não drenados.

Além disso, a utilização desse equipamento, permite realizar ensaios sob diferentes condições, tais como: *consolidados drenados* (CD), *consolidados não drenados* (CU) e *não consolidados não drenados* (UU). Estando, respectivamente, orientados pelas normativas *ASTM D7181* [14], *ASTM D4767* [15] e *ASTM D2850* [16]. É importante ressaltar que os ensaios de compressão triaxial são realizados de forma a permitir o controle completo dos estados de tensões totais e efetivas, da pressão neutra e dos estados de deformação. Essas disposições ajudam na eficácia de reproduzir em laboratório, situações de comportamento análogas as experimentadas em campo [4].

O equipamento triaxial tem sua representação esquemática apresentada na Figura 2.6 e demonstra os principais componentes existentes. A sua estrutura é formada por uma câmara triaxial, ligada a diversas válvulas de controle e um pedestal no centro, onde a amostra cilíndrica de dimensões predefinidas de 38, 52, 70 ou 100 mm de diâmetro e altura contendo o dobro do diâmetro é armazenada, devendo ser coincidentes o eixo da amostra e da câmara.

Isolada por uma membrana de borracha impermeável e contendo as extremidades fixadas por pedras porosas, a amostra é submergida e a pressão interior da câmara é controlada por meio da ligação a uma unidade de pressão exterior, que injeta ou retira água, simulando as tensões horizontais na amostra, conforme desejado. A tensão vertical na amostra é aplicada por meio de um êmbolo no topo da câmara, transmitindo cargas axiais que podem ser mensuradas pelo equipamento durante a aplicação de cargas, sendo também registradas as leituras de deformação [17].

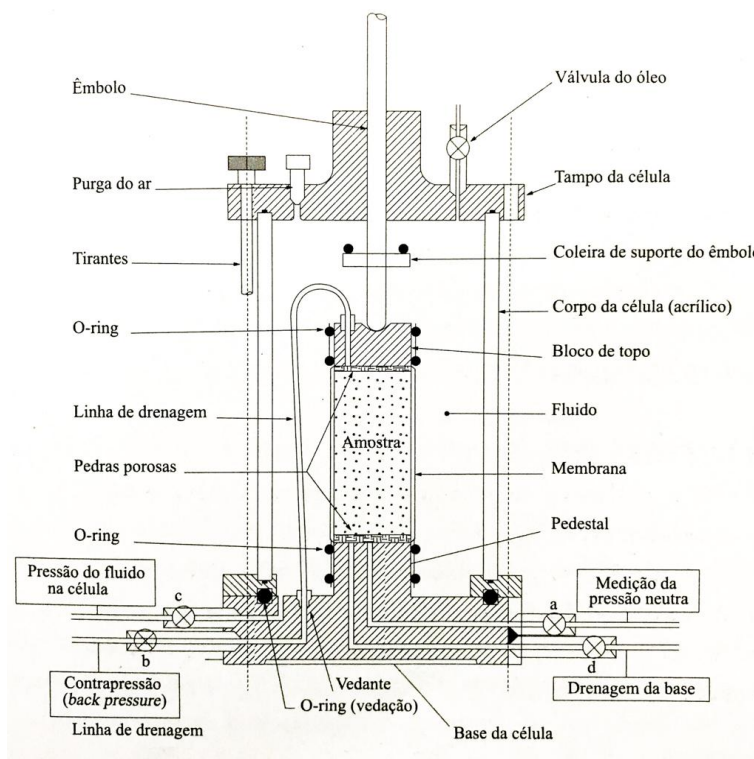


Figura 2.6: Ensaio de Compressão Triaxial: esquema detalhado do aparelho [4]

Além disso, outro aspecto importante a ser ressaltado é a poro pressão, a qual pode ser realizada de variadas formas. As pressões podem ser inseridas por intermédio de uma ligação no topo da amostra, que conectada a uma unidade de pressão, insere água no interior da amostra e origina uma pressão neutra controlada, pode também ser ligada a um transdutor de pressão na parte de baixo da amostra, o qual permite obter as leituras das pressões neutras pertinentes, ou apenas serem consideradas nulas nos casos de amostras secas.

Resumidamente, os ensaios *consolidados drenados* (CD), são os realizados de forma mais lenta, permitindo a drenagem da amostra, de forma a dissipar as pressões neutras (fase de consolidação), fornecendo resultados em termos de tensões efetivas. Enquanto isso, os ensaios *consolidados não drenados* (CU) são efetuados não permitindo sua drenagem e isolando a amostra da contra pressão assim que finaliza a consolidação, sendo os resultados apresentados em termos de tensões totais e efetivas. Por fim, os ensaios

não consolidados não drenados (UU) são os mais rápidos e fáceis de serem reproduzidos, já que nem a drenagem da amostra e nem sua consolidação são permitidas em nenhuma fase do ensaio, também não se espera a dissipação das pressões neutras, conseguindo uma interpretação sob condições de tensões totais.

2.3.3 Ensaio de Corte Direto Simples - (DSS)

O ensaio de corte simples (DSS - *Direct Simple Shear Test*), cujo esquema simplificado está representado na Figura 2.7, é um teste laboratorial de caracterização mecânica do solo quanto a sua resistência e rigidez. O primeiro equipamento foi desenvolvido por Kjellman [18] e posteriormente adaptado por Roscoe [19], surgindo como alternativa para transpor as inadequações encontradas no ensaio de corte direto e que apresentasse um estado de tensões e deformações mais uniformes na amostra. Nos anos seguintes, Bjerrum e Landva [20] realizaram uma descrição detalhada do DSS, onde propuseram a modificação dos parâmetros dos equipamentos.

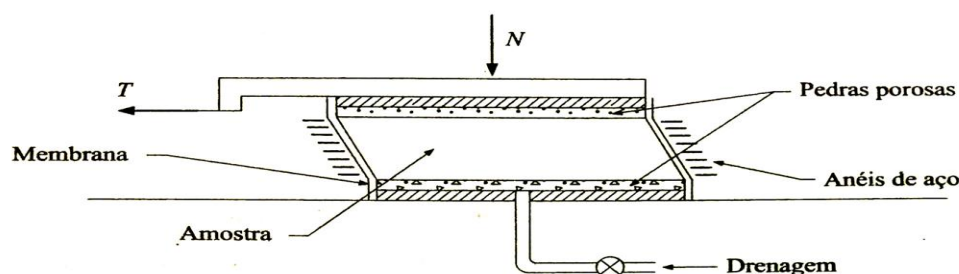


Figura 2.7: Ensaio de corte direto simples: esquema simplificado do aparelho [4]

Orientado pela norma ASTM D6528-17 “Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils” [21], os ensaios DSS consistem em ensaiar uma amostra cilíndrica revestida por uma membrana de borracha reforçada, que permite a drenagem da amostra e o controle das pressões neutras, e esta por sua vez é sobreposta por anéis de aço destinados a evitar deformações laterais sem constringer a distorção da amostra.

Durante o processo de ensaio, uma carga axial é aplicada no topo da amostra, promovendo sua consolidação sob deformação lateral nula (K_0) e permanecendo constante durante toda a ação de corte horizontal, o qual ocorre através da aplicação de uma força tangencial crescente nas bases da amostra com determinada velocidade correspondente a uma taxa de deformação qualquer.

Neste ensaio, é importante ressaltar que o estado de tensão a ser analisado não representa um estado de corte simples ou de um estado de tensão isotrópico, dado que esse fato apenas aconteceria, conforme a Figura 2.8a, se as tensões tangenciais laterais na amostra τ_h se igualassem as verticais, τ_v , obtendo assim estados de tensão e deformação uniformes, podendo ser representados por uma única circunferência de Mohr [4].

Porém, como demonstra a Figura 2.8b, as tensões tangenciais laterais não podem ser controladas ou medidas, então é previsível uma pequena diferença em relação a $\tau_v (= T/S)$, onde para o equilíbrio dos momentos ocasionados por essa desigualdade, é necessário que as forças normais passem a ter determinada excentricidade nas faces de atuação, se tornando o estado de tensão variável de ponto para ponto e apenas sendo possível a sua representação através de várias circunferências de Mohr. Por fim, é importante ressaltar que o estado de deformação também não é uniforme, visto que apenas as tensões nas bases ($\sigma'_v = N/S$ e $\tau_v = T/S$) da amostra são conhecidas [4].

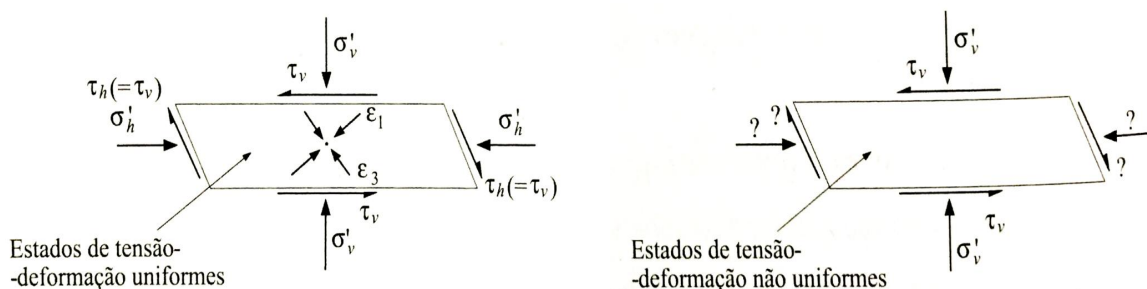


Figura 2.8: a) Estado de tensão-deformação de corte simples; b) estado de tensão existente numa outra amostra submetida a ensaio no aparelho representando na Figura [2.7]. [4]

Contudo, a utilização deste ensaio se apresenta bastante difundida, sobretudo no estudo do comportamento anisotrópico das argilas moles, no qual a resistência neste tipo

de situação é dependente da orientação das tensões principais na rotura. Porém, se essas tensões principais tiverem orientações intermédias em relação àquelas direções, o ensaio de corte simples apresenta grande vantagem, já que nos ensaios triaxiais as tensões são apenas verticais (ensaio de compressão) ou horizontais (ensaio de extensão).

2.3.4 Ensaio Edométrico

Os problemas de consolidação sempre foi um tema bastante abordado por Terzaghi em seus estudos, o qual propôs uma abordagem teorica e matemática para esse processo, criando também o primeiro equipamento, denominado "oedometer" [2]. Nos anos seguintes, diversos autores começaram a testar e idealizar uma maior gama de equipamentos, fazendo com esse tipo de teste fosse bastante difundido para a análise dos parâmetros de compressibilidade do solo.

Os ensaios edométricos surgiram então para analisar o fenómeno de assentamento nos estratos compressíveis, que seguindo o modelo de Terzaghi representado na Figura 2.9, permite estimar a magnitude e o tempo de consolidação associados à expulsão da água no maciço, que de forma progressiva se transfere de um excesso de pressão neutra para o esqueleto sólido do solo [22].

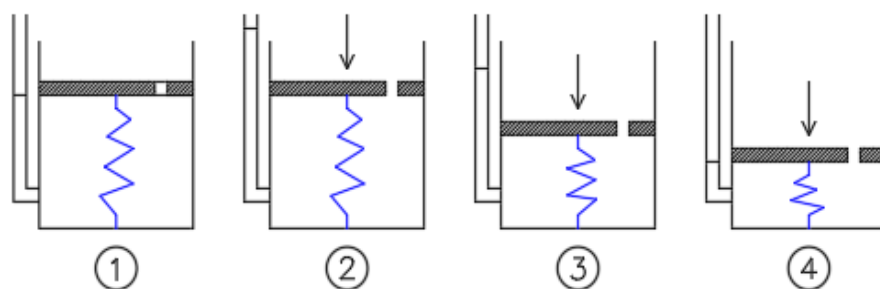


Figura 2.9: Analogia de Terzaghi relativa ao comportamento do solo fino saturado.

Na primeira etapa, o solo encontra-se em repouso e saturado, sendo sua estrutura representada pela mola presente na figura. Posteriormente, o solo é submetido a um

acréscimo de tensão, que inicialmente é suportado pelo desenvolvimento de um excesso de pressão neutra, que é transferida para o esqueleto sólido do maciço à medida que água é expulsa do solo, conforme a etapa 3. Ao final, na etapa 4, toda a pressão neutra foi dissipada, sendo o esqueleto sólido responsável por suportar a indução de tensões no maciço.

O ensaio, cujo esquema é apresentado na Figura 2.10, é regulamentado pela norma ASTM 2435-96: "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils" [23], e utiliza uma célula de consolidação, que consiste em um molde para conter e apoiar a amostra cilíndrica de teste. As pedras porosas são localizadas na parte superior e inferior da amostra, permitindo a drenagem da água, já que esta se encontra submersa. Sua realização consiste na aplicação de uma sequência de tensões verticais sobre uma amostra, confinada lateralmente através da célula de adensamento. A variação das cargas verticais é realizada em intervalos de tempo determinado, podendo chegar em torno de 24 horas. Posteriormente, os deslocamentos verticais são medidos e analisados, obtendo o coeficiente de consolidação vertical (c_v) para um dado incremento de carga, utilizando o método de Taylor ou Casagrande.

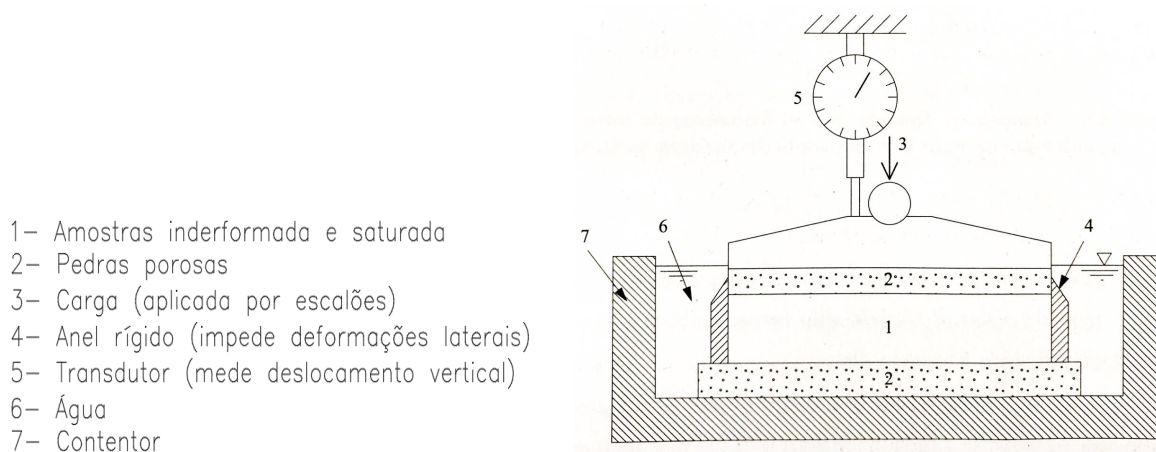


Figura 2.10: Esquema simplificado do ensaio edométrico. [4]

Por fim, é importante ressaltar que a realização deste tipo de ensaio é recomendado principalmente para os solos finos, já que nos estratos confinados de argila as extensões

verticais são maiores, visto que apresentam maiores valores de compressibilidade. Além disso, para solos nestas condições, o ensaio foi simulado para basear as condições de carregamento, de deformação e de drenagem existentes no campo em determinadas situações [4], se tornando um dos mais importantes ensaio laboratoriais para análise do comportamento mecânico dos solos.

2.4 Ensaio de Corte Direto

Resumo Histórico

Os primeiros estudos para avaliar a resistência ao corte em amostras de solo, foi realizada pelo francês Alexandre Colin, em 1846, utilizando uma amostra de argila submetida a uma ação de corte duplo através de pesos suspensos, conforme demonstra a Figura 2.11 a). Contudo, apenas em 1915, o britânico Bell conseguiu criar um protótipo da caixa de corte, sendo capaz de realizar as primeiras medições de resistência para diferentes tipos de solos.

A evolução desse procedimento foi realizada na *Building Research Station* por Cotting e Smith em 1935 [24], com a criação de uma caixa de corte simples, ou seja, com apenas um plano de corte. Como demonstrado na Figura 2.11 b), esse mecanismo exige que a carga seja aplicada por incrementos de pesos, ou seja, baseada no princípio do controle de tensões. Porém, esse mecanismo apresentava uma dificuldade do operador em saber a carga de rotura da amostra.

Com estudos posteriores, com o objetivo de suprir as falhas no equipamento, Arthur Casagrande em 1932, desenvolveu a forma moderna da caixa de corte, que, no entanto, nunca publicou detalhadamente os princípios de seu projeto. Em complemento, Gilboy (MIT) em 1936, desenvolveu a máquina de velocidade constante, a partir de um motor de taxa fixa (baseado no princípio de controle dos deslocamentos), com o objetivo de controlar as imprecisões do projeto de Cooting e Smith. Nos anos seguintes, Golder (1942) e Bishop (1946) buscaram desenvolver e aperfeiçoar os principais detalhes do projeto.

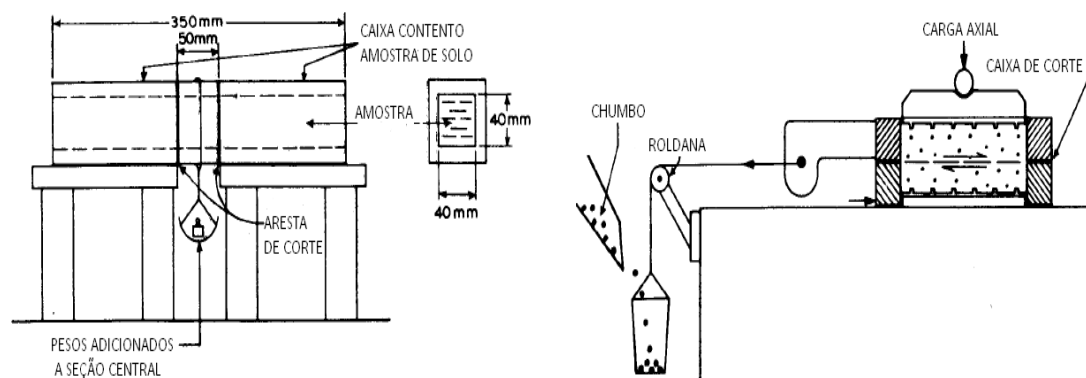


Figura 2.11: a) Equipamento de Corte desenvolvido por Collin; b) Princípio inicial do controle de tensão na caixa de corte. [2]

Por fim, os primeiros ensaios de corte direto para analisar os parâmetros em termos de tensões efetivas, foi realizada por Early e Skempton no ano de 1972, sob uma superfície natural de argila, após o deslizamento de *Walton's Wood* em 1963.

Princípios do Ensaio de Corte Direto

O ensaio de corte direto, cujo esquema está apresentado na Figura 2.12, é o mais antigo e usual procedimento para medir de forma imediata a resistência ao corte de um determinado solo, bem como seus principais parâmetros. É um experimento baseado no atrito do solo, ou seja, uma determinada quantidade de amostra é colocada dentro de uma caixa metálica quadrada, rígida e composta por duas metades, as quais se deslizam uma sobre a outra através da ação de uma força cortante horizontal e crescente, enquanto uma força axial é aplicada em seu topo.

Contudo, é importante ressaltar que apesar da fácil realização desse teste, seus procedimentos são compostos por algumas deficiências, tais como a incapacidade de fornecer o controle de drenagem das amostras e nem provisões para medir a pressão da água nos poros. Sendo adequado apenas para ensaios drenados, os quais apresentam tensões efetivas iguais as tensões totais.

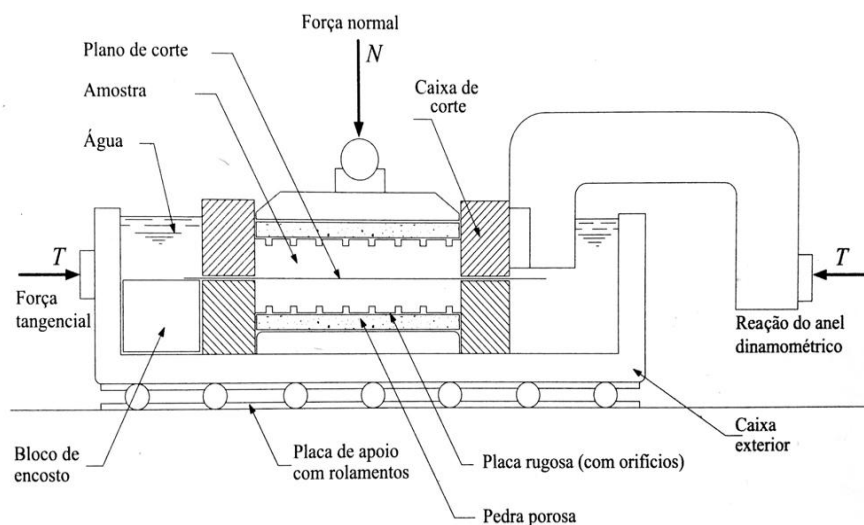


Figura 2.12: Esquema de um aparelho de corte direto [4].

A aplicação dessa metodologia de ensaio pode ser aplicada sobre diferentes tipos de solos, sejam eles coesivos ou não. A diferenciação de procedimentos se dá apenas pelo tempo de duração dos testes, podendo ser eles de rápida ou longa duração. A realização de ensaios de curta durabilidade é aplicada sobre solos não coesivos, ou seja, areias saturadas ou não saturadas, as quais apresentam uma maior capacidade de promover uma livre drenagem da amostra.

Todavia, os testes lentos são aplicáveis sobre solos com alta impermeabilidade, resultando numa drenagem longa da amostra. Estes ensaios são feitos para que o corpo de prova seja consolidado antes do corte e realizados de forma a aplicar uma taxa de deslocamento lenta, para que ocorra uma drenagem adicional durante a aplicação de força cortante, sendo assim, capaz de obter os parâmetros de resistência ao corte drenado consolidado [2].

Além disso, é importante destacar que atualmente as máquinas utilizadas para os ensaios de corte direto são baseadas em ampla maioria no princípio de controle do deslocamento, apresentando uma ampla faixa de velocidades de corte para os testes de rotina. No entanto, embora sejam pouco realizados os ensaios fundamentados no controle de

tensões, estes são executados a longo prazo e por meio de incrementos de tensões aplicadas lentamente, sendo muito relevante para estudos da fluência sob tensões de corte constante [2].

Particularidades e Metodologia o Ensaio

Como observado anteriormente, a capacidade resistente a ação de corte de um determinado solo, pode ser facilmente obtida por meio dos ensaios de corte direto, os quais são baseados no critério de Mohr-Coulomb, permitindo encontrar, em termos de tensão efetivas, os parâmetros necessários para satisfazer tal equação, tais como coesão e ângulo de atrito interno. Como representado na Figura 2.13a), estes valores são obtidos através da correlação gráfica entre tensão normal e tangencial de no mínimo três amostras [13], onde a inclinação da reta formada entres os pontos, possibilita obter o ângulo interno e a intersecção com a ordenada permite estimular o valor da coesão do solo.

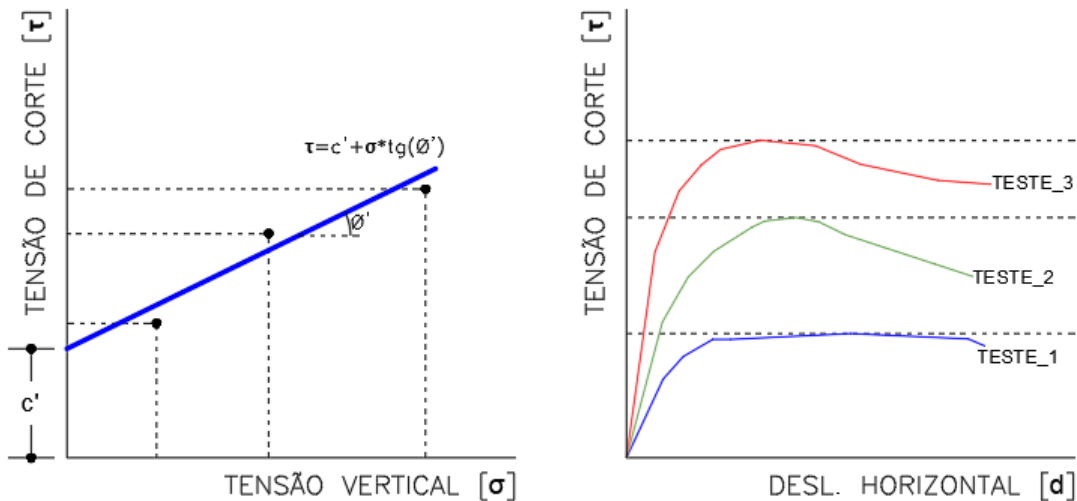


Figura 2.13: a) Diagrama de Morh-Coulomb (Tensão Efetiva Vertical); b) Curva “Tensão de Corte vs Deslocamento de Corte” para 3 ensaios de Corte Direto.

Além disso, o seu procedimento de ensaio é efetuado sob condições de deformação controlada, impondo uma translação horizontal com velocidade constante à metade inferior

da caixa de corte, enquanto a superior é mantida fixa à custa de uma reação, τ , cujo valor é medido em cada instante por meio de um anel dinamométrico [4], o que permite obter a resistência de pico e de rotura, sendo que esta última é dada quando o solo não consegue resistir a qualquer acréscimo de carga horizontal, o que ocorre de forma progressiva do plano, se procedendo do bordo para o centro da amostra. Contudo, a deformação no plano não é uniforme, verificando-se deformações maiores junto do bordo da meia caixa móvel que empurra a amostra, e menores no lado oposto, promovendo um estado de deformação heterogéneo, logo um estado de tensão.

Neste tipo de ensaio, as principais ações aplicadas são as tensões verticais e horizontais, sendo a primeira previamente definida antes da realização do ensaio e aplicada na parte superior da amostra por intermédio dum sistema estático de pesos e alavanca, com o objetivo de consolidar a amostra, mas não permitindo a deformação lateral, e a segunda ação é variável, dado que as tensões tangenciais são aumentadas gradualmente a medida que se processa o deslocamento, até se dar a rotura segundo o plano de corte horizontal já definido.

É ainda possível, ao final do ensaio, obter a leitura das deformações horizontais (cuja amplitude máxima depende da capacidade de deslocamento do equipamento) e verticais, além da força de corte aplicada, que é posteriormente dividida pela área corrigida da amostra e plotada graficamente contra os deslocamentos relativos, conforme a Figura 2.13 b), onde se pode obter as tensões máximas de corte. Além disso, a análise da relação entre os deslocamentos verticais e horizontais, permite caracterizar o solo quanto a expansibilidade ou compressibilidade durante o ensaio, onde verifica-se a tendência de expansão em solos mais densos e a compressão nos solos com menor compactidade.

É relevante demonstrar que apesar dos pontos destacados, o ensaio de corte direto é acometido de várias deficiências, provocadas principalmente pela dificuldade de monitorar a drenagem da amostra e a pressão interna, sobretudo nos solos finos. Este teste também tem a desvantagem de forçar o corte ao longo de um plano específico, em vez de permitir que o solo tenha uma rotura através da zona mais fraca, produzindo deformações não uniformes na amostra, o que pode produzir resultados errôneos [25]. Dado que como o

solo apresenta espessura finita, a rotura exige as partículas que intersectam aquele plano sejam extraídas de sua posição inicial, sendo que para solos mais grossos exigirá uma maior mobilização de força [26].

Por fim, a demonstração dos resultados através do círculo de Mohr (Figura 2.14) são de face hipotética, já que o ensaio permite conferir apenas as tensões no plano de corte definido, sendo impossível sua determinação em outros planos, tais como as tensões principais e suas respectivas direções.

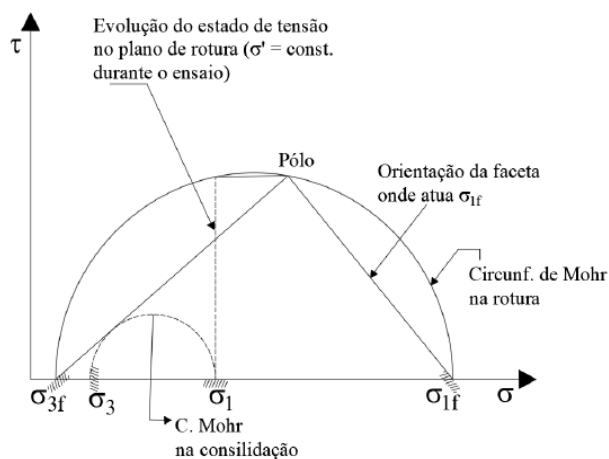


Figura 2.14: Rotação das tensões principais num ensaio de corte direto. [4]

Aplicação em Solos Arenosos

A capacidade resistente de um solo arenoso é determinada pela quantidade de água presente em sua composição, e podem ser divididas em areias secas ou saturadas. Na primeira classificação, a resistência depende de uma variedade de fatores, tais como: composição mineralógica dos grãos, tamanho, forma, textura da superfície, estrutura do solo e a compactidade dos grãos, o qual pode ser expressa em termos do índice de densidade, relação de vazios ou densidade seca. Contudo, diversos estudos demonstram que os resultados obtidos em ensaios com areias saturadas são muito semelhantes aos realizados em areia seca, desde que a saturação e a drenagem da amostra ocorram livremente durante o ensaio. Em

ambos os casos a tensão efetiva é igual a tensão total [2], já que é possível a drenagem.

O efeito de corte em solos arenosos pode ser verificado na Figura 2.15, o qual demonstra que em areias densas, cujo índice de vazios é baixo, a aplicação de uma força de corte provoca uma tentativa de expansão ascendente das partículas, conhecido como dilatância, enquanto nos solos soltos a tendência é a diminuição do volume (contração), já que as partículas realizam um movimento descendente. Além disso, para solos submersos cuja drenagem é livre, a água é absorvida durante o processo de corte pelas areias densas e expelida de sua estrutura pelas areias soltas.

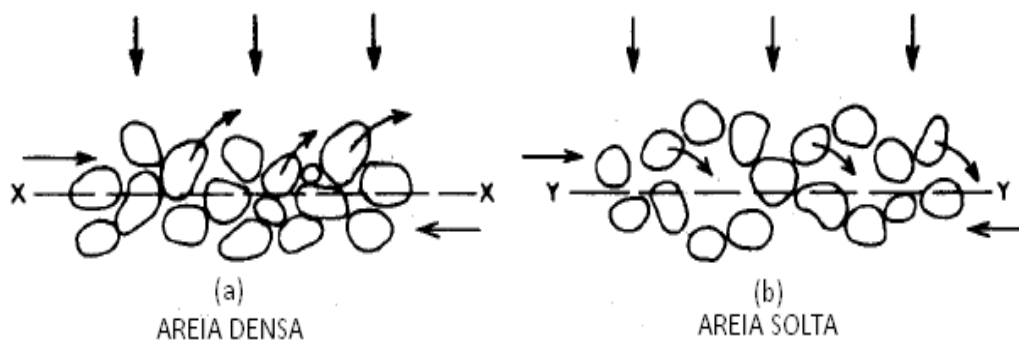


Figura 2.15: Efeito do corte na estrutura dos grãos em areias [2].

A variação do volume da amostra durante o ensaio de corte direto ocorre em ambos os tipos de areia, já que o índice de vazios inicial é alterado. Contudo, ao final do deslocamento de corte, a razão de vazios de ambos os casos se aproxima de um valor comum, conhecido como razão de vazios crítica [2]. Além disso, os resultados dos ensaios são plotados conforme os gráficos da Figura 2.16 a) e b), o qual permite verificar o comportamento da amostra durante o procedimento de corte direto. Por fim, é considerável ressaltar que os solos arenosos apresentam um parâmetro de coesão muito baixo, sendo a resistência ao corte dada, quase que exclusivamente, pelo ângulo de atrito interno do solo, cujo valor é maior nas areias com maior densidade.

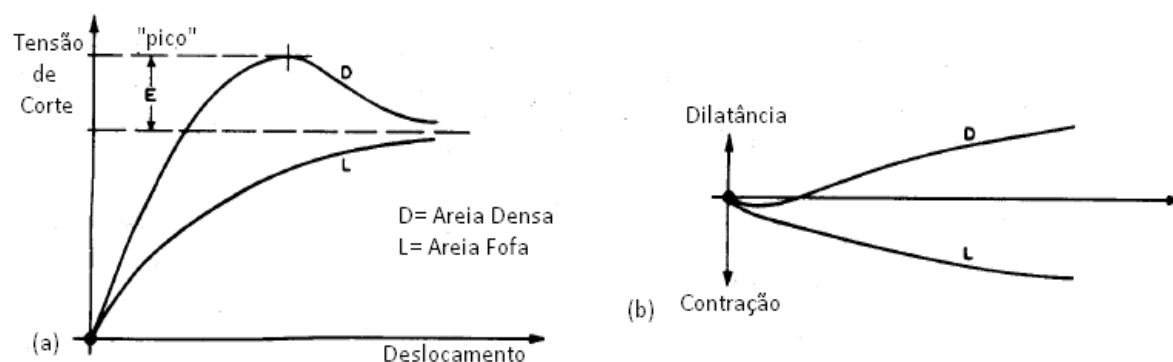


Figura 2.16: Característica de corte nas areias densas e soltas:(a)tensão de corte e (b)mudança de volume, ambas plotadas contra o deslocamento [2].

Aplicação em Solos Argilosos

Ao contrário da metodologia empregada na avaliação dos solos arenosos, a determinação da capacidade resistente de um solo argiloso apresenta maior complexidade, já que apresenta dependência de fatores para além da composição do solo, tais como: mineralogia da partícula, química da água e dos minerais de argila presentes, teor de umidade da estrutura e a capacidade do solo para absorver ou expulsar a água durante o teste [2]. Essa capacidade é o fator primordial na realização de ensaios com amostras saturadas, já que com o aumento da poro pressão durante a aplicação de corte, a taxa de dissipação deste excesso é ditada pela permeabilidade do solo.

Com isso, a velocidade de teste utilizada para avaliar a resistência de um solo argiloso em termos de tensão efetiva, deve ser lenta o suficiente para promover a dissipação das pressões neutras. A explicação se deve pela incapacidade de monitorar a drenagem da amostra em equipamentos como o de corte direto, sendo os ensaios sob condições não drenadas (ensaios rápidos) impossíveis de serem realizados. Ensaios realizados in-situ, tais como o Vane Test, são os mais indicados para obter a resistência não drenada (C_u) de um solo.

A processo de medição da capacidade resistente das argilas é similar ao executado na

avaliação das areias, sendo o tempo de teste a única diferença entre elas, já tempo de execução em solos impermeáveis pode demorar dias. Como explicado, a taxa de deslocamento é dependente das características de drenagem da amostra, logo, como a permeabilidade esta correlacionada com o coeficiente de consolidação, esse estagio pode fornecer dados para estimar um tempo adequado até a rotura [2], sendo explicitada na Figura 2.17, onde a curva de assentamento é dada em função da raiz quadrada do tempo (em min). Uma tangente é desenhada na parte da linha inicial da curva, sendo estendida até interceptar a linha horizontal que representa 100% de consolidação. O ponto de interseção fornece o valor da raiz do tempo, que multiplicado por ele mesmo dá a intercepção de tempo, conforme definida por Bishop e Henkel em 1962 [27]. O tempo necessário para a rotura (t_f) está relacionado a t_{100} através da equação 2.5 definida por Gibson e Henkel [28].

$$t_f = 12,7 \cdot t_{100} \text{min} \quad (2.4)$$

A taxa de consolidação é dada por:

$$c_v = \frac{0,103 \cdot H^2}{t_{100}} \quad (2.5)$$

Onde H é a espessura da amostra (mm) e t_{100} é dado em min.

Contudo, a aplicação desse método pode ser inviável caso a curva de consolidação não se assemelhe á curva teórica, sendo que 50% porção inicial não é linear, o que pode ser ocasionado pela saturação imparcial da amostra. Contudo, o método desenvolvido por Binnie e Partners em 1968 também pode ser utilizado. Por fim, ao final do processo de ensaio, a envolvente de resistência e os parâmetros de corte podem ser obtidos a partir da reta intrínseca de Mohr-Coulomb.

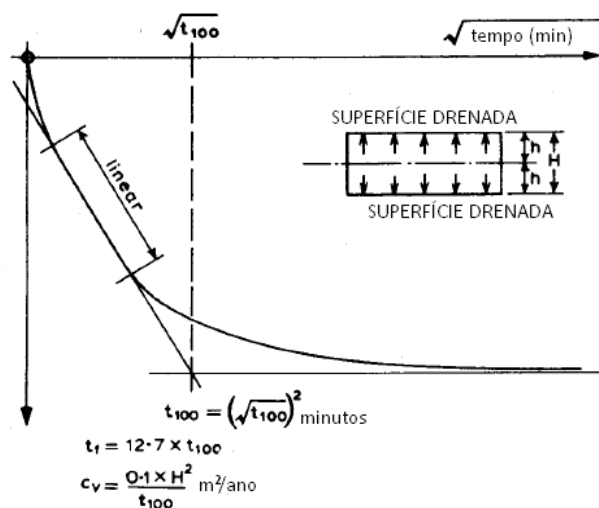


Figura 2.17: Derivação do tempo de ruptura a partir da curva de consolidação.

2.5 Considerações Finais

A metodologia aplicada aos ensaios apresentados neste capítulo, cujo objetivo é a caracterização do comportamento mecânico e de deformabilidade dos solos, demonstra o quanto grande foram as evoluções tecnológicas para com os procedimentos laboratoriais, os quais sempre buscaram diminuir as falhas apresentadas no equipamento. Contudo, é importante destacar que neste capítulo foram expostos apenas os principais ensaios de caracterização mecânica que permitem obter os parâmetros mecânicos da teoria clássica.

Da mesma forma, diversos estudos permitiram o aprimoramento das teorias clássicas de análise do solo, sendo capaz de caracterizar e atribuir explicações para os mais diversos resultados apresentados nos ensaios laboratoriais de caracterização do maciço, garantindo resultados cada vez mais próximos do real.

Contudo, a integração entre os ensaios laboratoriais é fundamental para uma correta análise do solo, já que as particularidades de um, podem servir como complemento ao resultado do outro, diminuindo as falhas existentes nos procedimentos. Essa otimização de resultados pode garantir obras geotécnicas cada vez mais eficazes e econômicas, já que fornecem maior fiabilidade para o dimensionamento.

Por fim, é considerável destacar que apenas os ensaios mecânicos não são por si só, capazes de apresentar resultados fiáveis quanto ao comportamento do solo, sendo também necessário uma ampla análise das propriedades físicas desse material, realizados através de ensaios de caracterização física, tais como: peso volúmico, teor em água, análise granulométrica e sua classificação unificada, os quais serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 3

Programa de Trabalhos

3.1 Considerações Iniciais

A correlação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica e física, tem o objetivo de descrever com maior fiabilidade a resposta que o maciço fornecera quando submetido a um acréscimo de tensão. Contudo, é indispensável a realização de um programa de trabalhos detalhado e avançado, sendo capaz de suprir todas as demandas de projeto na análise geotécnica.

Neste capítulo, será demonstrado os procedimentos iniciais para a caracterização mecânica do solo, tais como o procedimento de extração e preparação das amostras remexidas e indeformadas, colhidas da área em estudo, com uma posterior análise física do material coletado, através dos ensaios de: granulometria, compactação proctor, teor de humidade, peso específico e limites de consistência. Por fim, é apresentada uma descrição de todo o equipamento utilizado para o ensaio.

A elaboração desse programa de trabalhos tem por objetivo a avaliação do comportamento mecânico de um solo encontrado na região de Bragança, através do equipamento de corte direto. Nesse estudo, buscou-se mensurar a capacidade resistente do solo indeformado e reconstituído, quando submetido a uma força de corte atuando sobre diferentes velocidades de deslocamento, além de diversificar as tensões normais aplicadas no topo

das amostras, cuja dimensão é de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. A Tabela 3.1 demonstra detalhadamente o programa de trabalhos a ser efetuado.

Tabela 3.1: Programa de trabalhos para a execução do ensaio de corte direto

		Amostras Reconstituídas			Amostras Indeformadas		
		Consolidação			Consolidação		
		75 kPa	150 kPa	300 kPa	75 kPa	150 kPa	300 kPa
Taxa de Deslocamento	0,25 mm/min	x	x	x	x	x	x
	1,00 mm/min	x	x	x	x	x	x
	2,00 mm/min	x	x	x	x	x	x

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança, seguindo as orientações normativas de cada ensaio, de modo a obter resultados com o mínimo de falhas possível.

3.2 Descrição do Trabalho de Ensaio

3.2.1 Amostragem

A retirada da amostragem é primeiro procedimento realizado para a análise e caracterização física e mecânica de um determinado solo em laboratório, tendo os mecanismos de obtenção divididos entre amostras indeformadas e/ou remexidas, sendo que o primeiro modelo de amostra pode ser obtido através acessos diretos ou indiretos, de forma a sofrer apenas alterações em seu estado tensão, enquanto as remexidas se caracterizam como excludente das amostras indeformadas. Contudo, é importante ressaltar que ambas sofrem alterações nas características do solo, provocadas por diversos fatores.

Local e Metodologia de Retirada das Amostras

A delimitação do terreno escolhido e o local exato de retirada das amostras podem ser verificadas na Figura 3.1, o qual está situado na região de Bragança-Portugal e é caracterizado por ser uma área que tem grande predominância de solos finos. A superfície definida servirá de base para a implementação de uma indústria local e foi escolhida por já existir outros estudos complementares realizados nas proximidades dessa região.



Figura 3.1: Local de retirada das amostras para estudo.

A retirada das amostragens necessárias para a realização dos ensaios se procedeu em um período chuvoso, estando a superfície do terreno coberto por uma camada de solo plástico, característica de um solo argiloso. Contudo, para a realização da obra e antes da retirada das amostras, o terreno em questão passou por um processo de terraplanagem, onde foi escavado cerca de 1,5 metros, conforme verifica-se na Figura 3.2a). Além disso, a Figura 3.2b) expõe que a foi aberta uma vala com cerca de 1 metro de profundidade no local, com a ajuda de uma retro escavadeira, de forma a obter uma melhor superfície para a cravação e retirada dos amostradores.



Figura 3.2: a) Corte no terreno em estudo; b) Vala aberta para cravação dos moldes.

Após a abertura da referida vala, foi necessário proceder com uma regularização manual no local de inserção dos cravadores, de modo a obter uma superfície plana e proceder com um melhor ingresso dos moldes no solo, conforme apresentado na Figura 3.3a). Posteriormente, em concordância com a Figura 3.3b), os amostradores foram apoiados sobre o solo e com a ajuda de uma trave de madeira, sofreu uma lenta reação da pá da retro escadeira, que permitiu sua inserção no solo.



Figura 3.3: a) Regularização manual da superfície; b) Cravação dos amostradores no solo; c) Escavação manual para retirada dos moldes

Posteriormente, a Figura 3.3c) demonstra que as amostras de solo foram retiradas do terreno por meio de uma escavação manual no seu entorno, de forma a evitar grandes perturbações na sua estrutura. Por fim, após a extração, foram rapidamente cobertas por varias camadas de uma película plástica, de modo a evitar variações de humidade.

3.2.2 Ensaios de Caracterização Física do Solo

A caracterização física de um determinado solo é realizado através de diferentes ensaios, que permitem determinar e identificar as principais propriedades das partículas que constituem o material analisado. Os resultados obtidos são responsáveis por complementar e ajudar na análise dos resultados dos ensaios mecânicos posteriormente realizados. Todos os ensaios efetuados e seus respectivos resultados são apresentados nos tópicos seguintes.

3.2.2.1 Ensaio de Limites de Atterberg

A realização desse ensaio tem por objetivo a determinação dos principais limites de consistência do solo, que permite detalhar o grau de ligação entre as suas partículas. Esses parâmetros são traduzidos em *Limite de Liquidez* (LL) e *Limite de Plasticidade* (LP), sendo obtidos através da realização de ensaios guiados pela normativa *NP-143:1969* [29].

A definição do limite de liquidez é traduzida pelo teor em água pelo qual o solo passa a ter um comportamento líquido, enquanto o limite de plasticidade é dado ao teor de água pelo qual o solo passa de um estado plástico para um estado semi-sólido, ou seja, não tem mais a capacidade de ser moldado. Esses parâmetros se traduzem nos índices de *plasticidade* e *consistência*, sendo o primeiro expressa pela quantidade de água que o solo pode absorver em seu estado plástico, ou seja, a porcentagem existente entre o limite plástico e líquido, enquanto o segundo define a consistência do solo.

A Tabela 3.2 apresenta todos os resultados do ensaio realizado para o solo em estudo.

Tabela 3.2: Resultados do Ensaio dos Limites de Atterberg.

PARÂMETROS	RESULTADOS
Limite de Liquidez [LL]	47,9
Limite de Plasticidade [LP]	43,1
Índice de Plasticidade [IP]	4,8
Índice de Consistência [IC]	4,22

Assim sendo, os resultados alcançados podem ser classificados baseados em diversas metodologias empíricas desenvolvidas por alguns autores. A metodologia desenvolvida por Jenkins(Caputo, 1987) [30] permite classificar a plasticidade do solo mediante o valor do índice de plasticidade, sendo este caracterizado como um solo fracamente plástico. Da mesma forma, podemos caracterizar a argila deste solo como sendo dura, segundo os estudos desenvolvidos por (Matos Fernandes,2006) [4].

3.2.2.2 Pesos Volúmicos e Teor em Água

A realização dos referentes ensaios tem por objetivo a determinação do quociente, expresso em porcentagem, entre a massa de água que evapora de uma amostra por sua massa seca, cujo procedimentos são orientados detalhadamente pela normativa nacional *NP-84 (1965)* [31]. Os valores dos pesos volúmicos e do teor em água, estimados a partir de do ensaio em 3 provetes, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultados dos Pesos Volúmicos e do Teor em Água.

Parâmetros	Amostras			
	1	2	3	Média
Peso Volúmico - γ (kN/m^3)	17,2	16,5	17,1	16,9
Peso Volúmico Seco - γ_s (kN/m^3)	12,6	12,0	12,3	12,3
Teor em Água - w (%)	36,1	36,0	39,6	37,3

3.2.2.3 Ensaio de Compactação Proctor

O ensaio de compactação proctor é um procedimento realizado segundo as normativas indicadas na *LNEC E 197:1966* [32] e tem o propósito de determinar a relação entre o teor em água e a baridade seca de uma determinada amostra de solo, fazendo variações de humidades e com o objetivo de encontrar o ponto de compactação máxima. O resultado

do solo em estudo neste trabalho tem os resultados apresentados na Tabela 3.4, obtendo um teor em água ótimo de 26,3% e um peso volúmico seco máximo de 14,2 kN/m^3 .

Tabela 3.4: Resultado do Ensaio de Compactação Proctor.

Parâmetros	Amostras				
	1	2	3	4	5
Teor em Água - w (%)	21,1	24,2	26,3	28,9	31,4
Peso Volúmico Seco - γ_s (kN/m^3)	13,8	14,1	14,2	14,1	13,8

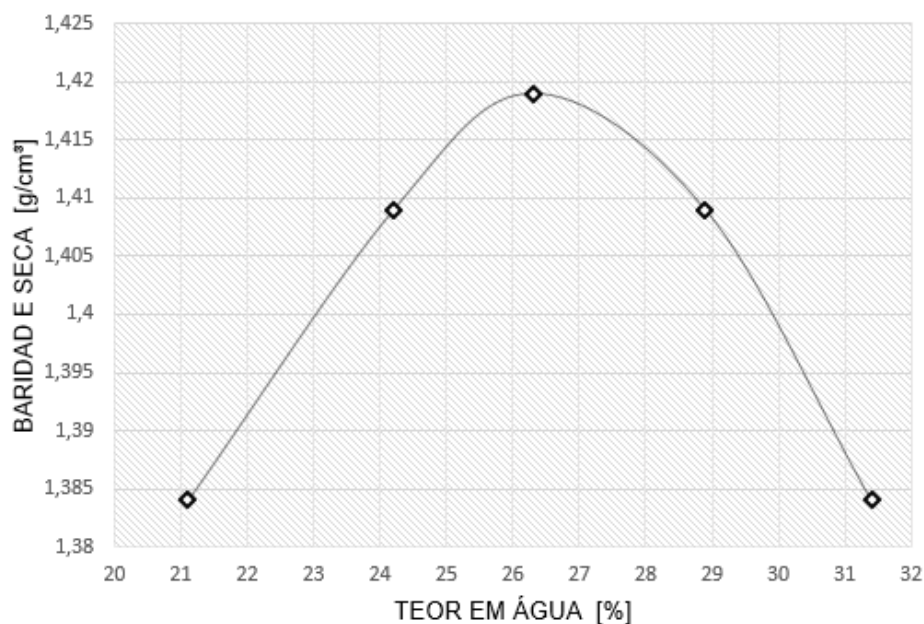


Figura 3.4: Gráfico da Curva de Compactação Proctor

3.2.2.4 Ensaio de Granulometria

A classificação do solo e a caracterização de algumas de suas propriedades são realizadas através dos resultados obtidos na distribuição granulométrica do material, sendo esta adquiridas pelas etapas de peneiração (*LNEC E 239 - 1970* [33]) e sedimentação (*LNEC E 196 - 1966* [34]).

Através da análise da curva granulométrica apresentada na Figura 3.5, pode-se observar que de um modo geral a amostra apresenta uma distribuição granulométrica extensa. Contudo, analisando em pormenor a distribuição granulométrica, verifica-se que a amostra apresenta cerca de 70% de retidos no peneiro n° 200, avaliando que amostra é constituída basicamente por partículas grossas.

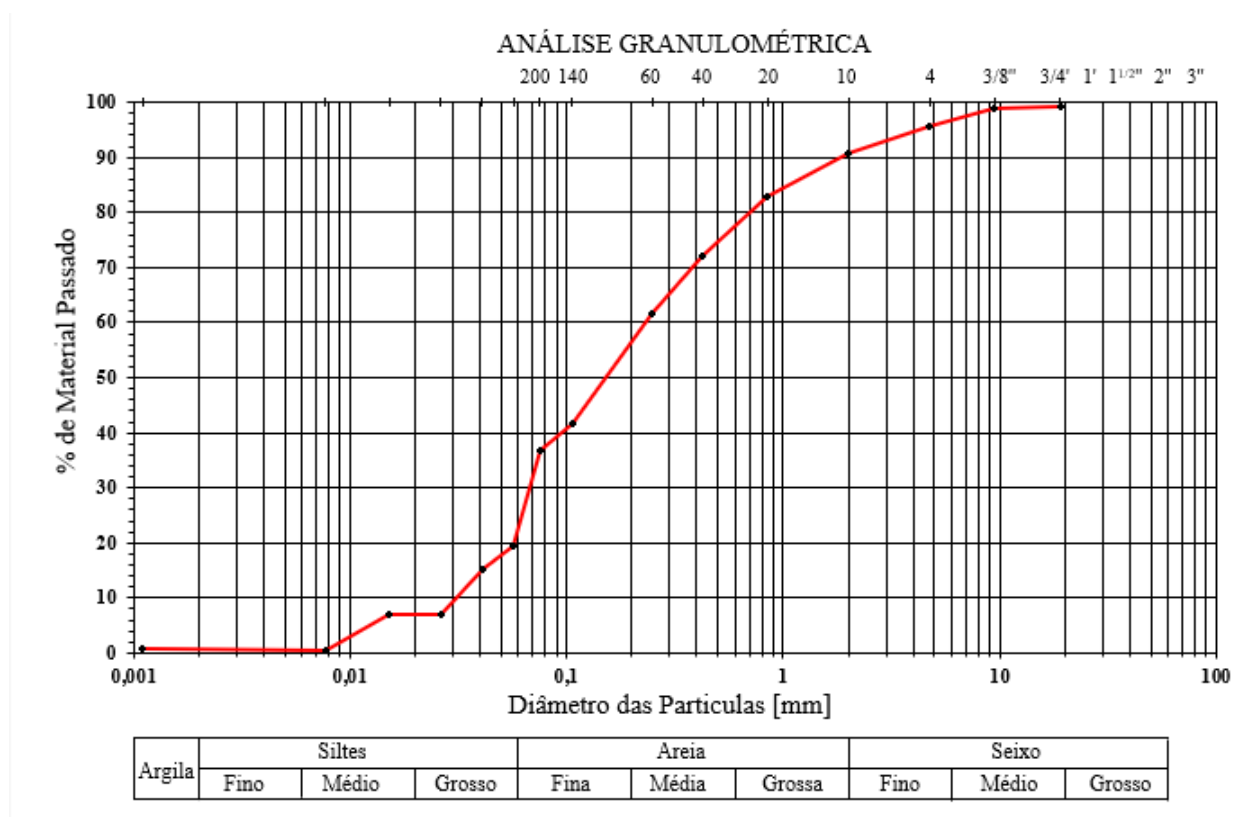


Figura 3.5: Gráfico da Curva Granulométrica.

As frações obtidas da distribuição granulométrica da amostra encontram-se na Tabela 3.5. A porção de solo mais fina da amostra é o silte, sendo que a fração de argila é quase nula, não sendo esta apresentada na tabela abaixo.

Tabela 3.5: Frações e Distribuições Granulométricas da amostra

Frações Granulométricas	Distribuição Granulométrica
Seixo	10%
Areia	70%
Solos finos	20%

Por fim, é possível obter o coeficiente de uniformidade e de forma da curva granulométrica estudada, sendo analisados através da relação entre os diâmetros das partículas correspondentes a 10, 30 e 60% dos materiais passados. A Tabela 3.6 expõe os valores desses diâmetros efetivos e os correspondentes valores de C_u e C_c , que posteriormente examinados permitem caracterizar o solo com uma curva suave, o que indica um solo bem graduado, ou seja, obtém-se uma grande variedade de partículas.

Tabela 3.6: Diâmetros Efetivos e Valor dos Coeficientes

Diâmetros Efetivos	Valores [mm]
D10	0,03
D30	0,07
D60	0,25
Coeficientes	Resultados
C_u	8,33
C_c	0,65

3.2.2.5 Classificação Unificada do Solo

A Classificação Unificada dos Solos é o método mais conhecido e usual para promover a classificação do solo quanto sua aplicação como material de construção. A metodologia

criada pelo engenheiro Arthur Casagrande é um sistema composto por grupos, simbolizado por um par de letras e associado a uma nomenclatura. Esses grupos podem ser visualizados na Tabela 3.7, os quais são posteriormente divididos em quinze subgrupos, consoante as características apresentadas pelos ensaios de composição granulométrica e limites de Atterberg.

Tabela 3.7: Nomenclaturas da Classificação Unificada - *ASTM D 2487-98* [1].

Letra	G	S	M	C	O	P	W	H	L
Significado	Gravel	Sand	Silt	Clay	Organic	Poorly Graded	Well Graded	High Plasticity	Low Plasticity

O sistema de classificação apresentado é padronizado pela norma internacional ASTM D 2487-98 [1], a qual promove uma divisão baseada em percentagem ponderais da composição granulométrica do solo e dos parâmetros obtidos pelos limites de Atterberg. Os principais valores para análise correta da tabela de classificação são retirados do gráfico de distribuição, do qual se obtém os valores de entrada na tabela de Casagrande. Por fim, ao final do referido procedimento, obteve-se a classificação SM para o solo examinado, se caracterizando como uma areia-siltosa.

3.3 Preparação da Amostra em Laboratório

Amostras Indeformadas

O local e a metodologia de coleta das amostras indeformadas foram detalhados no tópico 3.2.1. Contudo, é importante ressaltar, que ao final do referente processo, as amostras recolhidas foram submetidas a procedimentos de transporte e armazenamento conforme as orientações da normativa ASTM D4220 [35], para as amostras pertencentes ao grupo C ou D. As recomendações prescritas na norma têm por objetivo a preservação do teor de humidade da amostra, bem como evitar alterações em sua secção transversal e minimizar ao máximo as perturbações em sua estrutura.

Além disso, destaca-se que os moldes utilizados na coleta continham dimensões superiores as utilizadas no ensaio de corte direto, de modo que fosse possível a preparação de no mínimo três amostras semelhantes [13]. Em laboratório, o procedimento inicial foi caracterizado pela retirada da película de proteção e o nivelamento cuidadoso das partes superiores e inferiores do molde, bem como a limpeza de suas laterais. Posteriormente, uma extremidade do molde foi apoiada sobre uma base metálica, contendo um furo de diâmetro análogo ao da amostra, e na outra extremidade foi colocado um disco para apoiar a amostra sobre um macaco hidráulico, que lentamente retira a amostra.

Logo após a extrusão e com a ajuda de um fio, a amostra cilíndrica foi dividida em seções, cuja espessura corresponde a altura desejada para o teste. Por fim, um molde quadrado ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) é pressionado sobre a amostra, permanecendo em seu interior somente a estrutura desejada, sendo retirada o excludente de solo das laterais.

Amostras Reconstituídas

A reconstituição de amostras se caracteriza como um método laboratorial de fácil execução, para reconstruir provetes de solos, cuja estrutura natural foi modificada. O objetivo desse procedimento é remoldar o solo natural, conservando suas propriedades físicas encontradas in-situ, mas decompondo as ligações entre suas partículas e eliminando suas orientações preferenciais, de forma a obter uma macroestrutura mais homogênea. Sendo o processo de realização para amostras aplicadas no ensaio de corte direto, baseado nas orientações especificadas na norma *ASTM 3080-11* [13].

O solo para a reconstituição foi retirado do mesmo local de obtenção das amostras indeformadas e colocado em um saco plástico para transporte e armazenamento. Em laboratório, a porção necessária de solo para compactação foi espitulada através dos procedimentos de parametrização física das amostras indeformadas, tais como peso específico e teor de umidade, tendo os valores apresentados na Tabela 3.8. A partir disso, as amostras foram reconstituídas com peso volúmico seco e teor em água naturais do solo.

Tabela 3.8: Parametrização dos Índices Físicos da Amostra Indeformada.

PARÂMETROS	RESULTADOS
Peso Volúmico - γ [kN/m^3]	17
Peso Volúmico Seco - γ_d [kN/m^3]	13
Teor em Água - w [%]	36
Teor em Água Natural - [%]	35,1

A realização do procedimento foi iniciada com a recolha de uma determinada quantidade de amostra e a colocando dentro de um recipiente. Posteriormente, foi retirada as partículas de solo com dimensões superiores a 1/6 da altura da amostra (22 mm), e o restante é levada para a estufa e armazenada a uma temperatura de 105 °C por um periodo de 16 à 24 horas, conforme estipulado pela normativa nacional *NP-84 (1965)*. Ao final desse processo, o solo seco é retirado e pesado somente a quantidade necessaria para a amostra (276,16 g), a qual recebe por meio de um dosador e por etapas, o volume de água estipulado para se obter o peso volúmico pretendido. É importante ressaltar que esse processo deve ser realizado num ambiente de humidade controlada e de forma ágil, para evitar possíveis alterações no teor de humidade.

Além disso, o recipiente contendo o solo humido foi coberto por várias camadas de filme plástico e mantido em repouso por 18 horas antes da compactação, conforme estabelecido na norma *ASTM 3080-11 [13]*, contudo, a norma aborda apenas o tempo estimado para uma quantidade limitada de classificação de solos, como não refere-se a solos **SM**, utilizou o tempo estimado para solos **SC**, segundo a classificação *D 2487 [1]*.

Conforme apresentado na Figura 3.6, a compactação da amostra no molde é o último processo executado, para posterior transferência à caixa de corte. A primeira etapa foi realizada com o objetivo de encontrar o número de camadas a ser aplicada, além da quantidade de golpes, de modo que todo o material coubesse no protótipo e atingisse o peso desejado. O resultado obtido foi a inserção de 5 camadas de solo, golpeadas através de um compactador de área igual a da amostra, de modo que os limites de cada camada

não fosse coincidente com o plano de corte definido pela caixa. Além disso, é importante ressaltar que a superfície de cada camada foi escarificada, de modo a aumentar o atrito entre as bases. Por fim, a amostra compactada foi inserida dentro da caixa de corte, juntamente com as placas de apoio ao ensaio.



Figura 3.6: a) Compactador; b) Camada de solo escarificada; c) Amostra final reconstituída.

3.4 Equipamento de Corte Direto

Os ensaios de corte direto são realizados através de um equipamento simples e de fácil manuseio, cuja definições e procedimentos estão estabelecidos pela normativa internacional *ASTM 3080-11* [13]. As especificações citadas são de suma importância para a correta execução dos ensaios, sendo estas apresentadas de forma detalhada nos tópicos abaixo.

3.4.1 Dispositivo de Corte

O dispositivo de corte existente no Laboratório de Geotecnia da ESTIG-IPB, do qual a Figura 3.7 constitui um exemplo, é um equipamento simples, cuja estrutura é formada por uma travessa apoiada em duas bases, e foi construída de forma a evitar o efeito de torque na amostra. Sua constituição é formada por uma unidade elétrica motorizada, com

mecanismos de regulação de velocidades e parâmetros de controle do ensaio, além de conter um suporte removível com base em rolamento para armazenamento da caixa de corte, um anel dinamométrico para medição das forças cortantes, um sistema em alavanca para aplicação de cargas verticais e dispositivos capazes de medir os deslocamentos verticais e horizontais da amostra. Todos estes componentes do dispositivo de corte podem ser verificados na Figura 3.8



Figura 3.7: Dispositivo de Corte do Ensaio de Corte Direto.

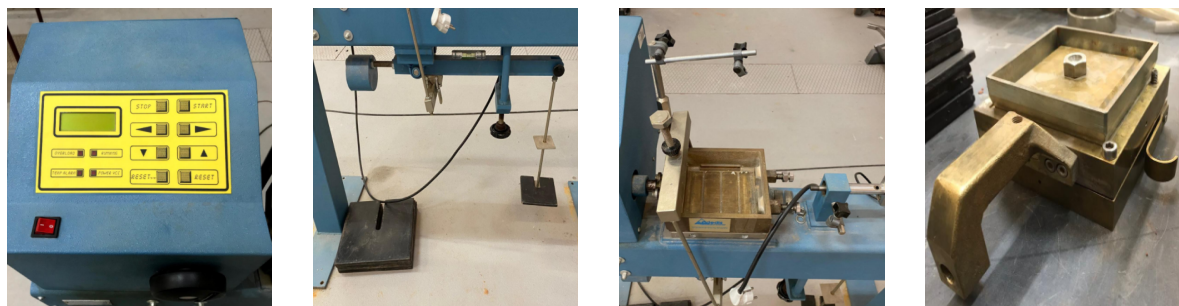


Figura 3.8: a) Painel de Controle do Ensaio; b) Sistema de Alavanca para aplicação de Força Axial; c) Suporte da Caixa de Corte; d) Caixa de Corte.

Além disso, o aparato de ensaios deve ser capaz de permitir a drenagem da amostra submersa em água através das pedras porosas presentes na sua parte superior e inferior da caixa de corte, bem como aplicar uma força de corte ao longo de um plano predefinido e paralelo as faces da amostra. Por fim, é importante ressaltar que as partes constituintes do dispositivo são fabricados com materiais anticorrosivos, já que estão em frequente contato com água e outras substâncias presentes no solo.

3.4.2 Caixa de Corte

A caixa de corte é uma estrutura em formato quadrado, apoiada sobre uma caixa metálica e dividida em duas partes iguais num plano horizontal e paralelo a base do suporte, de modo a ser capaz de deslizar uma sobre a outra. Suas dimensões podem ser de $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ou $100 \times 100 \text{ mm}^2$, e abriga a amostra de solo a ser estudada, bem como outras placas pertencentes ao ensaio. Os itens que compõe este arranjo está apresentado esquematicamente na figura 3.9.

Os principais componentes da caixa de corte são as bases superiores e inferiores, que apesar de divididas, as metades são unidas por parafusos de alinhamento, posteriormente retirados para o início do ensaio e por parafusos de fenda permanentes, cujo objetivo é controlar o espaçamento entre as partes e diminuir o atrito quando aplicado o deslocamento. A parte inferior é fixada na caixa de suporte, a qual fornece ou uma reação contra esta base ou oferece um apoio sólido com provisões para alinhar uma metade da caixa, que é livre de se mover coincidentemente com a força de corte aplicada, enquanto a parte superior é conectada a um sistema de carga para forças de corte.

As pedras porosas são placas que permitem a drenagem da amostras na parte superior e inferior, servindo também para transferir as tensões de corte horizontal para as amostras. Sua permeabilidade deve ser substancialmente maior que a do solo a ser ensaiado, mas suficientemente texturizado de modo a não permitir a absorção de partículas sólidas em seu meio, podendo ser evitada com a utilização de papel entres os dois materiais.

As placas nervuradas são superfícies que podem ou não apresentar orifícios em sua

modelagem, consoantes o modo de ensaios à que se deseja realizar, drenados ou não drenados. A placa nervurada inferior tem como base uma placa maciça, para vendar o fundo da caixa de corte, enquanto a superior está em contato com a placa de carga.

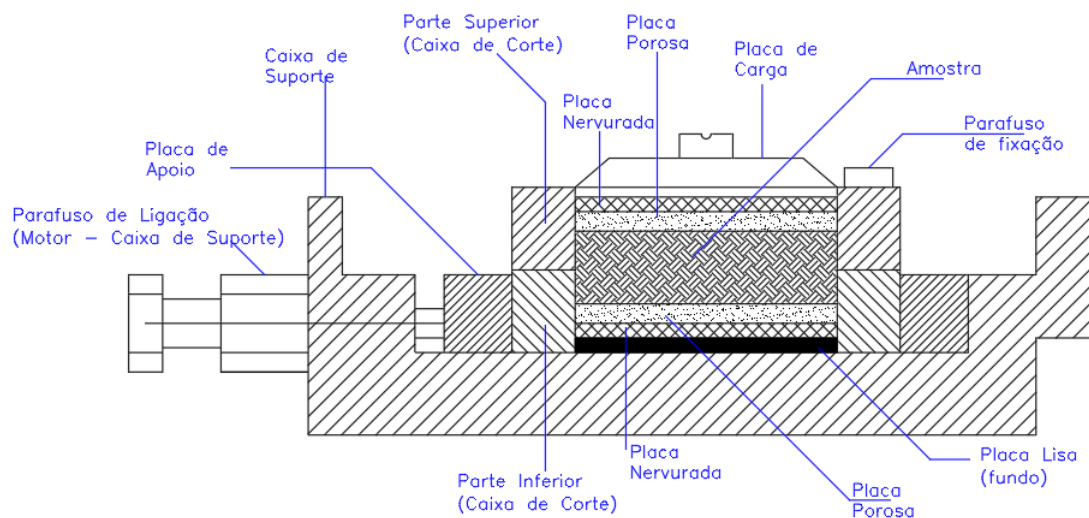


Figura 3.9: Esquema transversal da caixa de corte.

Por fim, a placa de carga é uma estrutura rígida e localizada no topo da caixa de corte, sendo provida de uma concavidade em parte superior, a qual se recebe a carga axial do dispositivo de carregamento e a transmite verticalmente para a amostra.

3.4.3 Painel de Controle

O painel de controle apresentado na Figura 3.10 consiste em uma ferramenta armazenada na unidade motorizada do equipamento, com diferentes botões que permitem selecionar e alterar as configurações necessárias para a realização do ensaio, tais como velocidade de aplicação do corte, deslocamento máximo e a velocidade de reversão da amostra.

As luzes de controle constituem um importante papel no desempenho do ensaio, sendo capazes de indicar irregularidades e falhas durante todo o procedimento. O manual do equipamento utilizado [36] informa o significado de todas as funções, caracterizando a luz

Power VCC como uma indicadora de que há um abastecimento correto da seção eletrônica, enquanto o *Running* indica que o microprocessador da máquina está trabalhando. Contudo, especifica que a luz de *Overload* acende quando se atinge a capacidade máxima de carga do anel dinamométrico ou quando a chave de fim de curso totalmente estendida intervém no ensaio e que a luz de *Temp Alarm* apenas fica acesa quando é necessário indicar um bloqueio na máquina devido a quebra da chave de limite zero.

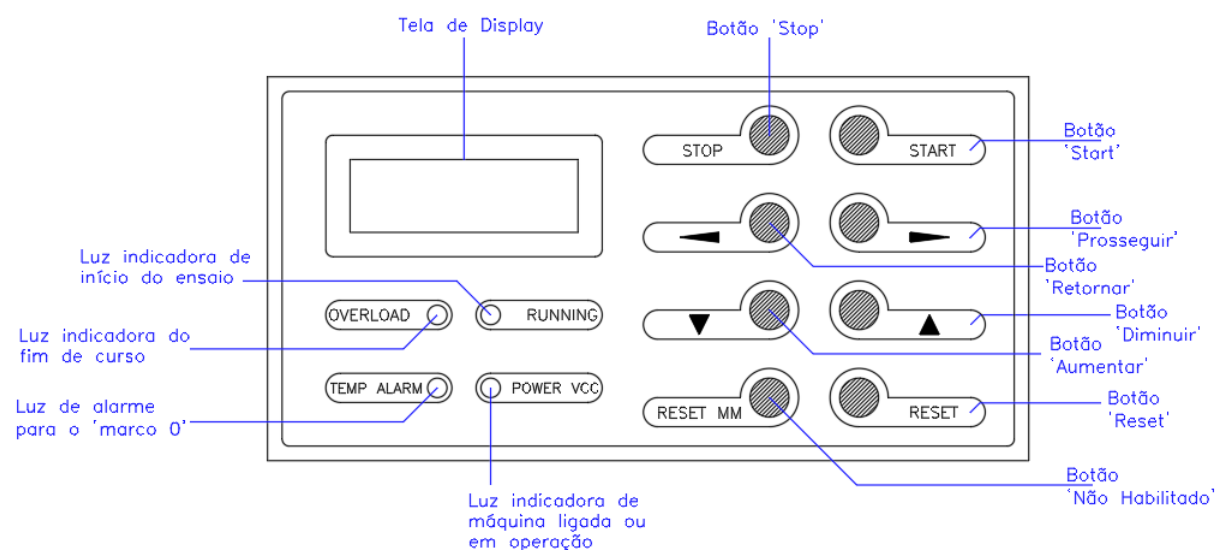


Figura 3.10: Desenho esquemático do Painel de Controle;

3.4.4 Dispositivo de Carregamento

O sistema de carregamento do ensaio de corte direto compõe a última parte do dispositivo de corte e tem como função principal, a aplicação de cargas na amostra. A construção dessa peça é formada por dispositivos em alavanca ou pneumáticos, que sejam capazes de aplicar esforços normais e cortantes na porção de solo em estudo.

O sistema de aplicação e medição da carga axial no topo da caixa, é caracterizado por um mecanismo em alavanca na parte inferior da base de ensaio, o qual é ativado através da inserção pesos mortos. A aplicação desses pesos é realizada de acordo com a necessidade de tensão estimada para consolidação, sendo traduzida numa relação 1:10, ou

seja, a cada 1 kg é aplicado uma carga de 10 kg no topo da amostra. Contudo, a norma *ASTM 3080-11* especifica que o dispositivo seja capaz de manter a força normal com um excedente máximo de $\pm 1\%$ do total estimado.

Por fim, a aplicação de tensões cortantes é realizada através da ligação entre o equipamento e a parte superior da caixa de corte, a qual está submetida a uma taxa uniforme de deslocamento (variável entre 0,0025 a 3,0 mm/min). A taxa de desvio selecionada é mantida através do motor elétrico presente no interior da unidade motorizada e a tensão de corte medida por um anel dinamométrico de alta precisão.

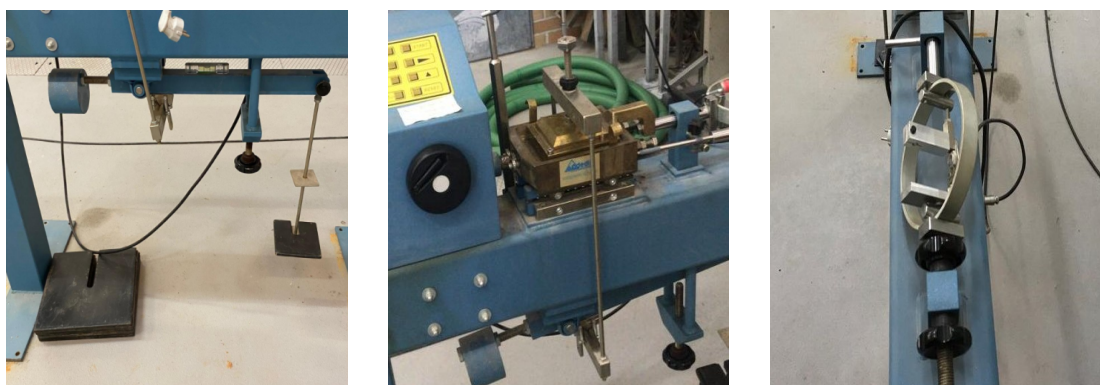


Figura 3.11: a) Alavanca e Pesos; b) Sistema de aplicação da carga axial ; c) Anel dinamométrico.

3.4.5 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição precisa e detalhada de dados na realização dos ensaios laboratoriais é fundamental na correta análise das características físicas e mecânicas de um determinado solo. Contudo, a dinâmica proposta pelo ensaio de corte direto é baseada na obtenção de resultados por meios de sensores analógicos e resultados anotadas manualmente, possibilitando a ocorrência de erros humanos.

Por consequência, uma configuração experimental foi desenvolvida entre os Laboratório de Geotecnia e Centro de Pesquisa em Digitação e Robótica Inteligente, do Instituto

Politécnico de Bragança (IPB), de modo a substituir os mecanismos antigos de alcance dos resultados e evitar a possibilidades de falhas. O sistema de automação desenvolvido é baseado na obtenção de resultados com alta repetibilidade, por meio de sensores LVDT (Linear Variable Differential Transfomer), uma placa de aquisição de dados e um aplicativo software LabVIEW, cujo painel de interface é mostrado na Figura 3.12.

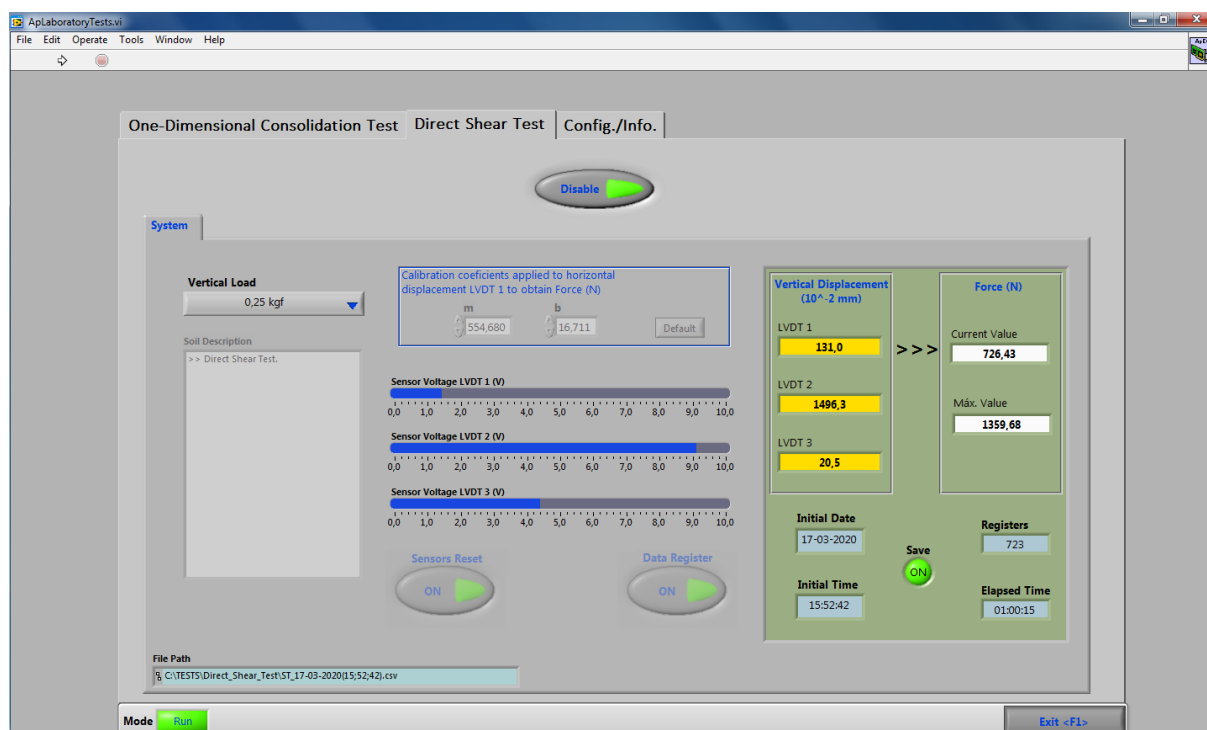


Figura 3.12: Painel de Interface do usuário.

Os sensores LVDT utilizados para o teste, incorporam um condicionamento de sinal necessário para obter uma saída diretamente proporcional ao deslocamento linear, o qual é alimentado por uma corrente contínua e possui uma faixa de entrada de ± 5 mm. Sua característica foi obtida experimentalmente, sendo alimentada por uma tensão de ± 5 V. A sensibilidade do sensor é de quase 600 mV/mm, com uma tensão de saída de $\pm 3,5$ V e uma corrente de entrada de 12mA. Para a placa de aquisição de dados foi utilizada a NI PCI-6202, que é uma placa multifuncional genérica, e apresenta características de barramentos

PCI, 8 entradas analógicas diferenciais, 16 entradas analógicas de extremidade única, conversor analógico-digital de 16 bits, taxa de amostragem de 250 kS/s e 24 I/O digitais [25].

Na utilização do equipamento para o ensaio, podemos demonstrar na Figura 3.13, os 3 sensores utilizados, os quais numerados sequencialmente são capazes de realizar a medição da deformação do anel dinamométrico para obter a força de corte (LVDT1), o deslocamento horizontal da caixa inferior (LVDT2) e por fim o deslocamento vertical da placa rígida superior (local de aplicação da força normal), com o LVDT3. Desse modo é possível obter os dados mencionados e a posterior construção do gráfico em função da tensão tangencial e deslocamento relativo, determinando assim, os valores dos parâmetros mecânicos do solo.

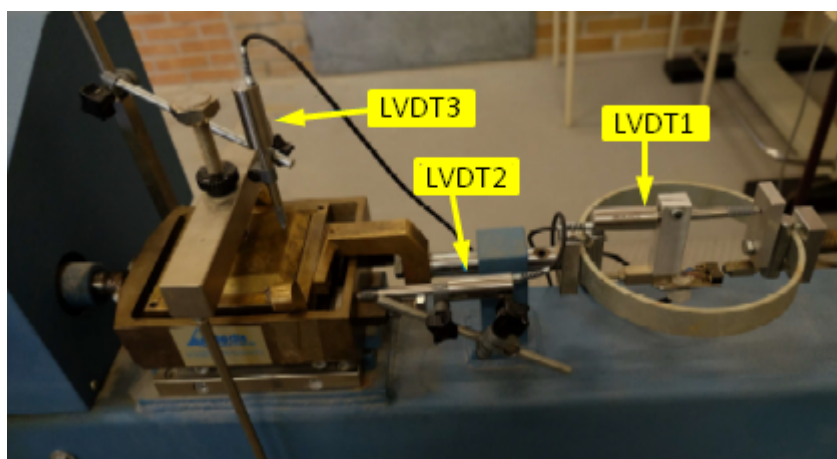


Figura 3.13: Instrumentação LVDT para aparelhos de corte direto.

O intervalo de tempo para a medição dos dados, a carga vertical utilizada e a descrição do solo podem ser escolhidas pelo usuário na interface do LabVIEW antes do início da realização do ensaio na aba de “CONFIG./INFO.”, sendo que a primeira opção permite selecionar períodos de tempo entre 1,5,10,15,20 e 30 segundos, enquanto as cargas podem variar entre 0,25 e 256 kg. Na janela principal do software é possível ver a medição dos valores em cada LVDT na escala de 10^{-2} mm, além das opções de iniciar ou parar o registro

dos sensores a qualquer instante. Ao fim do ensaio, os dados (com taxa de amostragem de 5000 Hz) obtidos durante sua realização são lidos e posteriormente apresentados por meio de arquivo CSV (arquivo de valores separados por vírgula) no Software Excel.

3.5 Considerações Finais

As descrições realizadas nesse capítulo, permitiu demonstrar as etapas necessárias para a correta execução de ensaios laboratoriais, desde a recolha e preparação de amostras reconstituídas e indeformadas até os procedimentos e orientações normativas necessárias para obtenção e avaliação dos resultados referentes as propriedades físicas do solo.

Com isso, a necessidade de seguir as recomendações imposta pelas normas apresentadas, é fundamental para uma correta obtenção dos parâmetros físicos do solo, permitindo prever as tendências comportamentais do maciço em estudo e os correlacionar com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, sendo capaz de refletir uma realidade mais próxima daquela encontrada em campo.

Por fim, a demonstração do equipamento de corte direto, permite avaliar e entender de forma clara sobre o funcionamento e a finalidade de cada componente, sendo um fator essencial para a correta execução do plano de trabalho, através dos procedimentos de ensaio que serão apresentados o capítulo 4.

Capítulo 4

Apresentação de Resultados

4.1 Considerações Iniciais

A fácil execução dos ensaios de corte direto, cujo esquema simplificado das etapas de ensaio é apresentado na Figura 4.1, é um dos principais fatores que influenciam sua ampla utilização para caracterizar as propriedades mecânicas de um solo em laboratório. Dessa forma, a normativa ASTM3080 descreve de forma detalhada os procedimentos a serem realizados para um correto desempenho do teste e a obtenção de resultados com maior fiabilidade.

Sendo assim, neste capítulo é abordado as especificações normativas para a execução dos ensaios e a metodologia a ser realizada com a implementação da configuração experimental vinculada ao equipamento de corte direto. Além disso, são apresentados os resultados obtidos através de alguns ensaios estipulados no plano de trabalho descrito no capítulo anterior, os quais foram tratados e plotados graficamente para melhor análise e posterior discussão do comportamento mecânico do solo quando submetido a variadas velocidades de aplicação de tensão de corte e cargas axiais.

Contudo, é importante ressaltar que os testes foram realizados apenas para as amostras reconstituídas, dado a impossibilidade de realizar todos os ensaios previstos no capítulo 3.

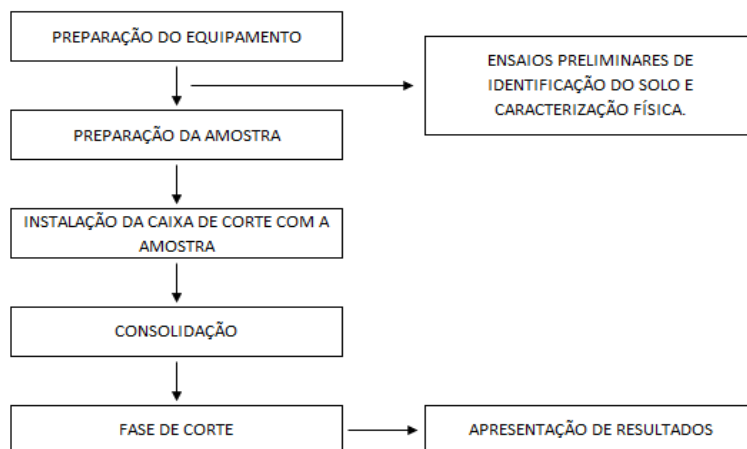


Figura 4.1: Esquema plano de desenvolvimento do ensaio.

4.2 Metodologia de Ensaio

Preparação e Montagem da Amostra no Equipamento

O processo de execução do ensaio é iniciado com a recolha de amostras indeformadas e remexidas do local a ser analisado e posterior transporte para laboratório, bem como a previa definição do peso específico e teor em água a serem utilizados, conforme descrito no Capítulo 3. Em seguida, após a preparação das amostras a serem testadas, o primeiro passo é montar a caixa de corte. Primeiramente, a parte inferior e superior da caixa são sobrepostas e unidas através dos parafusos de fixação, sendo posteriormente colocada uma placa sólida no fundo da caixa e sobreposta por uma placa rugosa com perfurações que permitem a drenagem da amostra durante o ensaio e uma placa de pedra porosa.

As pedras porosas húmidas são colocadas nas extremidades expostas da amostra e recomenda-se a utilização de um papel filtro entre as superfícies, de modo a evitar que partículas de solo entrem nos poros das pedras. A amostra é transferida do molde para a caixa de corte com a ajuda do compactador, contudo, esse processo requer sensibilidade em sua realização, de modo a evitar perturbações e possíveis fragmentações da amostra. A montagem é finalizada com a inserção de outra placa rugosa sobre a pedra porosa e por fim, é colocado a placa de carga no topo da caixa de corte. As etapas do processo podem

ser verificado na Figura 4.2.

Com a caixa finalizada, o próximo passo é colocá-la dentro do recipiente do equipamento de ensaio que complementa o dispositivo de corte, a qual contém dois parafusos em sua parte inferior e tem por objetivo manter fixa a parte de baixo da caixa de corte, além disso, a parte superior da caixa é conectada ao sistema de carga do anel dinamométrico, de forma que nenhuma força de corte seja imposta pelo dispositivo. Posteriormente, o sistema de alavanca com pesos mortos é ajustado para a aplicação da carga vertical na amostra, esse processo é realizado de forma a ajustar a barra de alavanca para ficar nivelada horizontalmente e não transmitir nenhuma carga axial para a amostra de teste.

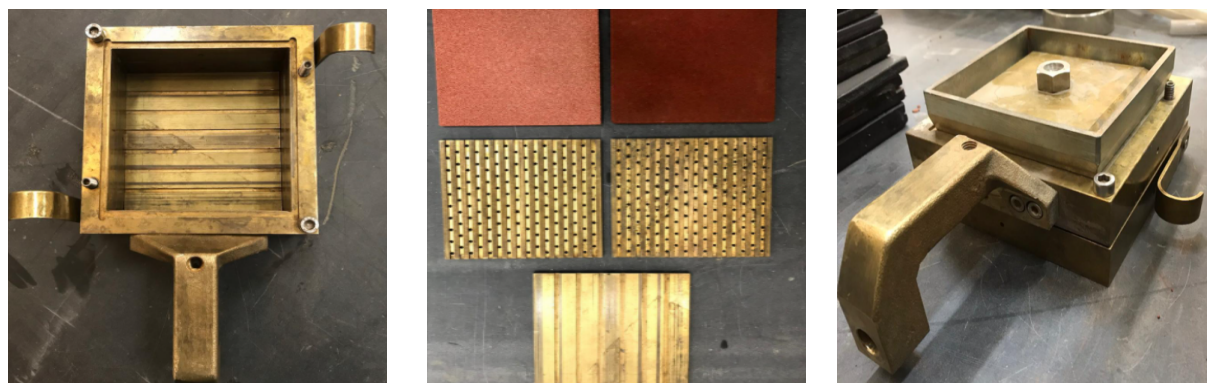


Figura 4.2: a) Caixa de corte com a ligação; b) Placas de montagem; c) Caixa de corte finalizada.

Consolidação

A etapa de consolidação é a primeira fase de ensaio e se caracteriza pela aplicação de uma carga axial no topo da amostra, através do sistema de alavanca e pesos mortos. Esse procedimento é iniciado com o alinhamento do sistema de aplicação de cargas com a placa de transmissão, sendo em seguida, adicionado o peso necessário para aplicar a tensão normal estipulada para o ensaio na estrutura suspensa da alavanca, a qual está alinhada horizontalmente.

Antes de iniciar a aplicação de carga, é necessário verificar se todos os componentes

estão assentados e alinhados dentro da caixa de corte, principalmente a placa de transmissão de carga, de modo que seja distribuído uniformemente toda a tensão normal. Após a verificação, o sensor LVDT 3 é pressionado sobre a placa, de forma a permitir deslocamentos de compressão ou expansão. O software LabVIEW é então aberto e os sensores são zerados, de forma a iniciar o processo com um deslocamento nulo.

Com o dispositivo de medição ajustado e calibrado, bem como os pesos aplicados, a etapa de consolidação pode ser iniciada através do acionamento do sistema de alavanca, realizada por meio da rotação do parafuso de regulação. Em simultâneo, é acionado o botão de início do software, o qual deve ser previamente definido a carga de aplicação e o intervalo de tempo desejado para medição dos deslocamentos. Ao final da consolidação primária, verificada quando a variação de deslocamento ao longo do tempo permanece constante, para-se a medição e os dados obtidos são transferidos para um arquivo .csv em EXCEL, podendo ser esses resultados plotados contra o log ou raiz quadrada do tempo (em min), sendo utilizados posteriormente para determinar o tempo mínimo estimado do início até a rotura da amostra, tendo como base os tempos necessários para atingir 50% e 90% da consolidação. Ao final desse processo, os parafusos de alinhamento são retirados e os parafusos de fenda são recuados, para diminuir o atrito entre as partes superiores e inferiores da caixa durante a etapa de corte da amostra. A Figura 4.3 apresenta a amostra durante o processo de consolidação e o gráfico representativo da consolidação ao longo do tempo.

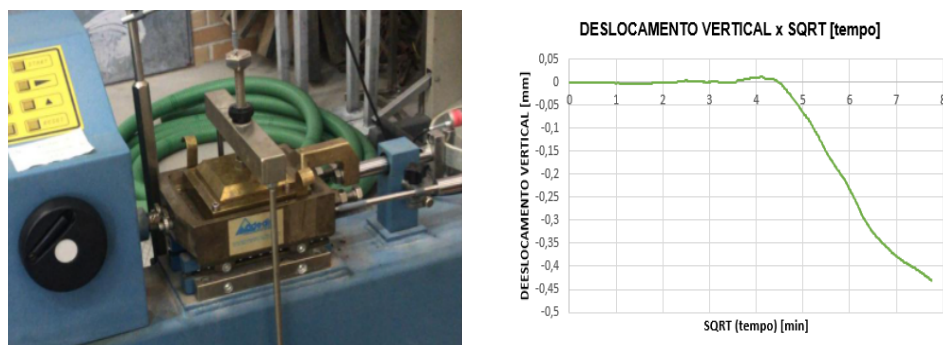


Figura 4.3: a) Processo de consolidação da amostra; b) Gráfico da consolidação em função da raiz quadrada do tempo.

Por fim, é importante ressaltar que a inserção de água no recipiente que contém a caixa de corte é importante para auxiliar na drenagem da amostra, bem como manter a saturação durante todo o processo de ensaio, sendo que o volume de água deve ser mantido constante até o final do ensaio. Contudo, essa submersão é recomendada principalmente para os solos recolhidos abaixo do nível freático.

Rotura da Amostra

A segunda etapa do ensaio de corte direto é realizada logo após o processo de consolidação da amostra e se caracteriza como a fase de corte. Esse procedimento é dado pela aplicação de um deslocamento horizontal na amostra, o qual é aplicado de forma contínua e controlada através da máquina motorizada do equipamento.

Antes do início do processo de deformação, é necessário verificar a inexistência de qualquer ligação entre as duas partes da caixa de corte. Logo, com a ausência de ligações, o sensor LVDT1 é então conectado na estrutura interna do anel dinamométrico com o objetivo de medir as forças de corte aplicadas e o LVDT2 é interligado a parte inferior da caixa para medir os deslocamentos horizontais. Contudo, é importante ressaltar que a ponta dos sensores deve ser apenas tocada nos locais de medição, de forma que não se atinja a capacidade máxima do LVDT durante a execução do ensaio.

Em seguida, deve ser selecionado a velocidade de deslocamento pretendida para o ensaio, bem como a velocidade de regresso do equipamento ao deslocamento zero no final do ensaio e o deslocamento máximo pretendido. Esses parâmetros são selecionados no display da máquina motorizada através dos botões apresentados no tópico 3.4.3.

Por fim, o LVDT3 é voltado a posição inicial apresentada antes da consolidação e os valores apresentados no painel de controle do LabVIEW são zerados através do botão “sensors reset” e na aba de “Config/Info.” são selecionadas o peso utilizado para a tensão vertical e o intervalo de tempo para as medições. Por último, a máquina motorizada é acionada através do botão “Start” e a medição automatizada do software acionada pelo botão “Data Register” localizado no painel de controle. Contudo, destaca-se a necessidade

de iniciar o ensaio e as medições de forma simultânea, de forma a evitar perda de dados logo no início do teste.

Ao final do processo, as medições do ensaio podem ser finalizados ao selecionar o botão "Stop" e os resultados exportados, podendo ser posteriormente plotados graficamente para melhor análise de resultados, conforme apresentado no seguinte tópico. Além disso, a Figura 4.4 apresenta uma amostra após a rotura ocorrida no ensaio, bem como as outras amostras ensaiadas.



Figura 4.4: a) Rotura da amostra após o ensaio de corte direto; b) Amostras ensaiadas.

4.3 Resultados e Análises

O processo de análise dos resultados é iniciado a partir do cálculo das tensões normais e tangenciais obtidas através da relação da área da secção transversal da amostra com a carga axial estática utilizada e as forças de corte medidas no anel dinamométrico, conforme apresentado na equações 4.1 e 4.2.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

onde:

→ τ é a tensão de corte [kPa]

→ F é a força de corte medida no anel dinamométrico [kN]

→ A é a área inicial da amostra [m^2]

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4.2)$$

onde:

→ σ é a tensão normal [kPa]

→ N é a força vertical que age sobre a amostra [kN]

Além disso, a determinação da taxa de deslocamento é fundamental na análise dos parâmetros mecânicos do solo, sendo obtido através da relação do deslocamento lateral relativo e o tempo decorrido de ensaio. Contudo, para realizar os ensaios previstos nessa dissertação, a taxa de deslocamento foi previamente definida, conforme apresentado no programa de trabalhos.

É importante destacar que no presente trabalho, a determinação da resistência de pico do solo e sua parametrização através da automatização do equipamento foram os focos principais, sendo estes baseados nos critérios determinados na norma de ensaio ASTM D-3080/D-3080M-11 [13]. Além disso, a realização dos testes se deram sobre tensões normais de 75, 150 e 300 kPa e com velocidades de 0.25, 1 e 2 mm/min, obtendo um deslocamento relativo máximo de 15 mm durante os ensaios.

Contudo, em ensaios dessa natureza e trabalhando-se com equipamentos de corte direto, espera-se a ocorrência de dispersão dos resultados, já que os ensaios não são realizados com o controle de drenagem. Sendo assim, fez-se necessário a realização do ensaio de no mínimo 3 amostras para cada velocidade, testando cada uma delas sobre um valor de tensão normal.

Os resultados obtidos durante a realização dos ensaios, englobam uma amostragem total de 9 ensaios, cada um sobre determinada carga axial e velocidade de carregamento. Estas mesmas amostras foram reconstituídas buscando garantir as mesmas propriedades naturais do solo, tais como peso específico, teor de humidade, índice de vazios e grau de saturação da amostra, e de modo a garantir a uniformidade entre todas, atendendo a limites de desvios aceitáveis.

Na análise de resultados, o primeiro parâmetro necessário para caracterizar a envolvente de resistência do solo ao corte e promover sua parametrização, é obter os valores máximos de tensão tangencial através dos gráficos demonstrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Estes modelos gráficos são obtidos através da correlação entre as tensões de corte suportadas naquele plano e o deslocamento horizontal aplicado, sendo o primeiro representado no eixo das ordenadas e o segundo no eixo das abscissas, possibilitando a obtenção do ponto máximo de tensão tangencial que a amostra pode suportar.

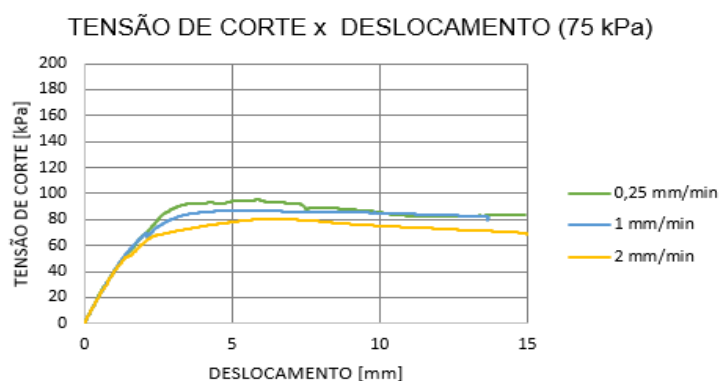


Figura 4.5: Curva "Tensão de Corte x Deslocamento" para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 75 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.

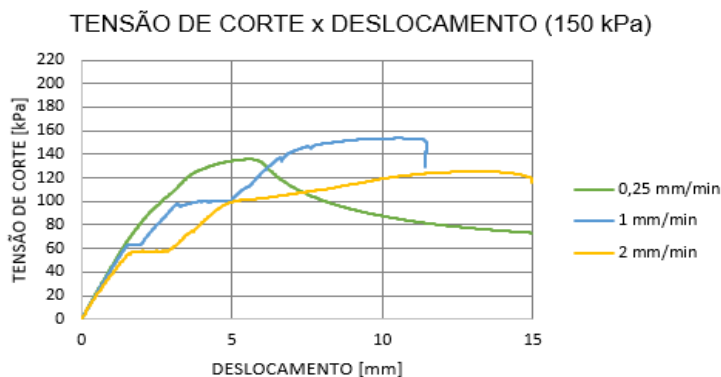


Figura 4.6: Curva "Tensão de Corte x Deslocamento" para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 150 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.

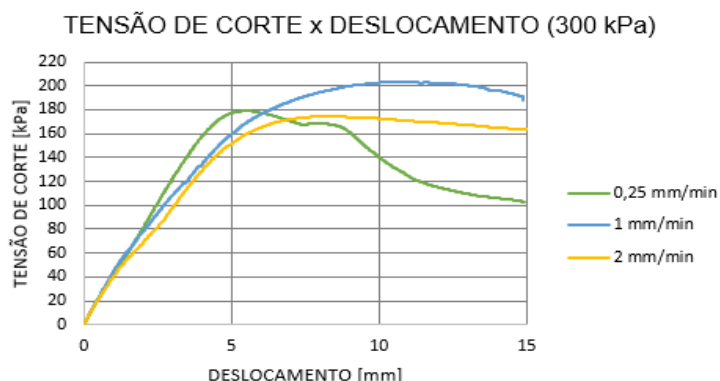


Figura 4.7: Curva "Tensão de Corte x Deslocamento" para 3 ensaios sob corte submetidos a uma carga vertical de 300 kPa e uma velocidade de deslocamento de 0.25, 1 e 2 mm/min.

Dessa forma, a Tabela 4.1 demonstra os valores das tensões de corte máximas para cada ensaio, possibilitando posteriormente a construção do gráfico que relaciona tensões tangenciais e normais, permitindo a obtenção de parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno do solo.

Tabela 4.1: Valores de tensões tangenciais máximas para cada ensaio realizado.

TENSÃO NORMAL	TAXA DE DESLOCAMENTO		
	0,25 mm/min	1 mm/min	2 mm/min
75 kPa	92,23	86,86	80,51
150 kPa	135,95	153,67	125,3
300 kPa	179,06	203,38	174,45

Os gráficos que demonstram as curvas de ruptura também permitem caracterizar a compactidade do solo, já que em solos de maior compactidade, a curva apresenta picos para a resistência ao corte e uma posterior queda até o ponto em que se mantém constante, enquanto solos menos compactos apresentam curvas de formato crescente e que não apresentam uma evidência de pico. Desse modo, dos resultados obtidos no ensaio de corte direto, é possível constatar que o solo estudado apresenta características de um solo com

compacidade baixa.

As curvas de resistência apresentam características de rotura plástica, sobretudo nos ensaios realizados sobre tensão normal de 75 kPa, já que após atingir a tensão tangencial máxima, o esforço tende a manter uniforme ao longo da deformação ou apresenta uma baixa variação, sendo que essa característica de rotura é muito comum nos solos arenosos pouco compactos.

Além disso, com os dados obtidos, pode-se constatar que em termos gerais, que a velocidade de carregamento não apresenta uma influência muito significativa na capacidade resistente do solo, dado que o parâmetro de resistência ao corte analisado não apresenta grandes magnitudes de diferença sobre uma mesma carga axial, sendo esta última um fator preponderante nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Estando essas análises de acordo com as constatações realizadas por outros autores [37] [38], os quais trabalharam com uma maior amostragem de resultados.

Por fim, pode-se analisar nos gráficos, que de acordo com o aumento da tensão normal, mais difícil será para as partículas dos solos de realocarem uma sobre as outras. Nas partículas, quanto maior for a aplicação de tensão normal, maior será a componente atrítica e menor será a componente de imbricamento na resistência do solo.

É importante ressaltar uma possível falha nos ensaios realizados sobre velocidade de 0.25 mm/min sobre as tensões de 150 e 300 kPa, já que contrariam os outros resultados. Da mesma forma, os ensaios realizados sobre tensões de 150 kPa e velocidades de deslocamento de 1 mm/min e 2 mm/min apresentam perdas de continuidade na formação da curva, podendo ser justificado pela existência de falhas de preenchimento no interior da amostra.

Os deslocamentos verticais se caracterizam como um fator importante para a análise de comportamento do solo durante a realização do ensaio, apontando as propriedades de dilatância da amostra, o que permite demonstrar as características de consolidação das amostras estudadas, através da sua deformação volumétrica quando solicitada ao corte. Além disso, a análise da relação gráfica entre os deslocamentos verticais e horizontais, permite caracterizar as deformações volumétricas do solo, o caracterizando quanto a sua

expansibilidade ou compressibilidade durante o ensaio, onde verifica-se a tendência de expansão em solos mais densos e a compressão nos solos com menor compactidade.

Na análise dos gráficos nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, podemos verificar que a variação da velocidade e o aumento das tensões normais influenciam na variação de volume da amostra. Pode-se verificar que para as amostras sobre tensões normais menores e com maiores velocidades de carregamento (menor o tempo para se realocarem), elas tendem a se compactar primeiramente, tornando-se mais densas, e posteriormente se expandir. Diferentemente das amostras sobre maiores cargas axiais, como na Figura 4.10, que sobre maiores tensões, tendem a apresentar uma maior compressibilidade.

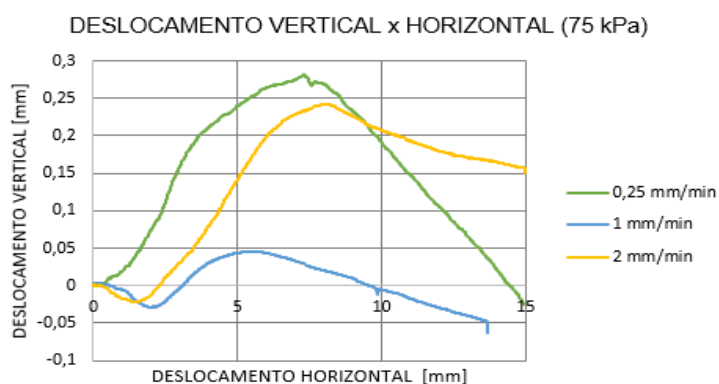


Figura 4.8: Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal" para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 75 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.

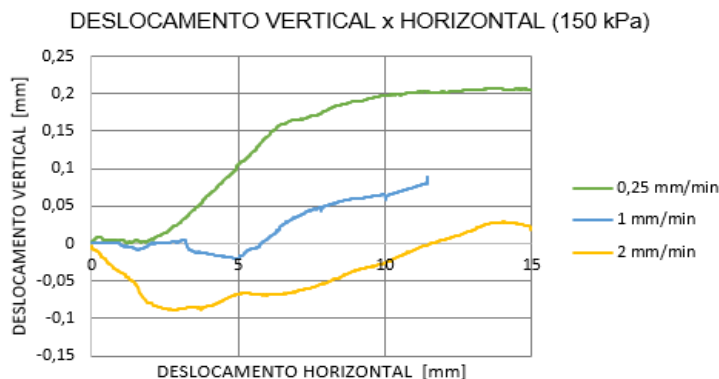


Figura 4.9: Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal" para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 150 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.

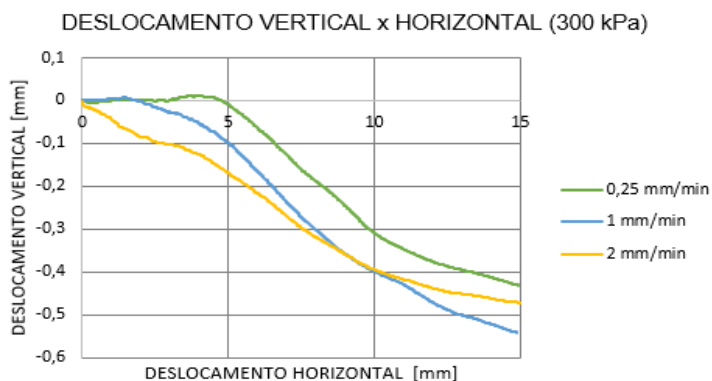


Figura 4.10: Curva "Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal" para 3 ensaios, submetidos a uma carga vertical de 300 kPa e 3 variações da velocidade de deslocamento.

Com as tensões tangenciais e normais definidas, as envolventes de rotura podem ser traçadas a partir da definição do critério de Mohr-Coulomb, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.11, permitindo a definição dos valores de coesão (c') e do ângulo de atrito interno do solo (ϕ'). Para isso, a metodologia de obtenção desses parâmetros é definida através da equação estipulada pela linha de tendência linear formada a partir do conjunto de pontos apontados na Tabela 4.1.

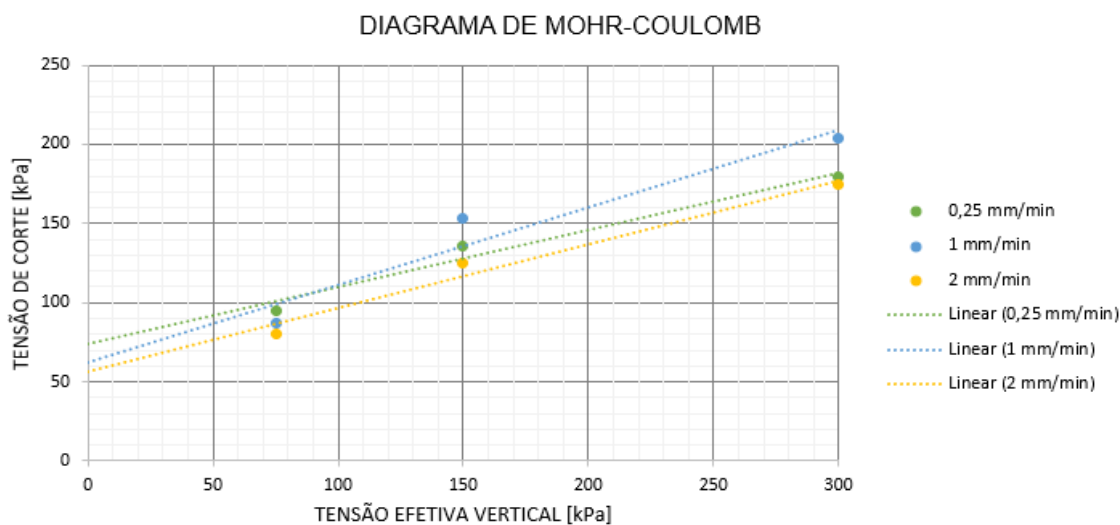


Figura 4.11: Diagrama de Mohr-Coulomb para 9 testes realizados sobre variações cargas verticais e velocidades de deslocamento.

Das equações “ y ” obtidas e apresentadas na Tabela 4.2, se estabelece que a capacidade resistente máxima do solo ao corte é dada pela parcela de coesão, cujo valor é atingido através da intersecção da reta com o eixo das ordenadas, somada a parcela que multiplica a tangente do ângulo de inclinação da reta, pela tensão normal aplicada (representada por “ x ” na equação). Além disso, é importante ressaltar que o coeficiente de determinação “ R^2 ” das linhas de tendência apresentam valores de: 0.9736(2 mm/min), 0.9264 (1 mm/min) e 0.9701 (0.25 mm/min), revelando-se satisfatório. Contudo, devido o erro de ensaio para a amostra sob velocidade de deslocamento igual a 0.25 mm/min, a reta não seguiu a tendência estipulada na teoria.

Tabela 4.2: Equações “ y ” das retas formadas pelo critério de Mohr-Coulomb.

TAXA DE DESLOCAMENTO	EQUAÇÃO DA RETA
0,25 mm/min	$Y=0,3604x + 73,675$
1 mm/min	$Y=0,4912x + 62,005$
2mm/min	$Y=4047x + 55,935$

Por fim, a Tabela 4.3 apresenta os resultados dos parâmetros que definem a capacidade resistente ao corte do solo quando submetido a diferentes taxas de deslocamento, destacando que os valores obtidos são em termos de tensões efetivas. Dessa forma, verifica-se que em termos gerais, quanto menor a velocidade de carregamento, mais próximos os resultados se aproximam do comportamento drenado.

Tabela 4.3: Parâmetros de coesão e ângulo de atrito para diferentes taxas de corte.

VELOCIDADE	c'	ϕ'
[mm/min]	[kPa]	[°]
0,25	73,675	19,82
1	62,005	26,16
2	55,935	22,04

Dessa análise e a partir dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito obtidos e apresentados na Tabela 4.3, verifica-se que para ensaios realizados com velocidades mais altas, como a de $2 \text{ mm}/\text{min}$, o solo tende a apresentar um comportamento mais próximo do comportamento não drenado, onde o ângulo de atrito do solo tende a diminuir.

4.4 Considerações Finais

A apresentação desse capítulo buscou demonstrar de forma detalhada e a baseada nas orientações normativas, os procedimentos de montagem e as etapas de execução do ensaio de corte direto automatizado, existente no Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança. Além disso, foram apresentados os resultados obtidos nos ensaios e sua posterior análise, de forma a avaliar os efeitos da velocidade de carregamento na capacidade resistente do solo e a aplicabilidade da configuração experimental implementada ao equipamento de corte direto.

Após a realização dos ensaios, foram expressos os resultados obtidos através de 9 ensaios utilizando amostras remexidas, sendo realizados 3 análises para cada velocidade de carregamento, variando em cada um, apenas a tensão normal aplicada. Porém, alguns imprevistos foram encontrados, afetando diretamente no resultado da resistência ao corte dos solos testados.

Contudo, dos estudos sobre a influência da velocidade de carregamento em um solo arenoso siltoso com baixa compactidade e sob mesma tensão axial, pode-se concluir que esta não apresenta uma influência significativa, apesar de o aumento da velocidade de corte tender a provocar, na amostra, um comportamento não drenado, que no solo em causa não se tornou muito evidente.

Por fim, pode-se verificar que a aplicabilidade do sistema de aquisição de dados neste tipo de teste, permite obter corretamente, em segundos, uma imensa faixa de valores, garantindo uma maior confiabilidade nos resultados e obtenção outras características fundamentais nos solos, tais como o seu comportamento quanto a dilatância durante o teste por meio de deslocamentos verticais.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusões Finais

A análise da capacidade resistente de um determinado solo é fundamental no desenvolvimento de projetos geotécnicos, no entanto, a elevada heterogeneidade de comportamento dos maciços terrosos implicam em estudos detalhados e de alta complexibilidade. Por consequência, a evolução tecnológica dos equipamentos laboratoriais tem se tornado cada vez recorrente, garantindo resultados com maior fiabilidade.

Dessa forma, a parametrização detalhada das propriedades físicas e mecânicas do solo permite quantificar sua capacidade resistente e os fatores que a influenciam, bem como prever de forma precisa o seu comportamento após a aplicação de carga. Como resultado, as estruturas geotécnicas são projetadas de forma mais segura e econômica, se tornando menos suscetíveis a erros que promovem possíveis colapsos por falhas geotécnicas.

Por conseguinte, essa dissertação buscou complementar a literatura de avaliação do comportamento e das propriedades mecânicas do solo através de ensaios laboratoriais, com ênfase no corte direto. Essa demonstração buscou abordar as principais características desse tipo de ensaio, por meio da análise de um solo fino existente na zona de Bragança-Portugal, tendo destaque na automatização da leitura de dados no equipamento de corte e nos principais procedimentos de ensaio. Além disso, buscou-se demonstrar as principais

peculiaridades de outros ensaios laboratoriais e sua importância como complemento aos outros ensaios, além das principais teorias clássicas em que se baseiam.

A realização dos ensaios demonstrou que apesar das limitações apresentadas no ensaio de corte direto, esse tipo de teste é essencial na avaliação das propriedades mecânicas do solo em condições drenadas e sua posterior parametrização, sobretudo pela sua fácil execução e viabilidade econômica.

Dos resultados obtidos na caracterização física do material, constatou-se que a amostra de solo era constituída em sua maioria por areia e silte, além de ser um solo com teor de humidade de 35,1%. Utilizando-se dessas propriedades e do peso específico, foram realizadas as reconstituições das amostras em laboratório, permitindo posteriormente a realização dos testes e avaliação dos parâmetros de resistência do solo, além da sua capacidade resistente para variadas taxas de deslocamento e tensões normais.

Além disso, dos dados obtidos no ensaio e sua posterior interpretação, concluiu-se que o solo analisado se caracterizada como uma areia-siltosa de baixa compactidade, apresentando características de uma rotura plástica, sobretudo nos ensaios com tensão normal de consolidação mais baixas. Ademais, do comparativo entre todos os resultados, verificou-se que a velocidade de carregamento não apresentou uma influência significativa na capacidade resistente dos solos testados, apesar de o aumento da velocidade de corte tender para a amostra trabalhar em condições não drenadas. No entanto, não foi evidente no tipo de solo e nas velocidades de ensaio usados neste trabalho.

Acrescenta-se ainda que a configuração experimental, baseada na abordagem LabVIEW e nos sensores LVDT, que foi implementada no equipamento de corte direto, apresentou grande vantagem na realização do ensaio, sobretudo pela repetibilidade na aquisição de dados durante o teste, podendo chegar a 60 dados por minuto. Dessa forma, a ampla base de dados obtida através da automatização, ajuda a evitar erros na análise mecânica do solo, fator muito recorrente em ensaios que variam com uma alta dinâmica e os resultados são obtidos por seres humanos com a ajuda de sensores analógicos.

Portanto, a partir da experiência adquirida neste trabalho e da automatização do equipamento de corte direto, diversos estudos podem ser efetuados futuramente, sendo

capaz de apresentar resultados com maior fiabilidade e que sirvam como complemento a este trabalho, através de comparativos entre ensaios de amostras reconstituídas e indeformadas de variadas dimensões e sob influência de variadas taxas de deslocamento, já que neste trabalho não foi possível essa ampla abordagem.

5.2 Propostas de Trabalhos Futuros

A caracterização precisa das propriedades mecânicas de um determinado solo é definida pela ampla abordagem das metodologias de ensaio e suas orientações normativas, bem como um amplo programa de trabalho. Contudo, o programa desenvolvido para esta dissertação permaneceu inacabado, devido a incapacidade de realizar todos os ensaios previstos, em razão da Pandemia do Corona Vírus que aconteceu durante o período de desenvolvimento do presente trabalho.

Dessa forma, recomenda-se que a partir da experiência e dos conhecimentos adquiridos nesta dissertação, os futuros trabalhos abordem todo plano de trabalho aqui definido, com a realização de todos os ensaios estipulados, para as amostras indeformadas e reconstituídas. Além disso, é interessante promover a comparação dos resultados obtidos entre amostras de diferentes dimensões e sua influência no comportamento do solo.

Por fim, é indicado efetuar alguns comparativos entre os resultados de parametrização mecânica de um solo, obtidos através do ensaio de corte direto, com os resultados de outros ensaios laboratoriais de diferentes metodologias, tais como o ensaio triaxial ou de corte direto simples, estando todos sob as mesmas condições de ensaio, ou até mesmo a partir de ensaios realizados *in-situ*.

Bibliografia

- [1] D.-e. ASTM, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. 2017.
- [2] K. H. Head, *Manual of Soil Laboratory Testing*, vol. 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Test. 2 ed., 1994.
- [3] S. LEROUEIL, “Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms.,” *Géotechnique* 51, n 3, pp. 107–243, 2001.
- [4] M. de Matos Fernandes, *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundamentais*, vol. 1. 3 ed., 2012.
- [5] C. S. Pinto, *Curso básico de mecânica dos solos*. 2000.
- [6] E. McKYES, P. NYAMUGAFATA, and K. NYAMAPFENE, “Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from zimbabwe,” *Soil Till. Res.*, 29, pp. 357–366, 1994.
- [7] M. LEBERT and T. A. HORN, “A method to predict the mechanical strength of agricultural soils.,” *Soil Till. Res.*, 19, pp. 275–286, 1991.
- [8] M. Marangon, *Capítulo 5 - Resistencia ao Cisalhamento dos Solos*. 2018.
- [9] A. M. V. Paula, “Ensaio “in situ” e amostragem.” Apontamentos de Mecânica dos Solos e Fundações II, 2019.

- [10] C. MULLINS, D. MACLEOD, K. NORTHCOTE, J. TISDALL, and I. YOUNG, “Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management.,” *Adv. Soil Sci.*, 11, pp. 37–108, 1990.
- [11] J. MITCHELL, “Fundamentals of soil behavior,” *New York, John Wiley*, p. 422, 1976.
- [12] D. FREDLUND and H. RAHARDJO, “Soil mechanics for unsaturated soils.,” p. 517, 1993.
- [13] D.-. ASTM, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 2011/20.
- [14] D. ASTM, *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*. 2020.
- [15] D. ASTM, *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. 2011/20.
- [16] D. ASTM, *Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. 2015.
- [17] R. A. Palmeira, “Estudo do comportamento mecânico de uma areia-siltosa na região de bragança: Ensaio triaxial,” Master’s thesis, Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IPB, Julho 2020.
- [18] W. Kjellman, “Testing the shear strenght of clay in sweden.,” *Geotechnique* 2, no. 3, pp. 225–232, 1951.
- [19] K. Roscoe, “An apparatus for the application of simple shear to soil samples,” in *Proceedings of the International Conference on Soil Mecanics and Foundation Engineering*, vol. 1, (Zur.), pp. 186–191, 1953.
- [20] L. Bjerrum and A. Landva, “Direct simple-shear tests on a norwegian quick clay,” *Géotechnique*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 1966.

- [21] D. ASTM, *Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils*. 2017.
- [22] B. C. F. A. de Freitas, “Caracterização mecânica de um solo fino,” Master’s thesis, Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IPB, dezembro 2018.
- [23] D. ASTM, *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. 2011/20.
- [24] L. F. Cooling and D. B. Smith, “The shearing resistance of soils,” *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. and Found.*, 1935.
- [25] M. Paula, J. Gonçalves, J. Batista, and M. Braz-César, “One dimensional consolidation and direct shear tests: Experimental setup based on a labview approach,” *7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, Greece, 24-26 June;*, vol. II(IDBN), pp. 3482–3494, 2019.
- [26] J. Folque, *Introdução à Mecânica dos Solos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2 ed., 1996.
- [27] A. W. Bishop and D. J. Henkel, “The measurement of soil properties in the triaxial test.,” *2.end., Londres, UK: Edward Arnold Ltd.*, p. 227, 1962.
- [28] R. GIBSON and D. J. HENKEL, “Influence of duration of tests at constant rate of strain on measure drained strenght.,” – *Geotechnique – V. IV*, 1954.
- [29] NP-143:1969, *Determinação dos limites de consistência*. 1969.
- [30] H. P. Caputo, A. N. Caputo, and J. M. de Azevedo Rodrigues, *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*, vol. 2: Mecânica das Rochas, Fundações e Obras de Terra. 7 ed., 2017.
- [31] NP-84:1965, *Determinação do teor em água*. 1965.

- [32] L.-E. 197:1966, *DEnsaio de Compactação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966.
- [33] L.-E. 239:1970, *Análise granulométrica por peneiração húmida*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970.
- [34] L.-E. 196:1966, *Ensaio de Granulometria e Sedimentação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966.
- [35] A. D4220/D4220M-14, *Práticas padrão para a preservação e transporte de amostras de solo*. 2017.
- [36] *Direct/Residual Shear Test Apparatus - MATEST*.
- [37] H. N. Pitanga, D. C. de Lima, C. H. de Carvalho Silva, C. A. B. de Carvalho, and P. S. de Almeida Barbosa, “Influence of rate of loading on the shear strength of tropical residual soils,” *GEOTÉCNIA*, *n 106*, vol. II(IDBN), pp. 97–106, Março 2006.
- [38] H. N. Pitanga, “Influência da velocidade de carregamento e do tempo de inundação na resistência ao cisalhamento de solos estruturados,” Master’s thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa., Maio 2002.