

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Roger Brunhera

MÁQUINA DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Passo Fundo

2017

Roger Brunhera

MÁQUINA DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Adriano Luís Toazza.

Passo Fundo

2017

Roger Brunhera

Máquina de Ensaio de Cisalhamento Direto

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Adriano Luís Toazza.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Luís Toazza - UPF

Prof. Dr. Mikhail Polonkii - UPF

Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza - UPF

Este trabalho é dedicado aos meus pais, a minha namorada e a toda minha família, amigos, colegas e professores que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu pudesse completar mais esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A todos os professores, principalmente ao meu orientador o professor Dr. Adriano Luís Toazza, por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre nunca fará justiça aos Senhores aos quais terão os meus eternos agradecimentos.

Aos meus pais e a minha namorada, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Meus agradecimentos aos meus colegas, irmãos na amizade, que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

Dalai Lama

RESUMO

Deslizamento de terras ocorre quando a tensão cisalhante naquele ponto se tornar igual à resistência ao cisalhamento do solo devido a forças que estão atuando sobre o mesmo. O ensaio de cisalhamento de solos é utilizado para medir os parâmetros da resistência de cisalhamento, onde o mesmo passa por situações de esforços de ruptura que irá sofrer em condições reais. Neste projeto foi desenvolvida a construção de uma máquina de ensaio de cisalhamento direto, onde, através do ensaio de uma amostra de solo são obtidos os parâmetros da resistência de cisalhamento, isto é, coesão e ângulo de atrito. Para determinar esses parâmetros, o corpo de prova é colocado dentro de uma caixa bipartida horizontalmente e alocado na máquina, depois disso o usuário deve configurar alguns valores como a velocidade do ensaio, o fim de curso do deslocamento horizontal e a direção. Um motor de passos proporciona a força para que a parte inferior da caixa se mova, fazendo com que ocorra a ruptura do mesmo. Uma célula de carga mede a força que o corpo de prova está recebendo durante o ensaio, enviando constantemente os resultados para um microcontrolador, onde o usuário monitora esses dados através de um display. Também são monitorados os valores do deslocamento, através de transdutores, para ver quando o corpo de prova rompeu. Os dados são enviados para um computador onde são gerados alguns gráficos.

Palavras-Chave: Cisalhamento de solos, Microcontrolador, Sensores, Ensaio de cisalhamento direto.

ABSTRACT

Landslide occurs when the shear stress at that point becomes equal to the shear strength of the ground due to forces acting on it. The soil shear test is used to measure the parameters of the shear strength, where it undergoes burst stresses that will undergo real conditions. In this project the construction of a direct shear test machine was developed, where the shear strength parameters, ie, cohesion and friction angle were obtained by testing a soil sample. In order to determine these parameters, the test body is placed inside a horizontally split box and allocated in the machine, after which the user must configure some values such as the test speed, the limit of the horizontal displacement and the direction. A stepper motor provides the force for the bottom of the carton to move, causing the carton to rupture. A load cell measures the force that the test body is receiving during the test, constantly sending the results to a microcontroller where the user monitors these data through a display. The values of the displacement, through transducers, are also monitored to see when the specimen has ruptured. The data is sent to a computer where some graphics are generated.

Keywords: Soil shearing, Microcontroller, Sensors, Direct shear test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb	17
Figura 2: Diagrama do equipamento de ensaio triaxial	18
Figura 3: Equipamento de cisalhamento direto com deformação controlada	19
Figura 4: Relógios comparadores e o anel dinamométrico instalados	20
Figura 5: Diagrama do arranjo para ensaio de cisalhamento direto	20
Figura 6: Caixa de Cisalhamento	21
Figura 7: Esquema do equipamento de ensaio de cisalhamento direto	22
Figura 8: Gráfico da tensão de cisalhamento e da variação da altura do corpo de prova em função do deslocamento cisalhante para areia seca fofa e compacta	23
Figura 9: Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para areia seca, usando os resultados dos ensaios de cisalhamento direto	25
Figura 10: Motor de passo híbrido	26
Figura 11: Ponte de Wheatstone.	27
Figura 12: Diagrama de blocos do hardware	28
Figura 13: Desenho da interface entre usuário e máquina.	29
Figura 14: Ligação bipolar série para o motor de passo Nema 23, modelo HT23-400	30
Figura 15: Driver de motor de passo ST10-PLUS da Applied Motion	31
Figura 16: Célula de Carga CSL ZL da MK Controle de Instrumentação LTDA.	32
Figura 17: Amplificador de célula de carga PO-10 da Technolog.	33
Figura 18: Sensor de deslocamento PY2 da Gefran.	33
Figura 19: Pressostato Eletrônico 50D Pneumático da Norgren	35
Figura 20: Conversor UART/USB PL2303	35
Figura 21: Diagrama de blocos da estrutura mecânica.	36
Figura 22: Conexão do motor de passo no redutor de velocidade.	37
Figura 23: Redutor de velocidade PEE70T-100-HT23 da SESAME MOTOR.	37
Figura 24: Acoplamento dos mancais no fuso de esferas.	38
Figura 25: Castanha e fuso de esferas.	39
Figura 26: Carrinho e trilhos.	39
Figura 27: Cilindro Pneumático RA/8100/M/50 da Norgren.	40
Figura 28: Fluxograma do firmware	41
Figura 29: Gráfico da palavra convertida em função da carga adicionada sobre a célula de carga.	45

Figura 30: Palavra convertida em função do deslocamento vertical.	47
Figura 31: Configuração da porta COM.	48
Figura 32: Manipulação dos dados recebidos.	49
Figura 33: Diagrama final do software.	50
Figura 34: Interface gráfica do software	52
Figura 35: Protótipo provisório da máquina.	53
Figura 36: Dados básicos do ensaio para força normal de 0,25 kN.	54
Figura 37: Adensamento do ensaio para força normal de 0,25 kN.	54
Figura 38: Gráfico da tensão horizontal em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,25 kN.	55
Figura 39: Gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,25 kN.	56
Figura 40: Dados básicos do ensaio para força normal de 0,32 kN.	56
Figura 41: Adensamento do ensaio para força normal de 0,32 kN.	57
Figura 42: Gráfico da tensão horizontal em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,32 kN.	57
Figura 43: Gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,32 kN.	58
Figura 44: Gráfico para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para a areia ensaiada.	59
Figura 45: Resultado de ensaio de cisalhamento direto em amostras de areia sã fofa seca.	60
Figura 46: Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico e a grandes deformações para areia sã seca.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Palavra convertida em relação à massa adicionada sobre a célula de carga.	44
Tabela 2 – Palavra convertida em relação à medida do transdutor de deslocamento.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	15
2.1.1 Ruptura por Cisalhamento	15
2.1.2 Ensaio Triaxial	17
2.1.3 Ensaio de Cisalhamento Direto	19
2.2 FUNCIONAMENTO DE ALGUNS COMPONENTES ELETRÔNICOS	25
2.2.1 Motor de Passo	25
2.2.2 Célula de Carga	27
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	28
3.1 HARDWARE	28
3.1.1 Motor de Passo	30
3.1.2 Célula de Carga	31
3.1.3 Sensor de Deslocamento Vertical	33
3.1.4 Microcontrolador	34
3.1.5 Pressostato Pneumático	34
3.1.6 Conversor UART/USB	35
3.2 ESTRUTURA MECÂNICA	36
3.3 FIRMWARE	41
3.3.1 Calibração dos sensores	44
3.4 SOFTWARE	48
4 RESULTADOS	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente demanda de obras de infraestrutura de grande porte e a expansão das fronteiras urbanas, cada vez mais necessitam-se de conhecimentos referentes às condições e propriedades dos solos. Toda obra de Engenharia Civil independente de tamanho e forma, apoia-se no solo e nele aplica tensões, proveniente de seu próprio peso, sobrecargas e de ações ambientais.

O conhecimento das propriedades físicas e do comportamento dos solos é um fator essencial para a elaboração de projetos civis eficientes e a resolução de problemas na prática de engenharia. Desta forma, torna-se importante não somente determinar, analisar e compreender o comportamento dos solos, mas também conhecer e interpretar alguns dos processos que os levam a apresentar determinadas características.

Para saber se um solo possui resistência para que seja possível realizar alguma construção sobre, ou próximo a um determinado lugar, amostras do mesmo devem ser coletadas e passadas pelo ensaio de cisalhamento direto. O ensaio de cisalhamento direto é a mais antiga e mais simples forma de arranjo para o ensaio de cisalhamento.

Esse ensaio relaciona diretamente duas tensões, a tensão normal e a tensão cisalhante que são aplicadas a um corpo de prova confinado em uma caixa dividida em duas partes. O princípio é bastante simples e consiste em mover uma porção de solo sobre a outra, aumentando a força horizontal e mantendo constante a carga aplicada ao plano de movimento. A força normal é perpendicular ao plano de movimento e, conseqüentemente aplicada no sentido vertical.

As tensões cisalhantes são as responsáveis pelas rupturas em encostas, vales, depressões, barragens e outros lugares.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o sistema eletrônico de uma máquina de ensaio de cisalhamento direto, para que os alunos do Curso de Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo possam realizar ensaios, para que através da interpretação de uma envoltória linear, obtenham os valores de ângulo de atrito interno do solo e a coesão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Através de um microcontrolador aplicar pulsos para a entrada de um driver de motor de passo que irá fazer com que o motor gire, movendo horizontalmente a parte inferior da caixa com o corpo de prova, até onde a pessoa que está fazendo o ensaio definir através da escolha do fim de curso, sendo que a parte superior ficará imóvel, para chegar à ruptura da amostra do solo.
- Montar uma interface aonde o usuário irá se comunicar com o microcontrolador através de botões, assim o mesmo definirá a velocidade, o fim de curso do deslocamento horizontal e a direção do ensaio, e por meio de um display, receberá as informações dos parâmetros obtidos através de sensores, como a força horizontal e o deslocamento horizontal e vertical.
- Desenvolver uma comunicação serial para que os dados adquiridos no ensaio sejam passados para um computador.
- No computador, desenvolver uma saída gráfica com os valores obtidos experimentalmente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para que a execução de um projeto de construção civil não tenha problemas, é necessário que seja feita uma análise prévia do solo. Realizar um ensaio por cisalhamento direto é necessário, pois, consiste em submeter, uma amostra de solo a situações que simulam os esforços de ruptura que eles vão sofrer nas condições reais, chegando a limites extremos, assim definindo os parâmetros da resistência do solo, como coesão e ângulo de atrito, para conhecer as condições e as propriedades do solo ensaiado. Portanto, para ter certeza de que em determinado lugar poderá ser realizada alguma construção, deve ser realizado esse ensaio.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão explicados conceitos sobre cisalhamento, alguns tipos de ensaios utilizados para definir os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, e como é feito o ensaio de cisalhamento direto com uma máquina já existente no mercado. Também serão mostrados os funcionamentos de alguns componentes eletrônicos que serão utilizados na realização do projeto.

2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

A ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento que acontece, por exemplo, quando uma sapata de fundação é carregada até a ruptura ou quando ocorre o escorregamento de um terreno inclinado. Rupturas por tensões de tração só acontecem em condições especiais. A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. (PINTO, 2006).

2.1.1 Ruptura por Cisalhamento

Ocorrerá a ruptura em determinado ponto de uma massa de solo, quando a tensão cisalhante naquele ponto se tornar igual à resistência ao cisalhamento do solo. Coulomb expressa a resistência ao cisalhamento ou tensão de cisalhamento de ruptura (τ_f) de um solo em um ponto de um determinado plano como uma função linear da tensão normal na ruptura (σ) no mesmo ponto do plano. (CRAIG, 2007).

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

Onde:

τ_f : Resistência ao cisalhamento ou tensão de cisalhamento de ruptura

c: Coesão

σ : Tensão normal de ruptura

ϕ : Ângulo de atrito interno

A Equação (1) é chamada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Se for um solo saturado, a tensão normal total em um ponto será a soma da tensão efetiva (σ') e da poropressão (u), ou:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2)$$

Então, a Equação (1) expressa em termos de tensão efetiva, será a seguinte:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (3)$$

Onde, com base na tensão efetiva:

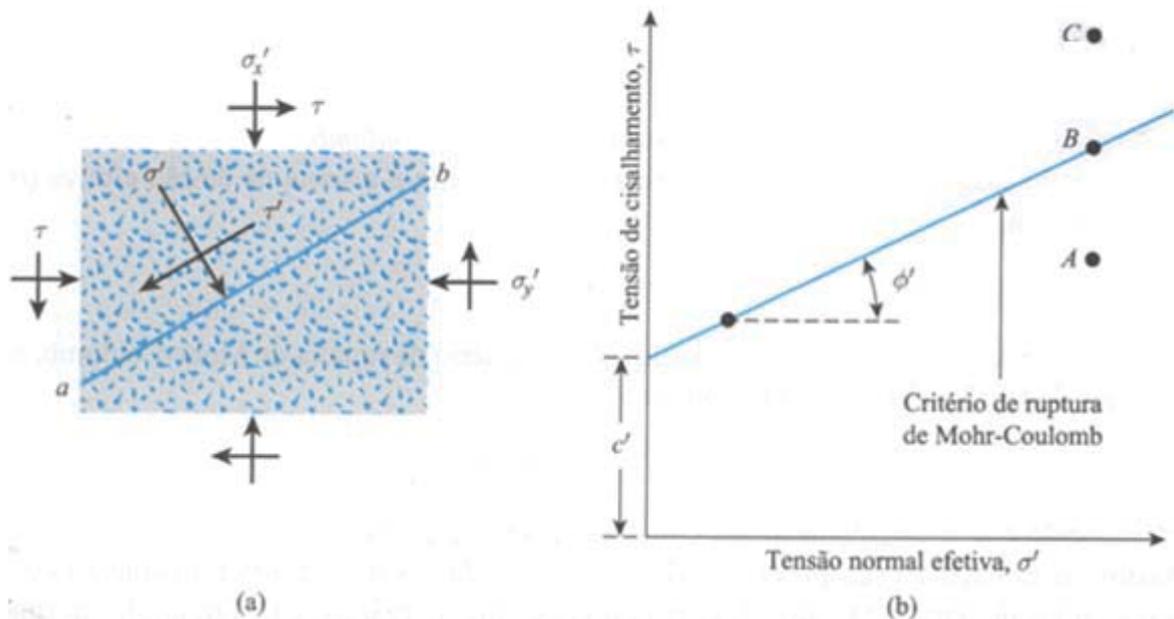
c' : Coesão efetiva

ϕ' : Ângulo de atrito

Quando a tensão normal efetiva for nula, então a resistência ao cisalhamento deverá também ser nula, e o valor de c' será zero. (CRAIG, 2007).

Portanto, as Equações (1) e (3) são expressões da resistência ao cisalhamento com base nesses dois tipos de tensões. O valor de c' para areia e silte inorgânico é 0. Em argilas normalmente adensadas, c' pode ser aproximadamente 0. Argilas sobreadensadas têm valores de c' maiores que 0. O ângulo de atrito ϕ' também pode ser chamado de ângulo de atrito drenado. (DAS, 2011).

A Equação (3) pode ser explicada através da Figura 1. Sejam a tensão normal efetiva e a tensão de cisalhamento σ' e τ , respectivamente, no plano ab . A Figura 1b mostra o gráfico da envoltória de ruptura definida pela Equação (3). Se as magnitudes de σ' e τ no plano ab são representadas graficamente como o ponto A na Figura 1b, a ruptura por cisalhamento não ocorrerá. Se a tensão normal efetiva e a tensão de cisalhamento no plano ab são representadas como o ponto B (que se enquadra na envoltória de ruptura), a ruptura ocorrerá ao longo do plano. Um estado de tensão em um plano representado pelo ponto C não pode existir, pois ele é representado graficamente acima da envoltória de ruptura e a ruptura por cisalhamento já teria ocorrido. (DAS, 2011).



Fonte: Das (2011, p.332)

2.1.2 Ensaio de Laboratório para a Determinação dos Parâmetros da Resistência ao Cisalhamento

É possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, como c , ϕ , c' e ϕ' , em vários corpos de prova de solo, através de diferentes tipos de ensaios de laboratório. São eles: (DAS, 2011).

- Ensaio de Cisalhamento Direto;
- Ensaio Triaxial;
- Ensaio de Cisalhamento Simples;
- Ensaio Triaxial de Deformação Plana;
- Ensaio de Cisalhamento Anular ou Ring Shear.

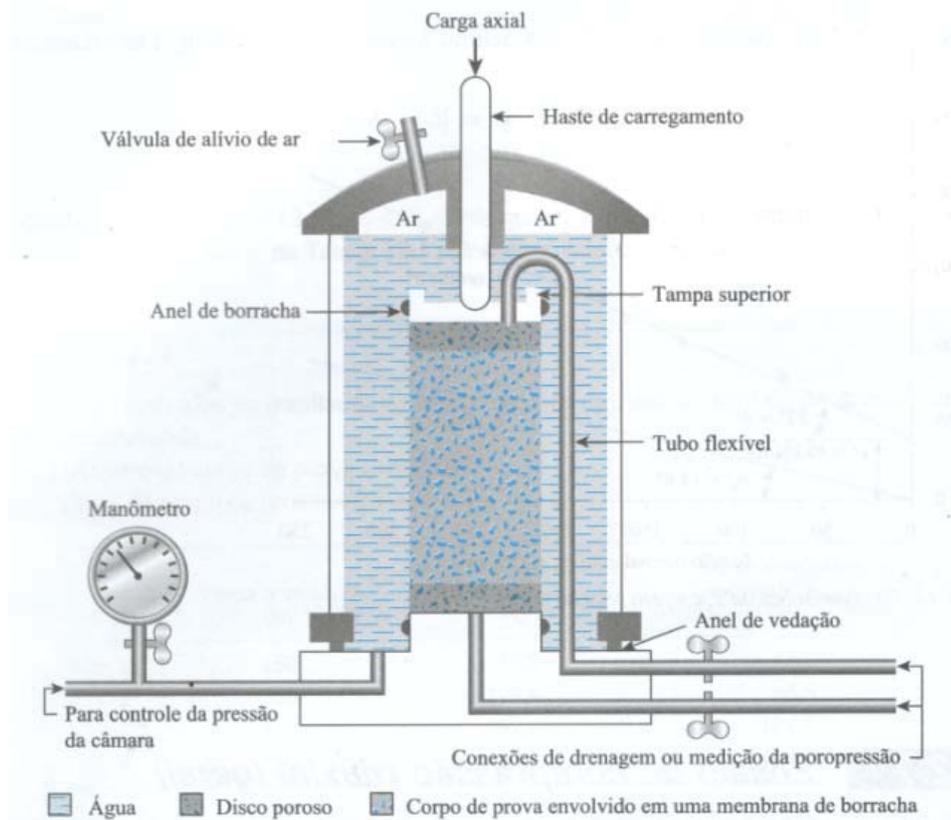
Os ensaios mais utilizados para a determinação desses parâmetros são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial, que são descritos a seguir.

2.1.2 Ensaio Triaxial

O ensaio de compressão triaxial é um dos métodos mais confiáveis disponíveis para determinar os parâmetros da resistência ao cisalhamento. O ensaio tem as vantagens de que as condições de drenagem podem ser controladas, o que não acontece nos ensaios de cisalhamento direto, caso necessário, como parte do procedimento do ensaio, e podem ser realizadas

medições de poropressão. A Figura 2 mostra um diagrama do equipamento que realiza esse ensaio. (DAS, 2011).

Figura 2: Diagrama do equipamento de ensaio triaxial.



Fonte: Das (2011, p.346)

Nesse ensaio, geralmente é utilizado um corpo de prova de solo de cerca de 36 mm de diâmetro e 76 mm de comprimento. O corpo de prova é envolvido por uma fina membrana de borracha e colocado dentro de uma câmara cilíndrica, normalmente preenchida com água ou glicerina. O corpo de prova é submetido a uma pressão de confinamento por compressão do fluido na câmara. O ar é utilizado algumas vezes como meio de compressão. Para provocar a ruptura por cisalhamento no corpo de prova, deve-se aplicar uma tensão axial por meio de uma haste de carregamento vertical. Esta tensão pode ser aplicada de duas formas: (DAS, 2011).

1. Aplicação de pesos ou pressão hidráulica em incrementos iguais até que o corpo de prova rompa. A deformação axial do corpo de prova é medida por meio de um extensômetro. (DAS, 2011).

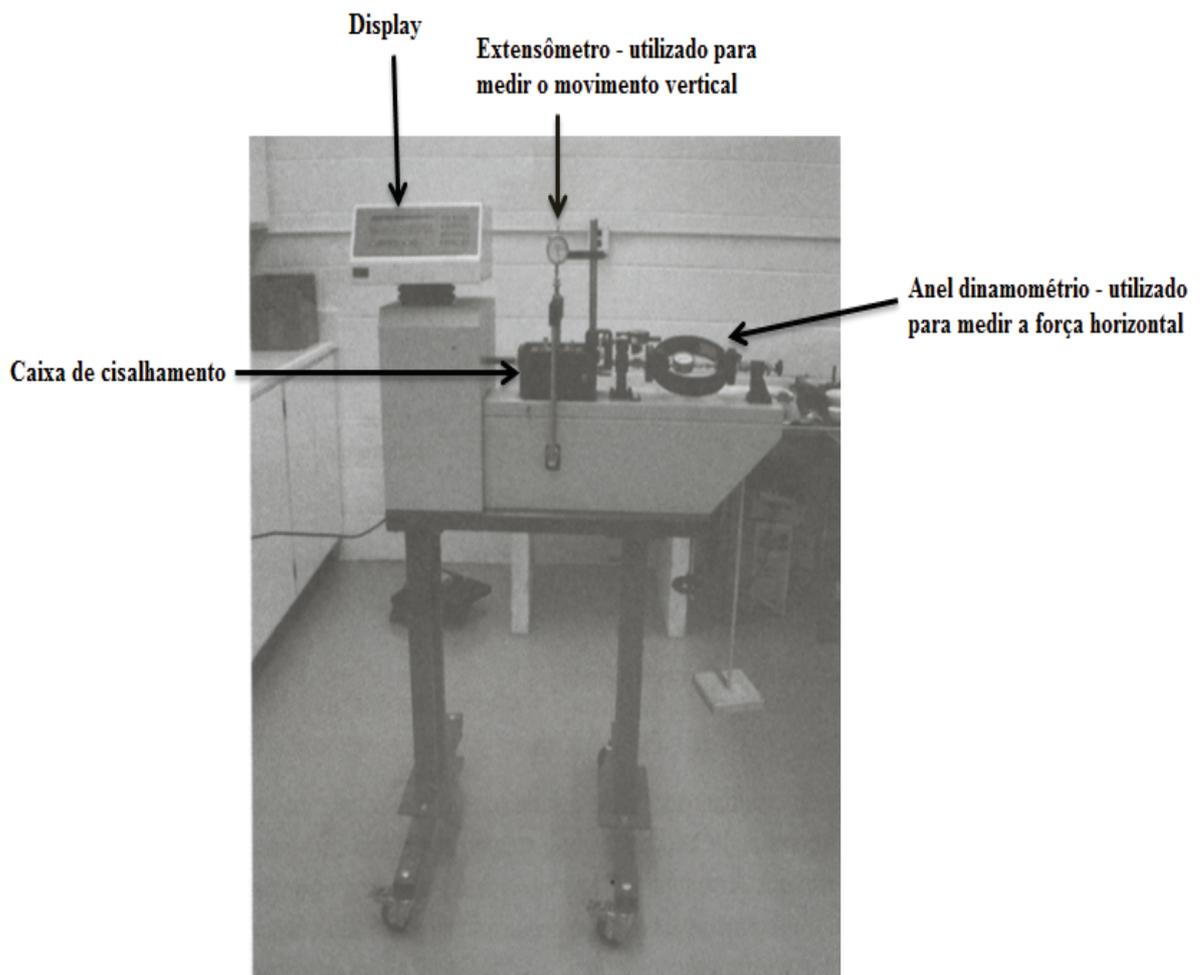
2. Aplicação da deformação axial, a uma taxa constante, por meio de uma prensa de carregamento mecânica ou hidráulica. Esse também é um ensaio de deformação controlada. (DAS, 2011).

A carga axial aplicada pela haste de carregamento é medida por um anel dinamométrico ou célula de carga fixada à haste. (DAS, 2011).

2.1.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

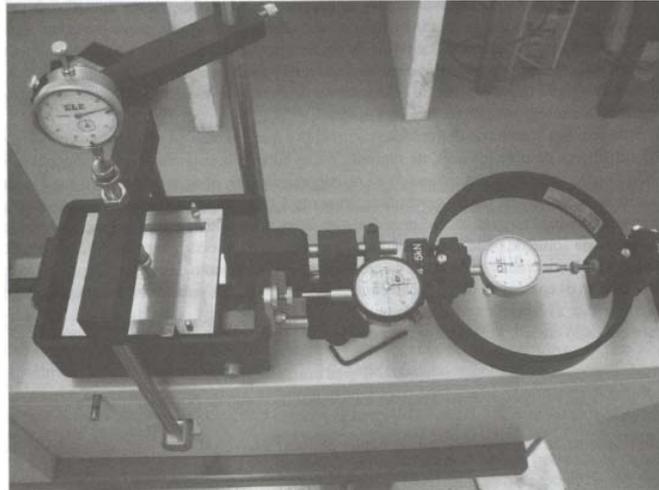
O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo e também o mais simples para determinar os parâmetros de ensaio da resistência de cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Coulomb. Um diagrama do aparelho utilizado para esse ensaio é mostrado na Figura 3 e na Figura 4. (DAS, 2011).

Figura 3: Equipamento de cisalhamento direto com deformação controlada.



Fonte: Das (2011, p.336)

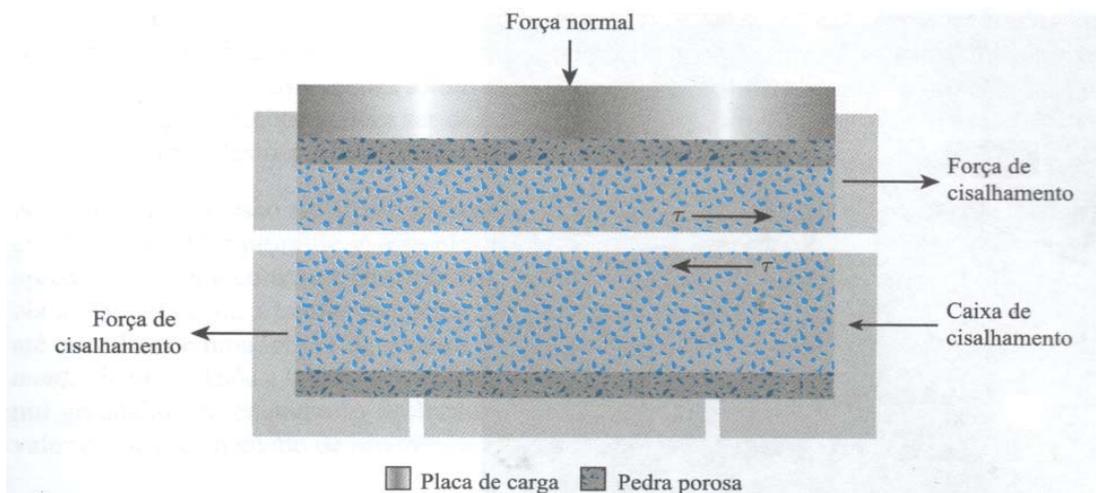
Figura 4: Relógios comparadores e o anel dinamométrico instalados.



Fonte: Das (2011, p.336)

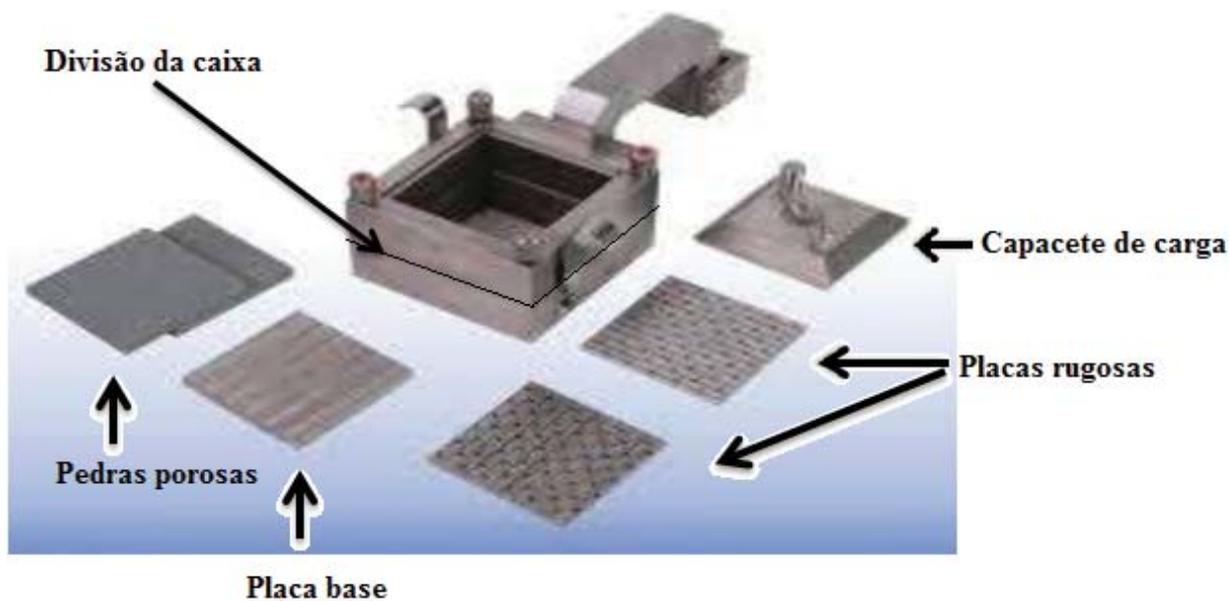
Um diagrama do arranjo da amostra de solo na caixa bipartida para o ensaio de cisalhamento direto é mostrado na Figura 5, juntamente com as forças que são aplicadas no mesmo. Esses corpos devem ter formatos quadrados ou circulares. O tamanho dos corpos de prova geralmente utilizados é de cerca de 51 mm x 51 mm ou 102 mm x 102 mm de extensão e cerca de 25 mm de altura. A caixa é dividida em duas metades horizontalmente conforme mostra a Figura 6. A força normal no corpo de prova é aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento. A tensão normal nesses corpos pode ser de até 1050 kN/m². A força de cisalhamento é aplicada ao mover uma metade da caixa sobre a outra para provocar a ruptura no corpo de prova do solo. (DAS, 2011).

Figura 5: Diagrama do arranjo para ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Das (2011, p. 335)

Figura 6: Caixa de Cisalhamento

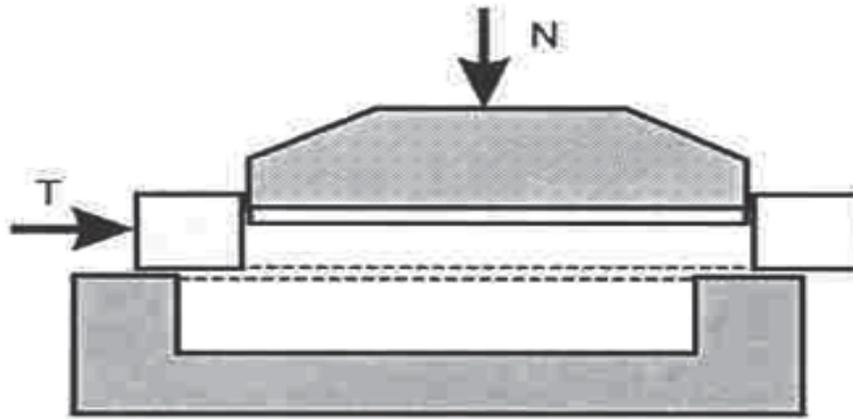


Fonte: (<http://pt.slideshare.net/ezequielborges7/ensaio-de-cisalhamento-direto>, 06/05/2016)

Dependendo do equipamento, o ensaio de cisalhamento pode ser de tensão controlada ou de deformação controlada. Nos ensaios de tensão controlada, a força de cisalhamento é aplicada em incrementos iguais até que o corpo de prova sofra ruptura. A ruptura ocorre ao longo do plano de divisão da caixa de cisalhamento. Após a aplicação de cada incremento de carga, o deslocamento de cisalhamento da metade superior da caixa é medido por um extensômetro horizontal. A variação na altura do corpo de prova durante o ensaio pode ser obtida através das leituras do extensômetro que mede o movimento vertical da placa de carregamento superior. (DAS, 2011).

Nos ensaios de deformação controlada, como mostra a Figura 7, é aplicada inicialmente uma força vertical (N), e após é aplicada a uma metade da caixa, uma taxa constante de deslocamento cisalhante (T), por um motor que atua por engrenagens. Através de um extensômetro horizontal é possível saber essa taxa de deslocamento cisalhante. A força resistente de cisalhamento do solo corresponde a qualquer deslocamento cisalhante e pode ser medida por um anel dinamométrico horizontal ou por uma célula de carga. A variação do volume do corpo de prova durante o ensaio é obtida através de um extensômetro que mede o movimento vertical da placa de carregamento superior. (DAS, 2011).

Figura 7: Esquema do equipamento de ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Pinto (2006, p. 265)

A vantagem dos ensaios de deformação controlada é que, a resistência ao cisalhamento na ruptura, assim como a resistência ao cisalhamento após a ruptura, podem ser observadas e colocadas em um gráfico. Nos ensaios de tensão controlada, somente a resistência na ruptura pode ser observada e traçada no gráfico. O ensaio de deformação controlada, comparado com o ensaio de tensão controlada, retrata melhor as situações de campo, devido ainda, que a resistência ao cisalhamento no ensaio por meio de tensão controlada somente pode ser aproximada, pois a ruptura ocorre em algum nível de tensão em algum ponto entre o incremento de carga de pré-ruptura e o incremento de carga de ruptura. (DAS, 2011).

Para um dado ensaio, a tensão normal (σ) pode ser calculada como:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4)$$

Onde:

N: Força normal

A: Área de seção transversal ao corpo de prova

A tensão de cisalhamento (τ) para qualquer deslocamento cisalhante pode ser calculada como:

$$\tau = \text{Tensão de cisalhamento} = \frac{T}{A} \quad (5)$$

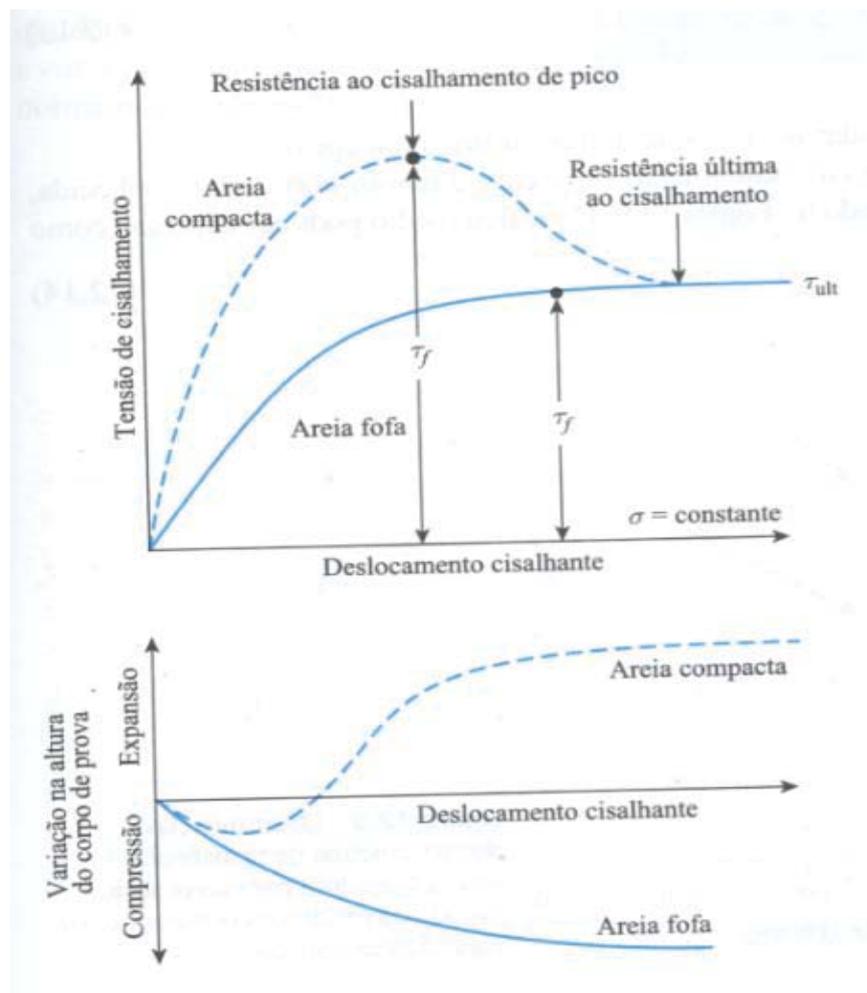
Onde:

T: Força de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento direto não permite a determinação de parâmetros de deformabilidade do solo, nem do módulo de cisalhamento, pois não é conhecida a distorção. Para isto seria necessária a realização de ensaios de cisalhamento simples, que são de difícil execução. (PINTO, 2006).

Como um exemplo de ensaio de cisalhamento direto, a Figura 8 mostra um gráfico com valores obtidos por meio de um ensaio de deformação controlada, sendo as variáveis, a tensão de cisalhamento e a variação da altura no corpo de prova, em função do deslocamento cisalhante tanto para areias secas e fofas quanto para areias compactas. Algumas generalizações podem ser observadas em relação à variação da tensão resistente de cisalhamento com o deslocamento cisalhante: (DAS, 2011).

Figura 8: Gráfico da tensão de cisalhamento e da variação da altura do corpo de prova em função do deslocamento cisalhante para areia seca fofa e compacta.



Fonte: Das (2011, p.337)

1. Na areia fofa, a tensão resistente aumenta com o deslocamento cisalhante até que uma tensão de cisalhamento de ruptura τ_f seja alcançada. Depois, a tensão de cisalhamento permanece aproximadamente constante para qualquer aumento adicional no deslocamento cisalhante. (DAS, 2011).
2. Na areia compacta, a tensão resistente de cisalhamento aumenta com o deslocamento cisalhante até que alcance uma tensão de cisalhamento de ruptura τ_f , sendo esse o ponto máximo conhecido como resistência ao cisalhamento de pico. Após a tensão de ruptura ser alcançada, a tensão resistente de cisalhamento diminui gradualmente enquanto o deslocamento cisalhante aumenta, até que finalmente alcance um valor constante, chamado de resistência última ao cisalhamento. (DAS, 2011).

É importante notar que, em areia seca, a tensão normal na ruptura é igual a tensão normal efetiva e a coesão é zero. (DAS, 2011).

Os ensaios de cisalhamento direto devem ser repetidos em corpos de prova similares em várias tensões normais. Essas tensões e os valores correspondentes da tensão de cisalhamento de ruptura obtidos a partir de um número de ensaios são traçados em um gráfico a partir do qual os parâmetros da resistência ao cisalhamento são determinados. (DAS, 2011).

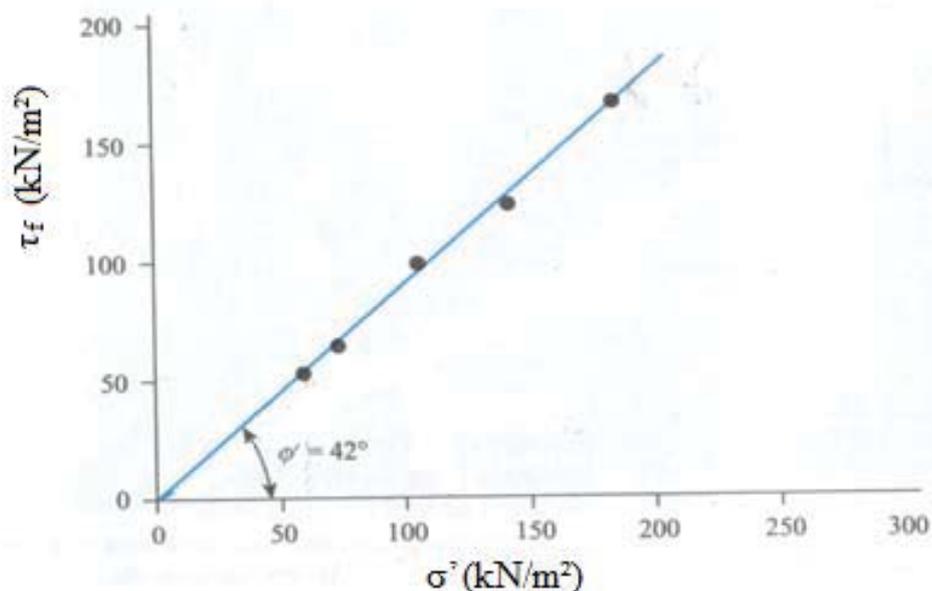
A Figura 9 mostra um gráfico dos ensaios em areia seca. A equação para a linha média obtida dos resultados experimentais é:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (6)$$

O ângulo de atrito pode ser determinado conforme a Equação (7):

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{\tau_f}{\sigma'} \quad (7)$$

Figura 9: Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para areia seca, usando os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Das (2011, p.338)

Esse tipo de ensaio é simples de se realizar, mas apresenta algumas deficiências inerentes ao processo. A confiabilidade dos resultados pode ser questionada, pois o ensaio não permite que o solo se rompa ao longo do plano mais fraco e sim ao longo do plano de separação da caixa de cisalhamento. Além disso, a distribuição da resistência ao cisalhamento sobre a superfície de cisalhamento do corpo de prova não é uniforme. Apesar disso, o ensaio é o mais simples e econômico para um solo arenoso seco ou saturado. (DAS, 2011).

2.2 FUNCIONAMENTO DE ALGUNS COMPONENTES ELETRÔNICOS

Foram realizados estudos de alguns componentes eletrônicos para entender seu funcionamento e utilizar na realização do projeto, os quais estão descritos nos itens abaixo:

- Motor de Passo;
- Célula de carga;

2.2.1 Motor de Passo

Para a realização deste projeto é necessário um deslocamento angular ou linear que tenha precisão no seu posicionamento. A melhor alternativa encontrada é usar um motor de passo, um componente eletromecânico, que converte pulsos em deslocamentos angulares precisos. A cada pulso o eixo roda um pouco e se mais nenhum pulso for enviado o mesmo irá permanecer

estável naquela posição. Aplicando uma série de pulsos, pode obter o deslocamento angular desejado. Se a série de pulsos não terminar, o eixo vai rodando constantemente com uma velocidade proporcional a frequência dos pulsos.

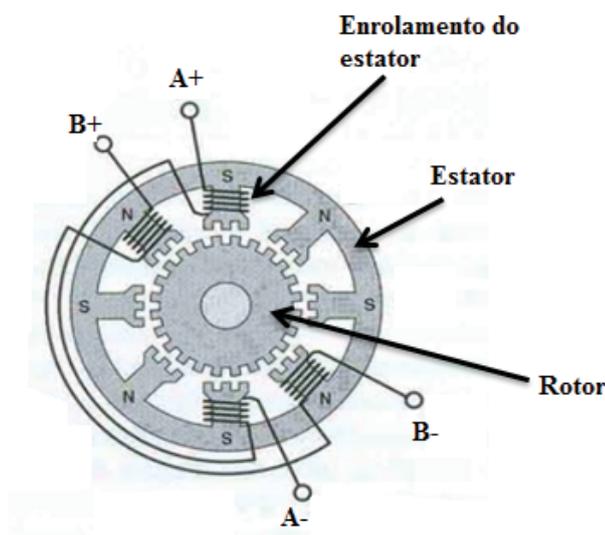
O motor de passo possui um estator com ranhuras, equipado com duas ou mais bobinas individuais, e uma estrutura de rotor que não possui enrolamento. A classificação do motor de passos é determinada pelo projeto do rotor. (DEL TORO, 1994). A seguir será descrito alguns tipos de motor de passo:

1. Motor de relutância: Não utiliza ímã permanente no rotor. Desenvolve um torque indexado em resposta à excitação em sequência em corrente contínua das bobinas do estator, em virtude da diferença na relutância magnética que existe entre o percurso de eixo direto e o percurso de eixo em quadratura. (DEL TORO, 1994).

2. Motor de ímã permanente: A presença de um ímã permanente fornece ao motor com o equivalente a uma excitação de corrente contínua constante. Desta forma, quando uma ou mais bobinas do estator é energizada, a máquina se comporta como um motor síncrono. Possui potência ou torque elevado na partida. (DEL TORO, 1994).

3. Motores híbridos: Estes motores empregam as características do motor de relutância variável e do motor de ímã permanente em um só. Tanto o estator como o rotor de ímã permanente são dotados de vários dentes, como mostrado na Figura 10, para o rotor poder rodar por múltiplos passos normalmente a $1,8^\circ$. Como possuem um grande torque estático e dinâmico e funcionam por pequenos passos, dando maior precisão de posicionamento, este será o motor escolhido para a aplicação neste projeto.

Figura 10: Motor de passo híbrido



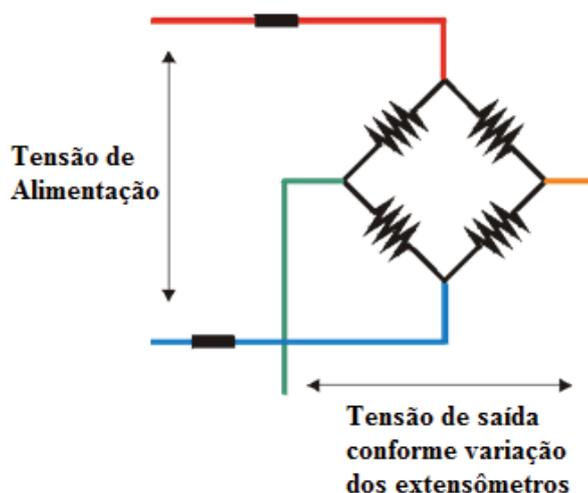
Sempre que um enrolamento é percorrido por corrente elétrica, irá desenvolver um campo magnético no estator e o rotor roda até os dois campos magnéticos ficarem alinhados. Para o motor rodar continuamente deverá ser criado um campo magnético rotativo, por meio de sucessiva excitação dos vários enrolamentos. (CONSTANDINOU, 2016).

O torque depende da frequência dos passos, corrente de excitação dos enrolamentos e tipos de excitação, e se dá em virtude da força de atração dos fluxos magnéticos do estator e do rotor. O torque produzido é proporcional à intensidade do fluxo magnético gerado pela corrente elétrica. (CONSTANDINOU, 2016).

2.2.2 Célula de Carga

O funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um extensômetro, quando submetido a uma deformação. Utilizam-se em células de carga, quatro extensômetros ligados entre si conforme a ponte de Wheatstone, Figura 11, e o desbalanceamento da mesma, devido à deformação dos extensômetros, é proporcional a força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada. Os extensômetros são colados a uma peça metálica, chamado de corpo da célula de carga e inteiramente sensíveis à sua deformação. A força atua sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é enviada aos extensômetros, que medirão sua intensidade. (MK CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO LTDA, 2016).

Figura 11: Ponte de Wheatstone.



Fonte: (http://www.celuladecarga.com.br/portal/?page_id=8, acesso em 18/05/2016).

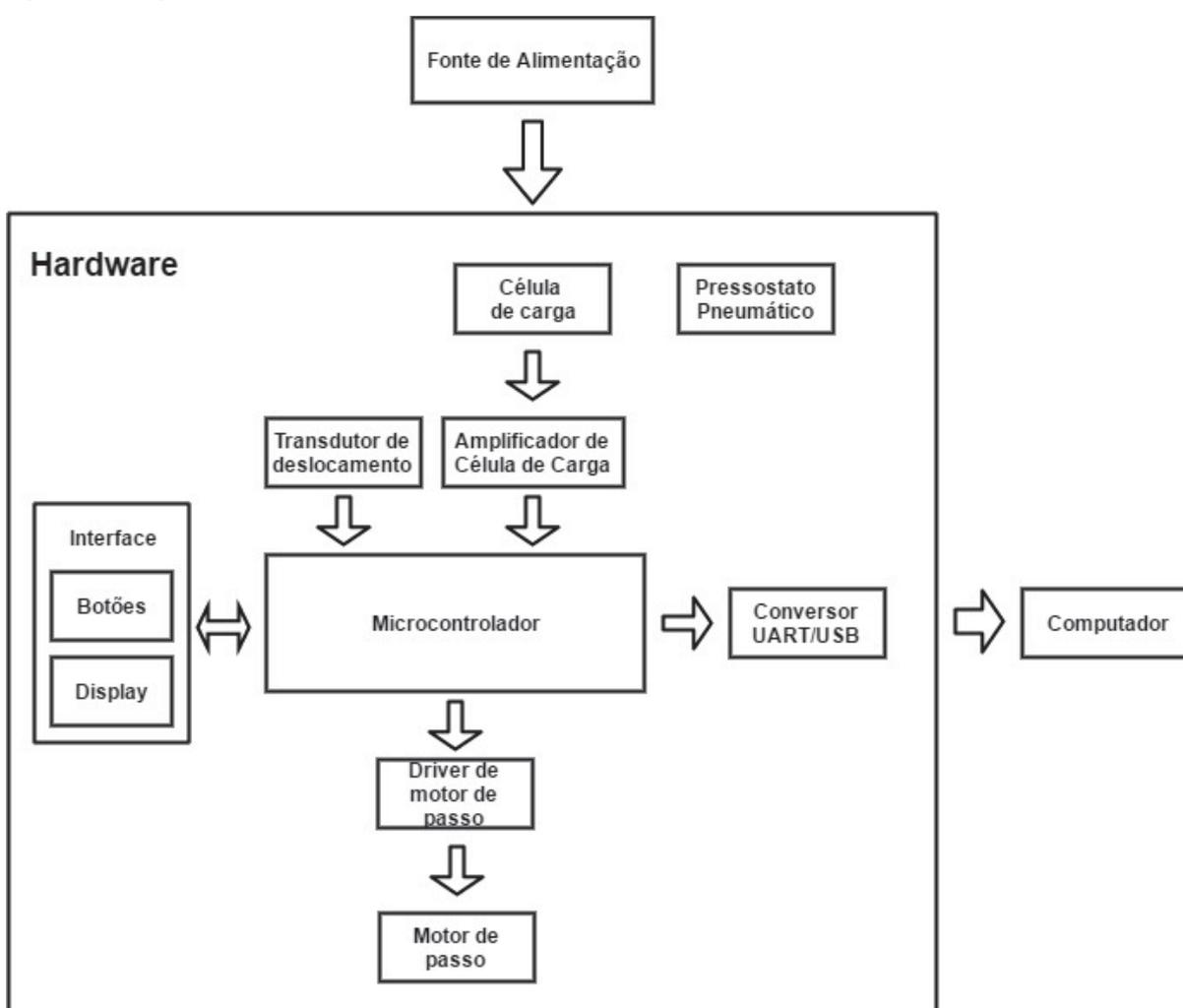
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo, serão apresentados: um diagrama de blocos do hardware e da estrutura mecânica, os componentes escolhidos e suas características e um fluxograma do firmware que foram desenvolvidos na execução do projeto.

3.1 HARDWARE

A Figura 12 mostra o diagrama de blocos da parte de hardware da máquina:

Figura 12: Diagrama de blocos do hardware



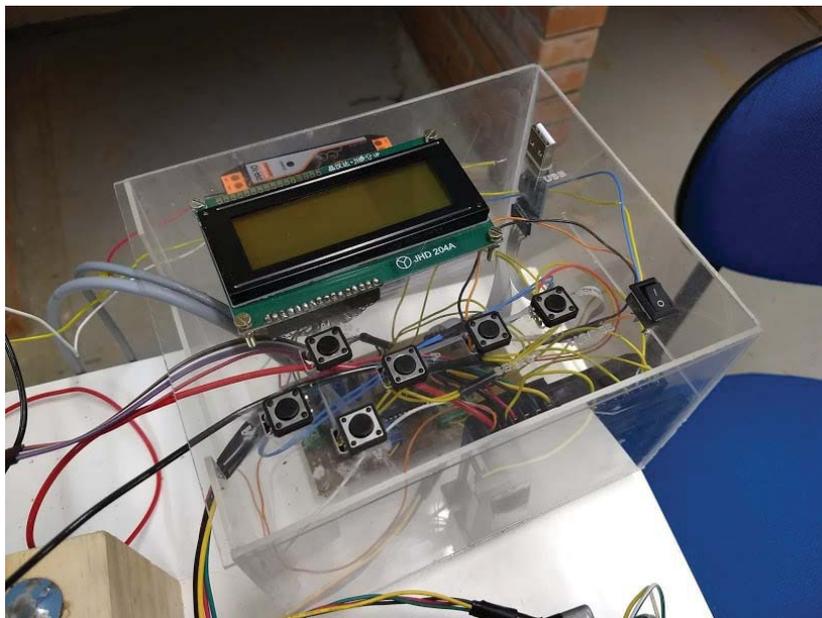
Fonte: O próprio autor.

A interface entre usuário e máquina contém 6 botões e 1 display, conforme Figura 13:

- 1 botão de seleção, para que, depois de configurado um parâmetro da máquina, o usuário possa avançar para o próximo parâmetro;
- 1 botão liga/desliga para começar e parar o ensaio;

- 4 botões para variar as configurações dos parâmetros do ensaio;
- 1 display para o usuário ver o que está sendo configurado e no momento do ensaio monitorar os resultados.

Figura 13: Interface de comunicação ente o usuário e a máquina desenvolvida no projeto.



Fonte: O próprio autor.

Os parâmetros que o usuário deverá configurar antes de cada ensaio são: o sentido do ensaio, o fim de curso do deslocamento horizontal e a velocidade do ensaio.

Através do conversor A/D do microcontrolador, o deslocamento vertical e a força horizontal que a célula de carga estará recebendo serão convertidos e suas respectivas palavras enviadas via serial para o computador, para gerar alguns gráficos. No display serão mostrados os valores do deslocamento vertical, deslocamento horizontal e a força horizontal.

Foi necessário utilizar uma saída do microcontrolador para fornecer pulsos com frequências variáveis, conforme o usuário determinar, para a entrada do driver de motor de passo. O mesmo está conectado ao motor de passo, fazendo-o girar como programado.

O projeto também conta com uma saída serial, para que, enquanto estiver sendo realizado o ensaio seja possível transmitir as palavras convertidas para um software no computador que transforma essas palavras em valores reais de deslocamento em milímetros e tensão horizontal em kN/m^2 gerando gráficos.

Abaixo estão descritos os componentes utilizados no projeto e suas características.

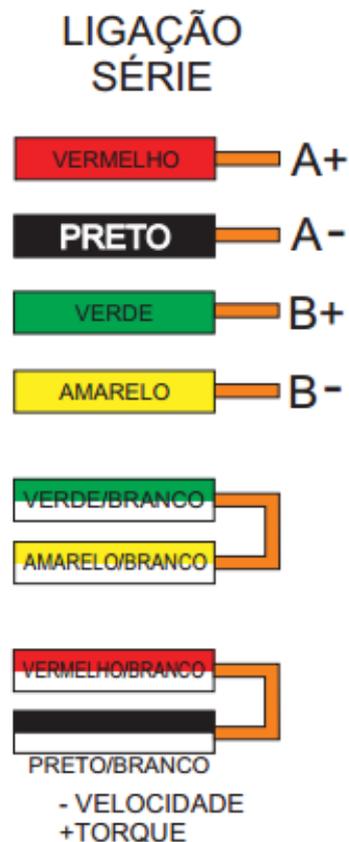
3.1.1 Motor de Passo

O motor escolhido é o Motor de Passo Nema 23, modelo HT23-400 da Kalatec, e possui as seguintes características:

- Passo em ângulo de 1,8 graus;
- Torque de 1,86 Nm;
- Quantidade de fios: 08 fios;
- Ligações possíveis: Unipolar, Bipolar Série, Bipolar Paralelo;

A ligação utilizada é a bipolar série, pois com isso o motor apresentará um elevado torque, baixa velocidade e poderá girar nos dois sentidos. A ligação dos fios está representada na Figura 14, conforme suas cores.

Figura 14: Ligação bipolar série para o motor de passo Nema 23, modelo HT23-400.



Fonte: (http://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Motor_Passo_Nema_HT231.pdf, acesso em 31/05/2016)

O motor é excitado através de um driver de motor de passo, onde os fios A+, A-, B+ e B-, conforme as cores da Figura 14 estão conectados nas saídas correspondentes do driver, o qual envia uma sequência de pulsos alternadamente para cada enrolamento do motor, desenvolvendo um campo magnético no estator, fazendo o rotor rodar até os campos

magnéticos ficarem alinhados. O driver escolhido é o ST10-PLUS da Applied Motion, conforme mostrado na Figura 15 e possui as seguintes características:

- Alimentação de 24 V corrente contínua;
- Sinal lógico de pulso na saída: 5 V corrente contínua
- Resolução: Ajustável via software na faixa de 200 a 50800 pulsos por revolução;

Figura 15: Driver de motor de passo ST10-PLUS da Applied Motion



Fonte: (<http://www.kalatec.com.br/drive-de-motor-de-passo-st10s>, acesso em 30/05/2016)

O driver foi configurado através do software STConfigurator, dado pelo fabricante, onde o mesmo pode ser habilitado para operar no modo pulso/direção (posicionamento) ou modo analógico (velocidade).

O modo utilizado para essa aplicação é o de pulso/direção, pois, para esse caso não é importante ter velocidade alta e sim precisão no deslocamento angular. No software foi programada a resolução do driver de 40000 PPR, pelo fato de que para a realização do ensaio é necessária uma velocidade baixíssima. Essa resolução é a quantidade necessária de pulsos que deverá ser enviado para o driver para o motor realizar um giro completo (360°), então, quanto maior o número de pulsos por revolução, menor será a velocidade. Também está ativado o enable do driver, isso habilita uma entrada que quando recebido um sinal, irá fazer com que o driver libere o motor para começar a girar, ou caso contrário, para fazer o motor parar de girar.

3.1.2 Célula de Carga

A célula de carga utilizada é o modelo CSL ZL, Figura 16, da MK Controle e Instrumentação LTDA e tem como principais características as seguintes:

- Sensibilidade Nominal: $2 \pm 0,02$ mV/V;
- Temperatura de operação: $-20 \sim 55$ °C ;
- Tensão de excitação: $9 \sim 12$ VDC;
- Material: Liga de alumínio.

(MK CONTROLE, 2016).

Figura 16: Célula de Carga CSL ZL da MK Controle de Instrumentação LTDA.



Fonte: (http://www.mkcontrole.com.br/ficha_csl_zl.html, acesso em 16/05/2016).

Um amplificador de célula de carga é necessário para elevar a tensão de saída da célula de carga, e ser lido pelo microcontrolador para ter maior exatidão na leitura. O amplificador utilizado é o PO-10 da Tecnolog, Figura 17, onde suas principais características estão citadas abaixo:

- Alimentação em $24 V_{cc} \pm 10\%$;
- Consumo: $\sim 5W$;
- Temperatura de Operação: $0^{\circ}C$ a $40^{\circ}C$;
- Sinal de entrada: Célula de carga de $2mV/V$;
- Sinal de saída: 0 a $10V_{cc}$ (máx. $10mA$);
- Ajuste de “zero” no frontal do aparelho;

(TECNOLOG, 2016).

Figura 17: Amplificador de célula de carga PO-10 da Tecnolog.



Fonte:(<http://www.tecnolog.ind.br/forca-ou-peso/384-amplificador-para-celulas-de-carga-puls-po-10.html>, acesso em 16/05/2016).

3.1.3 Sensor de Deslocamento Vertical

O sensor de deslocamento vertical escolhido para esta aplicação é o modelo PY2 da Gefran, de 55 mm, mostrado na Figura 18.

Figura 18: Sensor de deslocamento PY2 da Gefran.



Fonte:(<http://www.gefran.com/pt/br/products/73-py2-apalpador-com-ponta-de-esfera>, acesso em 08/05/2017).

Seu funcionamento é igual ao do potenciômetro, onde a haste se comporta como o cursor do mesmo. Ao mudar seu posicionamento faz com que varie a resistência elétrica, assim fornecendo a tensão de saída. A alimentação utilizada é de 5 Volts e sua saída varia de acordo com a resistência elétrica, podendo ir de 0 Volts à 5 Volts.

3.1.4 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado é o PIC 16F887, suas principais características para esta aplicação estão descritas a seguir:

- Frequência de operação de 0 a 20MHz;
- Tensão de alimentação de 5 V;
- 35 pinos I/O;
- Memória de programa de 8k;
- Memória EEPROM de 256 bytes;
- Memória RAM de 368 bytes;
- Conversor A/D com 14 canais e 10 bits de resolução;
- 3 Temporizadores / Contadores independentes;
- Saída controlada por PWM;
- Porta Serial.

(SENA)

3.1.5 Pressostato Pneumático

O pressostato pneumático é um instrumento de medição de pressão que transforma um sinal de entrada pneumático num sinal de saída elétrico Normalmente são utilizados como sistema de proteção de um equipamento ou processo industrial.

Nesta aplicação o pressostato está sendo utilizado somente para medir a pressão de ensaio que o cilindro pneumático estará fazendo sobre o corpo de prova e não foi utilizado como sistema de proteção. O cilindro pneumático é utilizado para aplicar a tensão normal à amostra. Como o pressostato já possui um display próprio que mostra a pressão que estará no cilindro pneumático, não será necessário que a sua saída seja conectada no microcontrolador e convertida através do A/D. Somente será utilizada a fonte de alimentação para ligá-lo.

Para esta aplicação foi escolhido o Pressostato Eletrônico 50D Pneumático da Norgren, Figura 19, e tem como principais características as seguintes:

- Fluido: Ar comprimido;
- Faixas de pressão opcionais: 0 – 6 bar, 0 – 10 bar, -1 – 0 bar, -1 – 1 bar;
- Display: unidades de pressão bar, psi, kPa, Vácuo pol. Hg;
- Alimentação Elétrica: 17 V a 30 V, corrente contínua;
- Saída analógica 4 – 20mA / 0 – 10V.

Figura 19: Pressostato Eletrônico 50D Pneumático da Norgren



Fonte:(http://cdn.norgren.com/pdf/z7074_en_50D_Broch.pdf, acesso em 23/05/2016).

3.1.6 Conversor UART/USB

O conversor UART para USB utilizado no projeto é o PL2303 mostrado na Figura 20. Ele permite que os sinais de nível TTL vindos do microcontrolador sejam convertidos para sinais USB, dessa forma obtendo a comunicação entre o hardware e o computador.

Figura 20: Conversor UART/USB PL2303

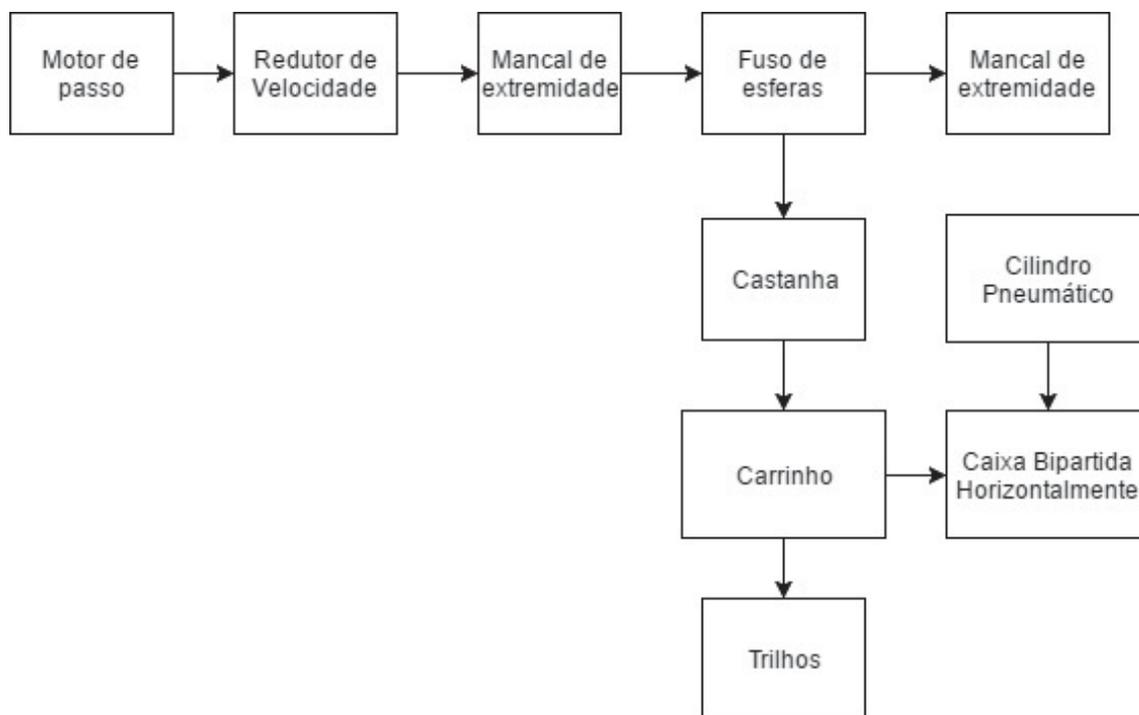


Fonte:(<https://electrosome.com/pl2303-usb-to-uart-converter/>, acesso em 18/05/2017).

3.2 ESTRUTURA MECÂNICA

A Figura 21 mostra o diagrama de blocos da parte da estrutura mecânica da máquina.

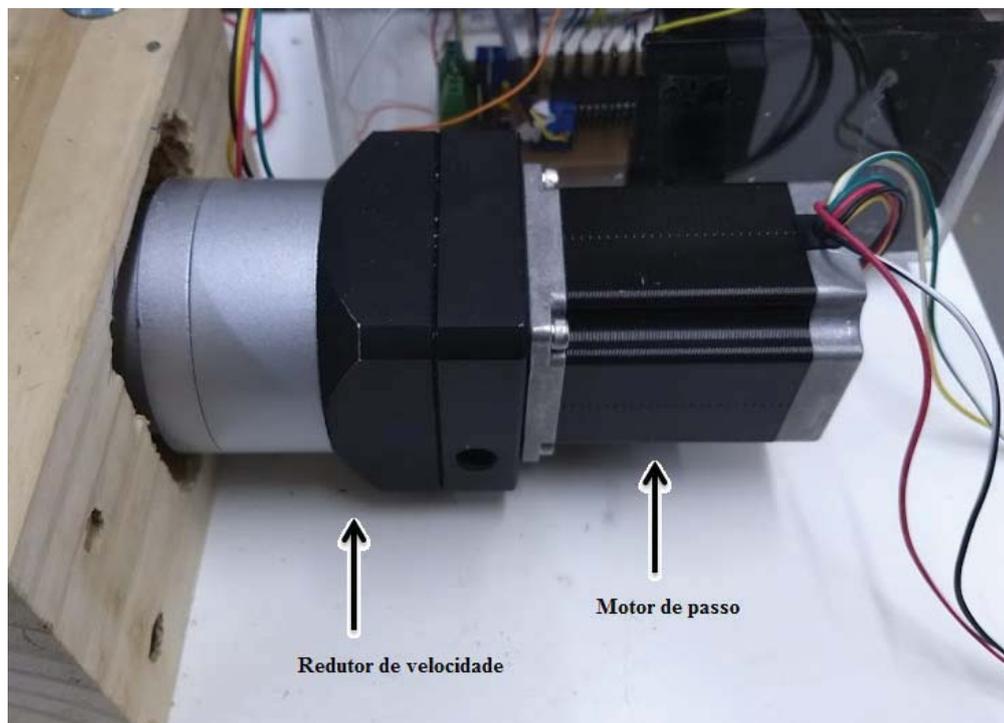
Figura 21: Diagrama de blocos da estrutura mecânica.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 22 é apresentada a conexão do motor de passo no redutor de velocidade. O redutor de velocidade recebe o torque de entrada proveniente do motor de passo, o qual é distribuído em 3 engrenagens, denominadas planetárias, que estão solidárias a engrenagem grande solar. As engrenagens planetárias estão engatadas cada qual a uma engrenagem auxiliar permitindo que as transmissões dos movimentos alcancem a carcaça interna do redutor que também tem dentes de engrenagens e serve de apoio para o momento de torção. Assim o movimento das engrenagens flui para o eixo de saída já como torque de saída. (KALATEC, 2017).

Figura 22: Conexão do motor de passo no redutor de velocidade.



Fonte: O próprio autor.

O redutor de velocidade utilizado no projeto é o PEE70T- 100-HT23 da SESAME MOTOR mostrado na Figura 23. Ele irá reduzir a velocidade de saída do motor de passo em 100 vezes e elevar o torque do mesmo.

Figura 23: Redutor de velocidade PEE70T-100-HT23 da SESAME MOTOR.



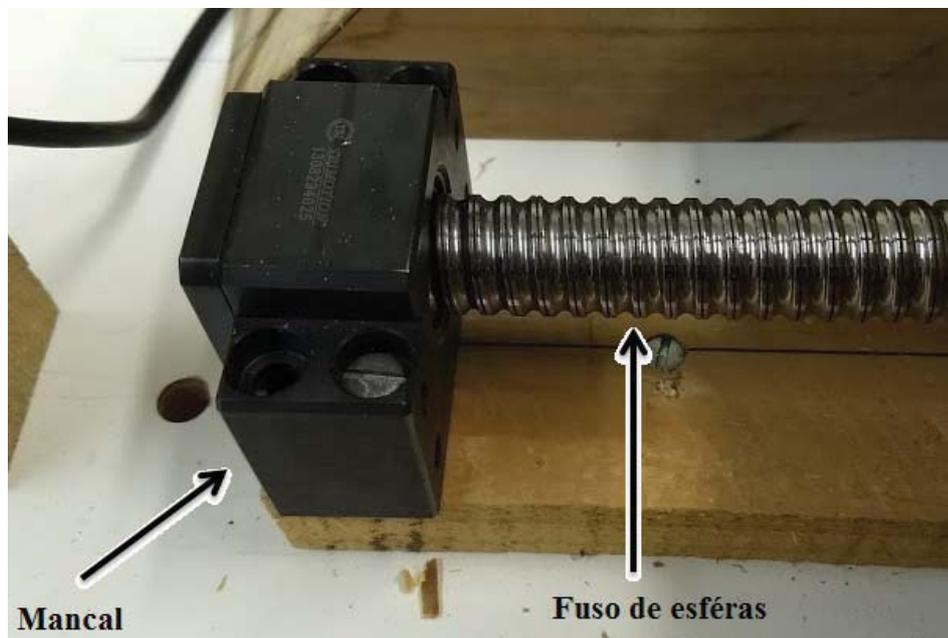
Fonte:(<http://www.kalatec.com.br/pee70t-100-ht23>, acesso em 17/05/2017).

Suas principais características são:

- Redução 100:1;
- Torque nominal: 25 Nm;
- Máxima rotação: 6000 RPM;
- Máxima carga radial: 960 N.

Os dois mancais ficam um em cada extremidade do fuso de esferas e são fixados em uma superfície reta, conforme mostra a Figura 24.

Figura 24: Acoplamento dos mancais no fuso de esferas e superfície.



Fonte: O próprio autor.

O fuso de esferas está conectado ao eixo do redutor de velocidade. Quando o redutor de velocidade girar, irá fazer com que o fuso de esferas gire, movendo a castanha, conforme mostra a Figura 25. A castanha irá mover o carrinho onde contém a caixa bipartida com o corpo de prova. A parte superior da caixa estará encostada na célula de carga e a parte inferior estará fixa no carrinho. Ao fazer o carrinho andar, uma parte do corpo de prova irá mover sobre a outra, realizando o ensaio.

Figura 25: Castanha e fuso de esferas.



Fonte: (<http://www.kalatec.com.br/produtos/fusos-de-esferas>, acesso em 19/06/2017).

O carrinho irá andar sobre trilhos, como mostrado na Figura 26, para que não haja atrito, por isso a caixa bipartida não é colocada diretamente sobre a superfície, assim dando maior precisão no ensaio.

Figura 26: Carrinho e trilhos.



Fonte: O próprio autor.

O cilindro pneumático é utilizado para aplicar a força vertical sobre o corpo de prova. Essa força é aplicada no início do ensaio e ficará constante até o seu término. O cilindro pneumático utilizado é o RA/8100/M/50 da Norgren mostrado na Figura 27.

Figura 27: Cilindro Pneumático RA/8100/M/50 da Norgren.

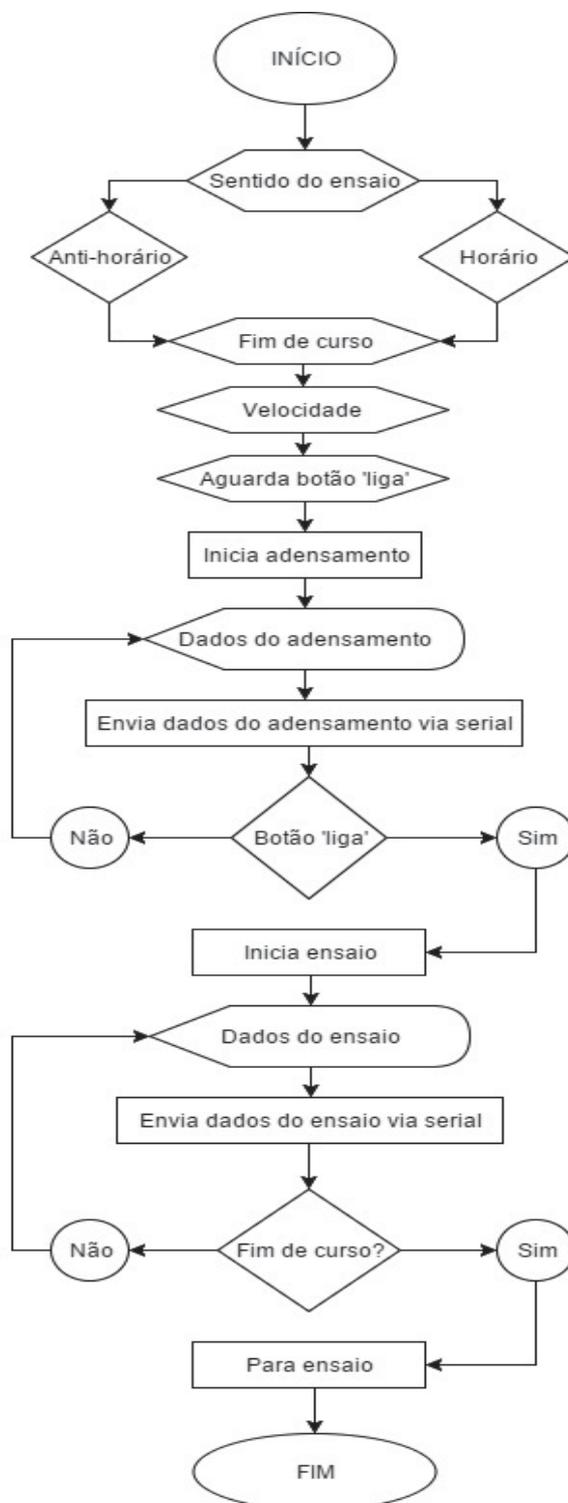


Fonte: (<http://de.brammer.biz/product/3525768/name/RA-8100-M-50-NORGREN-DW-PNEUMATIKZYLINDER>, acesso em 23/05/2017).

3.3 FIRMWARE

A Figura 28 mostra um fluxograma de como ficou o firmware do microcontrolador.

Figura 28: Fluxograma do firmware



Fonte: O próprio autor.

Ao ligar a máquina, será necessário realizar algumas configurações antes de iniciar o ensaio, sejam elas:

1. O usuário deverá definir em que sentido o motor irá girar: sentido horário ou anti-horário. Conforme o que o usuário selecionar, será enviado, através de uma porta do microcontrolador, o sinal referente ao sentido escolhido para a porta DIR+ do Driver de motor de passo: '0' para sentido anti-horário e '1' para sentido horário.
2. Deve-se escolher o final de curso, ou seja, quantos milímetros terá o deslocamento horizontal, com um mínimo de 10 mm e com um máximo de 150 mm, fazendo com que a amostra de solo chegue à ruptura. O fim de curso escolhido é armazenado em uma variável, para que depois, no andamento do ensaio, o microcontrolador possa reconhecer o fim de curso selecionado e comparar com o deslocamento horizontal do momento. Quando o deslocamento horizontal for igual ao fim de curso, será enviado um sinal ('0') para a porta EN+ (enable) do driver, fazendo com que o motor pare de rodar. Não é utilizado nenhum sensor para obter o deslocamento horizontal, pelo fato de que, o motor irá fazer com que o fuso de esferas gire, movendo a castanha 0,05 mm a cada volta completa que for dada no eixo do motor, sendo que será necessário enviar para o driver 40.000 pulsos para o motor realizar um giro completo. Então, é possível obter esse deslocamento apenas pela contagem dos pulsos enviados.
3. Após, será escolhida a velocidade do ensaio, sendo a velocidade mínima de 0,01 mm/h até a sua máxima de 6,00 mm/h. Escolhida essa velocidade, o firmware realizará alguns cálculos, através das Equações (8), (9), (10) e (11), para que seja ajustado o timer do microcontrolador. É através do timer que definirá a frequência dos pulsos a serem enviados para o driver.

É utilizada a Equação (8), ou seja, multiplicar por 100 a velocidade selecionada, pois, antes do redutor de velocidade, ela será 100 vezes maior que a do ensaio.

$$velocidade (mm/h) = velocidade selecionada * 100 \quad (8)$$

A Equação (9) transforma a velocidade de milímetros por hora para milímetros por minuto.

$$velocidade (mm/min) = \frac{velocidade (mm/h)}{60 min} \quad (9)$$

A Equação (10) definirá a quantidade de pulsos por minuto enviados para o driver para a velocidade selecionada, sabendo que a resolução do driver é de 40000 pulsos por volta e cada volta dada no eixo do motor terá um deslocamento de 5 mm antes do redutor de velocidade ou 0,05 mm depois do redutor de velocidade.

$$\text{Quantida de pulsos por min} = \frac{\text{velocidade (mm/min)} * 40000\text{pulsos}}{5 \text{ mm}} \quad (10)$$

O período em que deverá ser chamada cada interrupção do timer é definido pela Equação (11).

$$T = \frac{60 \text{ segundos}}{\frac{\text{Quantidade de pulsos por min}}{2}} \quad (11)$$

Onde:

T = Período de cada interrupção do timer

Ao chamar a interrupção do timer, a porta do microcontrolador que estará enviando os pulsos para o driver de motor de passo, trocará de estado lógico, fazendo dar um pulso a cada duas vezes que a interrupção é chamada, gerando a frequência desejada para cada velocidade.

Feito esses ajustes, a máquina irá ficar esperando até que o botão ‘liga’ seja apertado para iniciar o adensamento. Sendo apertado esse botão, o adensamento é iniciado, mostrando no display os dados do sensor de deslocamento vertical, e enviando os mesmos via serial para o computador. O adensamento acontece quando o usuário aplica somente a força normal através do cilindro pneumático sobre o corpo de prova, então, será monitorado o deslocamento vertical para ver quando a amostra estará estabilizada dentro da caixa para poder iniciar o ensaio. A máquina novamente ficará esperando o usuário apertar o botão ‘liga’ para passar para a próxima etapa e iniciar o ensaio.

Nesta etapa o ensaio é iniciado, então, o microcontrolador enviará os pulsos para o driver de motor de passo, fazendo o motor girar e realizar o deslocamento horizontal, movendo o carrinho com a caixa onde estará o corpo de prova. O A/D do microcontrolador irá converter os dados do sensor de deslocamento vertical e a força horizontal que a célula de carga estará recebendo, mostrando no display seus respectivos valores, deslocamento em milímetros e força horizontal em kN.

O usuário poderá parar o ensaio no momento em que desejar, apertando o botão ‘liga/desliga’, podendo trocar a direção do ensaio.

Quando o deslocamento horizontal chegar ao seu fim de curso, selecionado pelo usuário, o motor irá parar e o ensaio estará pronto.

3.3.1 Calibração dos sensores

Para realizar a calibração da célula de carga, foram adicionadas várias massas de diferentes valores sobre a mesma, sendo obtida a respectiva palavra convertida para cada massa. Então, esses dados foram colocados no Microsoft Excel, conforme a Tabela 1, mostrada abaixo.

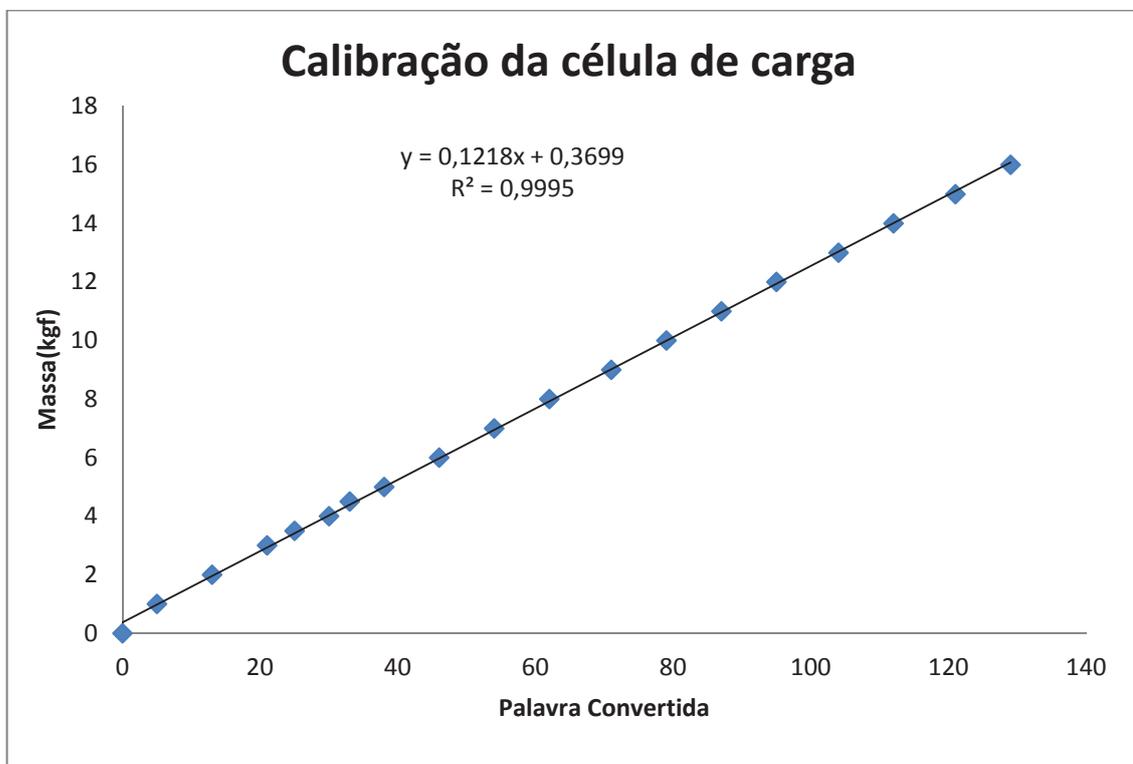
Tabela 1 – Palavra convertida em relação à massa adicionada sobre a célula de carga

Massa (kg)	Palavra Convertida
0	0
1	5
2	13
3	21
3,5	25
4	30
4,5	33
5	38
6	46
7	54
8	62
9	71
10	79
11	87
12	95
13	104
14	112
15	121
16	129

Fonte: O próprio autor.

Após, com esses dados, foi gerado o gráfico da Figura 29 para obter a equação de calibração.

Figura 29: Gráfico da palavra convertida em função da carga adicionada sobre a célula de carga.



Fonte: O próprio autor.

Com isso, a Equação (14) de calibração da célula de carga foi obtida.

$$Y = 0,1218 * X + 0,3699 \quad (14)$$

Onde:

Y: Força que a célula de carga estará recebendo em kgf.

X: Palavra convertida pelo A/D do microcontrolador, referente à célula de carga.

Essa equação irá transformar a palavra convertida pelo A/D para o valor real que a célula de carga estará recebendo em kg, mas como é necessário mostrar esse valor em kN, então a Equação (15) é utilizada no firmware.

$$F_C = Y * 0,01 \quad (15)$$

Onde:

F_C: Força que a célula de carga estará recebendo em kN.

Como se pode ver pelo gráfico, foi obtida uma equação linear. Com isso a célula de carga terá como leitura inicial 0,0036 kN, sendo que a sua leitura mínima real acontecerá aproximadamente a partir de 0,005 kN e a leitura máxima será de aproximadamente 5 kN.

O mesmo modo foi utilizado para fazer a calibração do transdutor de deslocamento. Foram obtidas várias medidas de deslocamento e então, foi criada a Tabela 2 no Microsoft Excel.

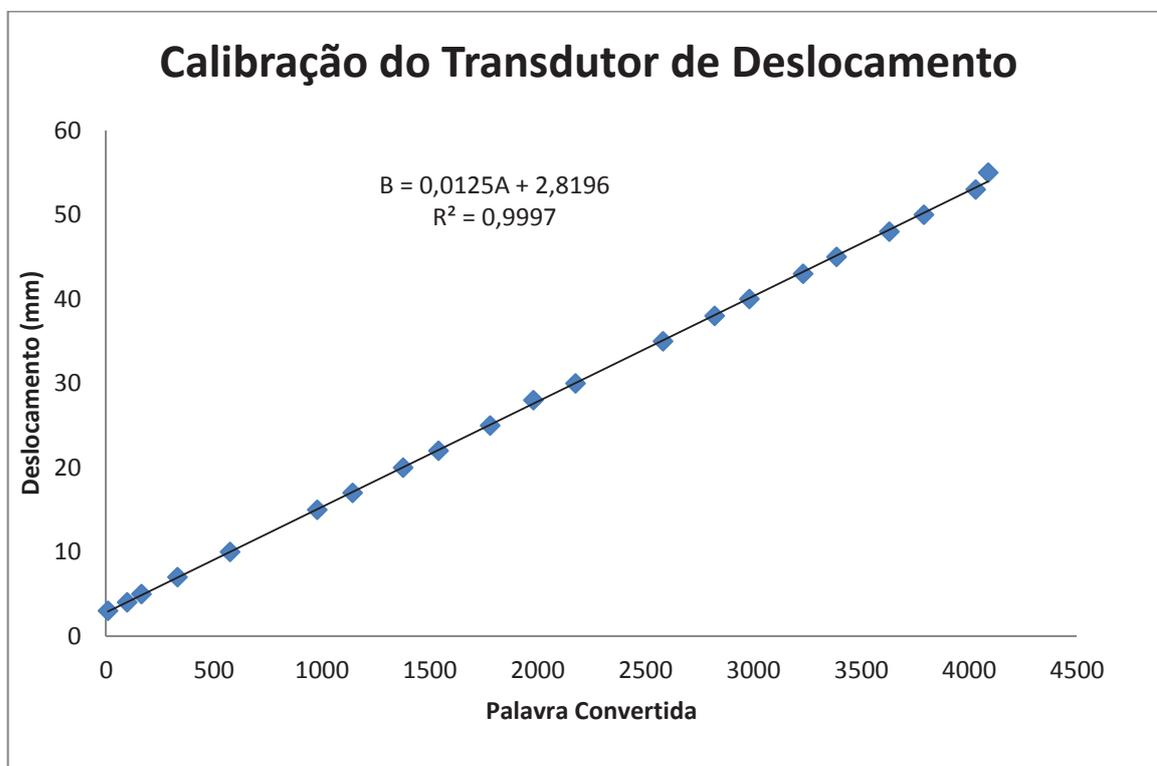
Tabela 2 – Palavra convertida em relação à medida do transdutor de deslocamento.

Deslocamento (mm)	Palavra Convertida
0	0
3	8
4	97
5	163
7	330
10	574
15	978
17	1142
20	1376
22	1540
25	1779
28	1980
30	2175
35	2581
38	2820
40	2981
43	3230
45	3385
48	3630
50	3790
53	4030
55	4088

Fonte: O próprio autor.

Após, com esses dados, foi gerado o gráfico da Figura 30 para obter a equação de calibração.

Figura 30: Palavra convertida em função do deslocamento vertical.



Fonte: O próprio autor.

Com isso, a Equação (16) de calibração do transdutor de deslocamento foi obtida.

$$B = 0,0125 * A + 2,8196 \quad (16)$$

Onde:

B: Valor do sensor de deslocamento vertical em milímetros.

A: Palavra convertida pelo A/D do microcontrolador, referente ao sensor de deslocamento vertical.

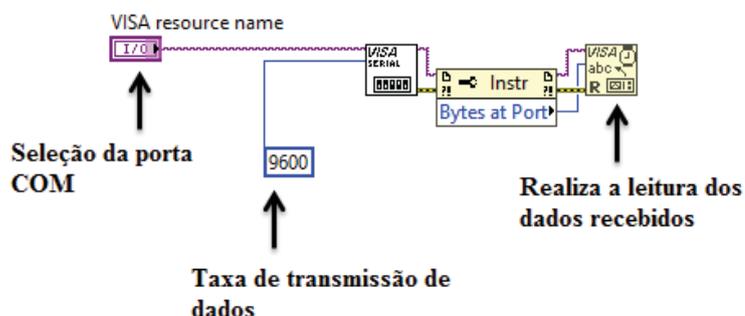
Como se pode ver pelo gráfico, o ponto (0,0) não foi utilizado, assim foi obtida uma equação linear. Com isso o transdutor de deslocamento terá como leitura inicial 2,81 milímetros, sendo que sua leitura mínima real acontecerá aproximadamente a partir dos 3 milímetros e a leitura máxima será de aproximadamente 53,91 milímetros.

As palavras convertidas pelo A/D também serão enviadas via serial para o computador.

3.4 SOFTWARE

O software foi desenvolvido através do programa LabView e está descrito abaixo.

Figura 31: Configuração da porta COM.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 31 mostra a configuração da porta de comunicação, onde a mesma apresenta uma taxa de transmissão de dados de 9600 bits por segundo. O usuário quando for iniciar o ensaio deverá selecionar a porta de comunicação em que o cabo está conectado no computador.

A Figura 32 mostra como são manipulados os valores recebidos no software. Os dados são mandados com uma letra na frente de cada número para o software conseguir diferenciar e separar tal dado, por exemplo, o valor da velocidade é enviado com a letra 'd' na frente, o do deslocamento vertical com a letra 'a', o do deslocamento horizontal com a letra 'b' e o da força horizontal com a letra 'c'. Ao receber os valores com suas respectivas letras na frente, o software reconhece cada valor e os separa, depois disso, como eles são enviados como string via serial, os mesmos são transformados em números inteiros, e então, as Equações (17), (18) e (19) irão transformá-los nos valores que deverão aparecer nos gráficos.

A Equação (17) é utilizada pelo fato de que o software irá transformar o valor recebido via serial em inteiro e no gráfico o acréscimo do deslocamento horizontal será a cada 0.1 milímetros.

$$D_H = D * 0,1 \quad (17)$$

Onde:

D_H: Deslocamento horizontal em milímetros.

D: Valor recebido via serial para o deslocamento horizontal.

A Equação (18) utilizada para o deslocamento vertical no software é igual a Equação (16) de calibração do mesmo utilizada para o firmware.

$$D_V = (0,0125 * A + 2,8196) \quad (18)$$

Onde:

D_V: Deslocamento vertical em milímetros.

A: Valor recebido via serial para o deslocamento vertical.

A Equação (19) é utilizada para mostrar no gráfico o valor da tensão horizontal em kN/m².

$$T_H = \frac{(0,1218 * X + 0,3699) * 0,01}{0,0025} \quad (19)$$

Onde:

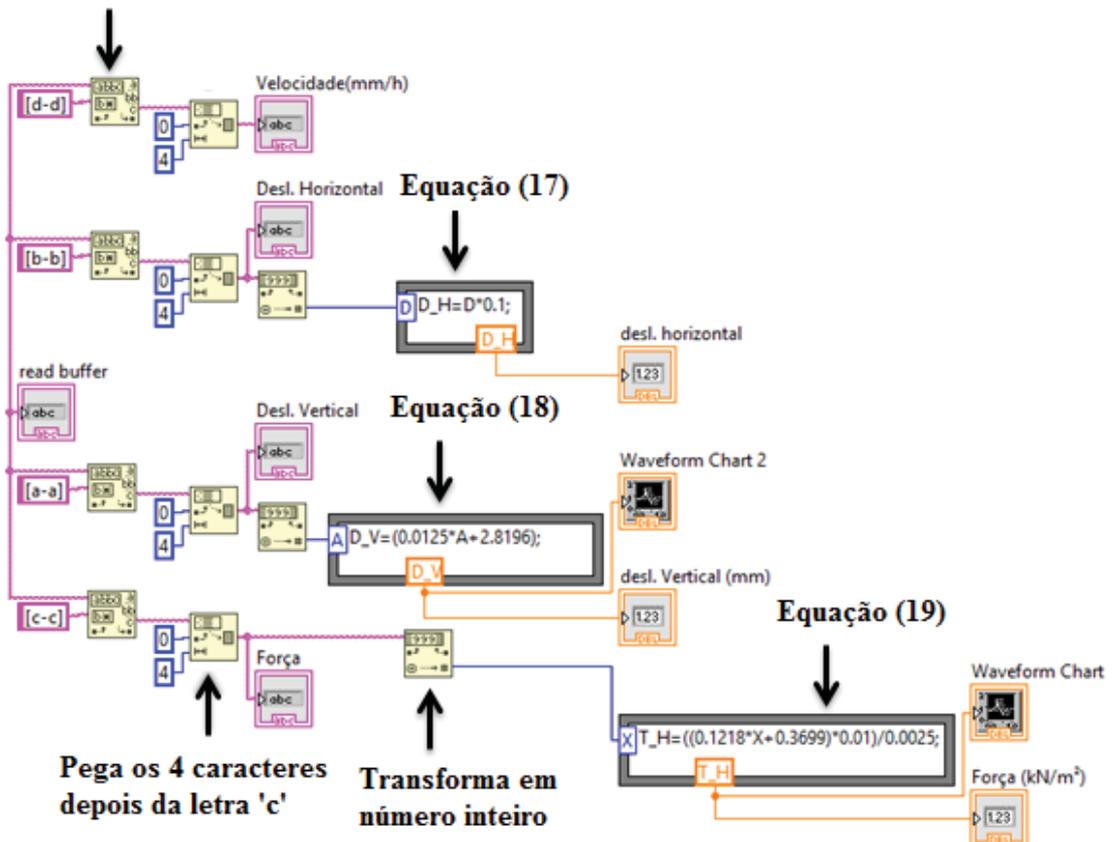
T_H: Tensão horizontal em kN/m².

X: Valor recebido via serial para a tensão horizontal.

0,0025: Área da caixa bipartida, em m².

Figura 32: Manipulação dos dados recebidos.

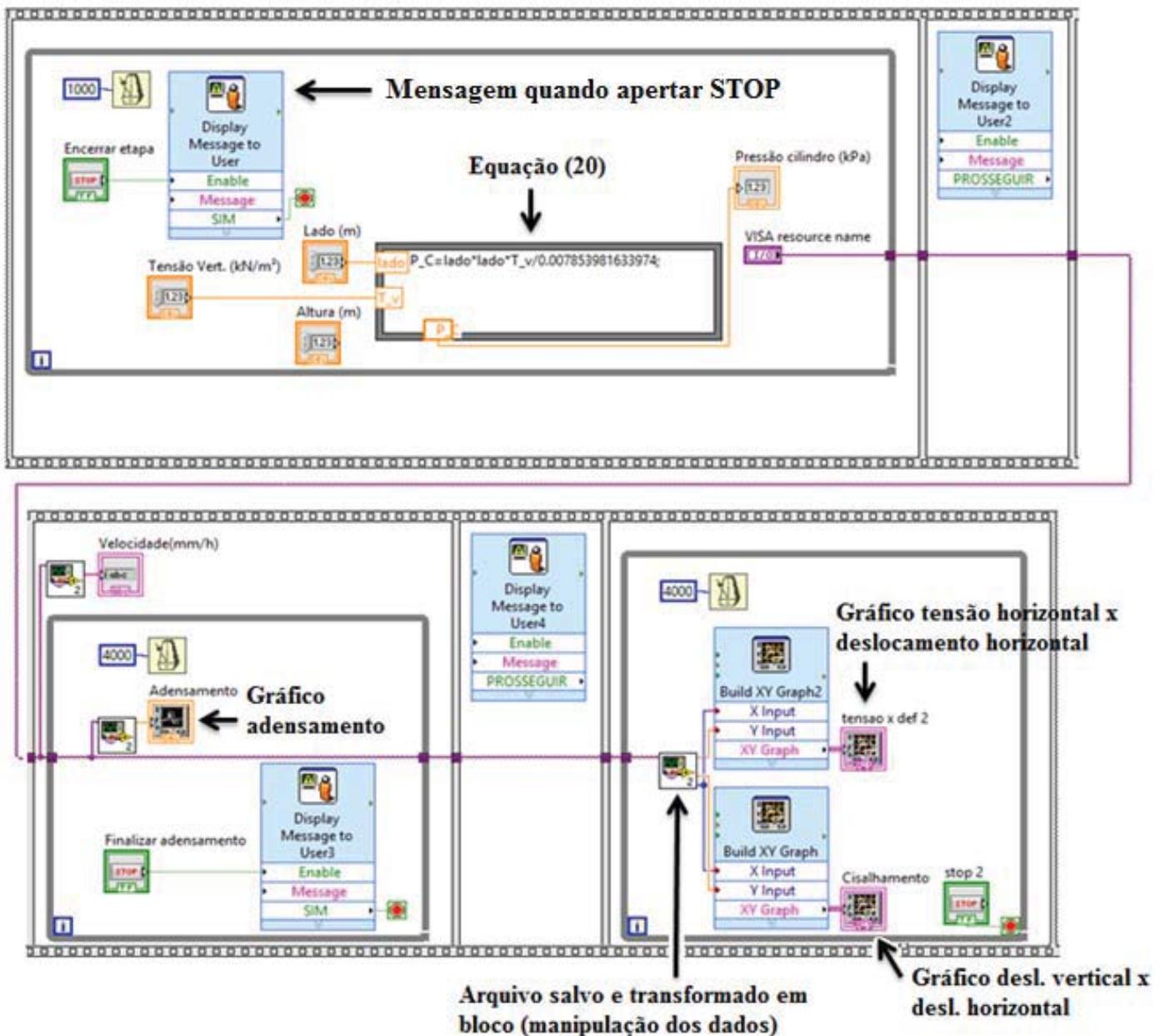
**Reconhece o dado com a letra
'd' na frente**



Fonte: O próprio autor.

Isso tudo é salvo e transformado em um único bloco que é utilizado em outro arquivo do LabView, conforme Figura 33.

Figura 33: Diagrama final do software



Fonte: O próprio autor.

A Figura 33 apresenta o diagrama final do software, onde, ao iniciar o programa, o usuário deverá informar os valores do corpo de prova: largura e altura, e a tensão vertical em kN/m² que o mesmo deseja aplicar. Com esses dados, através da Equação (20), é obtido o valor da pressão em kPa, que é a unidade de medida do pressostato pneumático utilizado no projeto, e o mesmo deve ser ajustado no cilindro pneumático.

$$P_C = \frac{lado * lado * T_v}{0,007853981633974} \quad (20)$$

Onde:

P_C: Pressão no Cilindro em kPa.

lado: Largura do corpo de prova.

T_v: Tensão vertical desejada em kN/m².

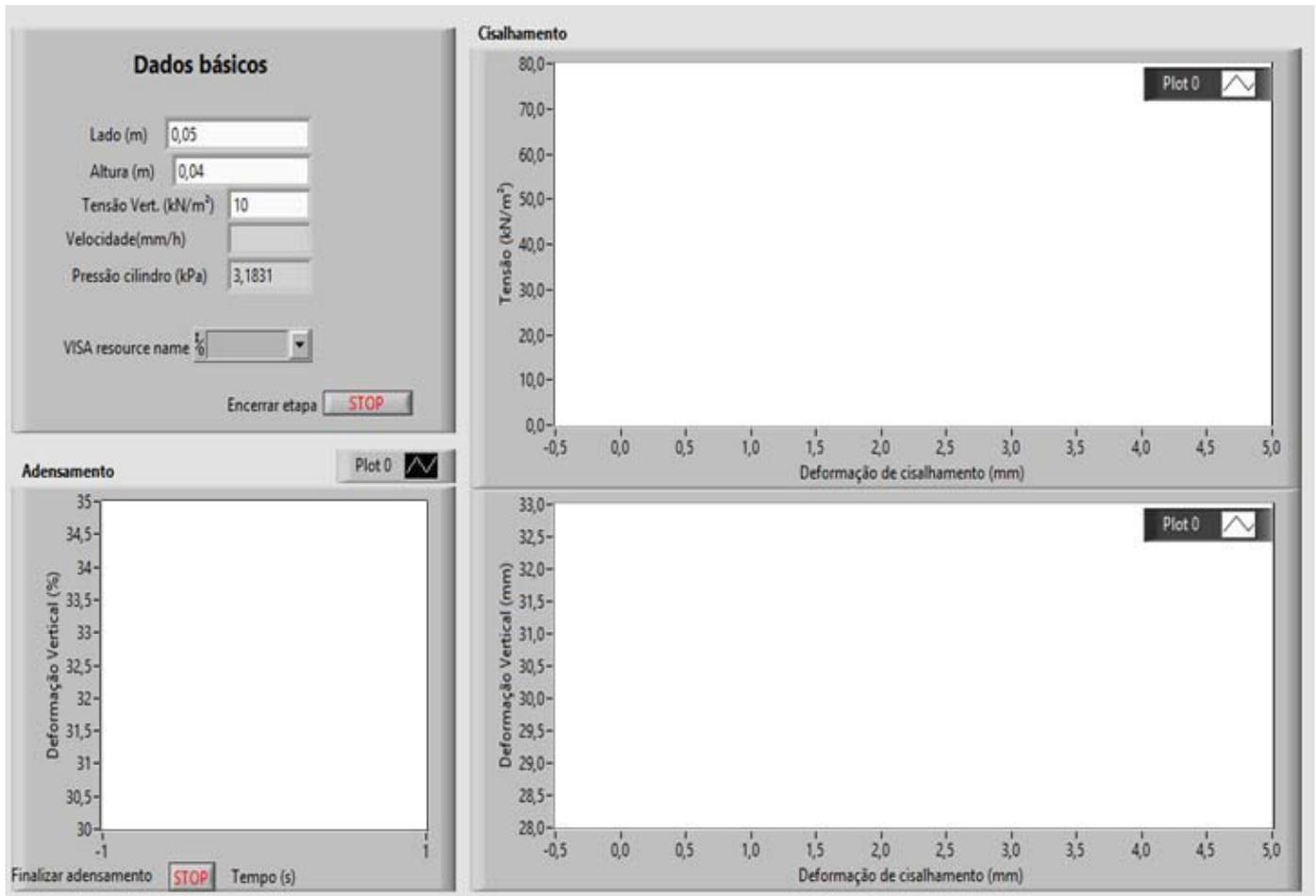
0,007853981633974: Área do cilindro pneumático.

Após, deverá ser informada a porta COM que foi conectado o cabo de comunicação serial. Ficará nesse laço até que o usuário aperte o botão STOP na tela do software para seguir para a próxima etapa. Ao apertar o botão, aparecerá a pergunta ‘dados corretos?’ se sim, irá aparecer nova mensagem para que o equipamento seja ligado e ajustada a pressão no cilindro para iniciar o adensamento.

Ao iniciar o adensamento, a velocidade que foi definida para o ensaio será mostrada e irá gerar um gráfico do deslocamento vertical em função do tempo, para que seja possível observar quando o corpo de prova estará estável. O programa ficará nesse laço até o botão STOP ser apertado. Ao apertar o botão, o usuário será perguntado se deseja iniciar o ensaio, se sim, a mensagem ‘APERTAR BOTÃO 'LIGA' PARA INICIAR...’ irá aparecer.

Então, o ensaio começará, e o software gerará dois gráficos: um mostrando a tensão horizontal em função do deslocamento horizontal e outro do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal.

A Figura 34 mostra a interface gráfica do software, onde o usuário deverá entrar com os dados básicos para obter a pressão em kPa que deve ser ajustada no cilindro pneumático e selecionar a porta COM. No gráfico menor será mostrado o adensamento. E nos outros dois gráficos maiores aparecerão os dados do cisalhamento.

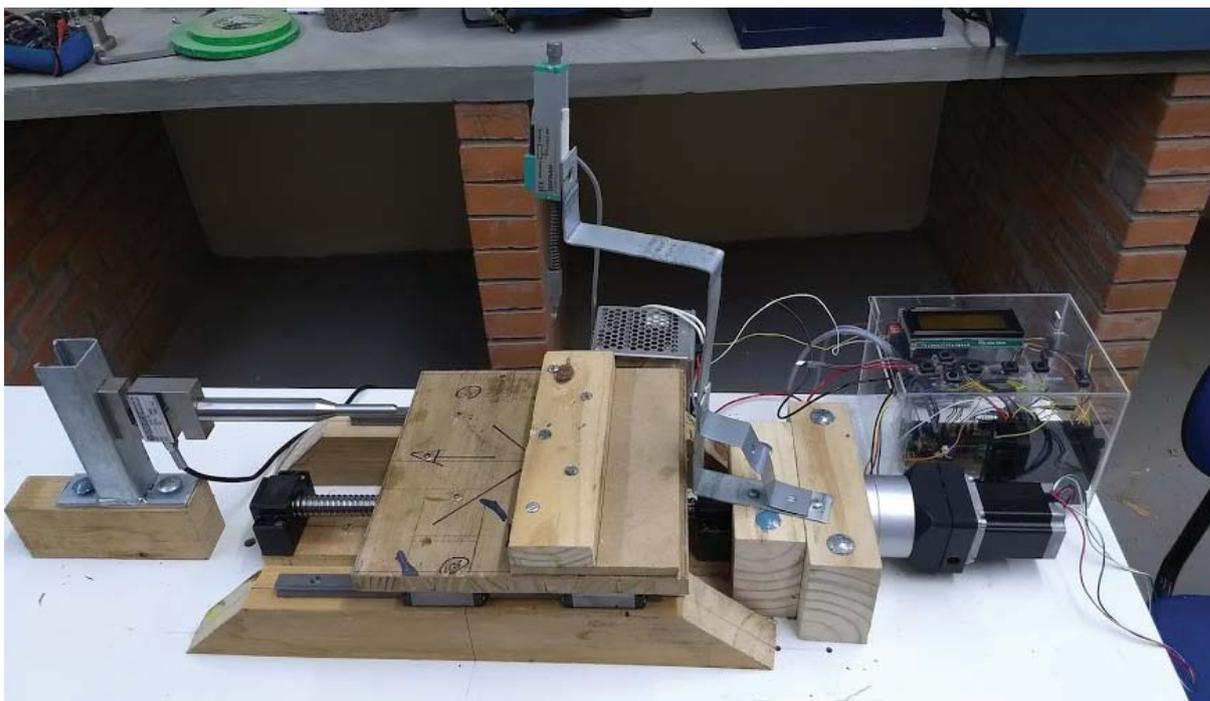


Fonte: O próprio autor.

4 RESULTADOS

Foi criado um protótipo da máquina em madeira, mostrado na Figura 35, para que fosse possível realizar um ensaio para verificar seu comportamento e ver se seu funcionamento está como o desejado e então retirar os resultados do cisalhamento.

Figura 35: Protótipo provisório da máquina.



Fonte: O próprio autor.

Para o ensaio foi utilizado como corpo de prova areia de Osório. Então, foram obtidas as medidas da caixa bipartida onde a areia foi colocada, que possui uma área de $0,0025 \text{ m}^2$ e uma altura de $0,04 \text{ m}$, para realizar os cálculos e posteriormente iniciar o ensaio. Esse ensaio foi realizado aplicando duas forças normais: primeiro uma força de 25 kgf ou $0,25 \text{ kN}$ e por segundo uma força de 32 kgf ou $0,32 \text{ kN}$. Cada ensaio demorou aproximadamente 90 minutos.

O sensor de deslocamento vertical foi ajustado na máquina para ter seu valor inicial em aproximadamente 33 milímetros, pelo fato de que no andamento do ensaio a altura da amostra poderá aumentar de tamanho dentro da caixa, como poderá diminuir.

Esses ensaios estão demonstrados a seguir:

- Ensaio para força normal de 0,25 kN.

Cálculo da tensão normal através da Equação (4):

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{0,25 \text{ kN}}{0,0025 \text{ m}^2} = 100 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Após, a amostra foi colocada na caixa e alocada na máquina. No software foram adicionados os dados básicos conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36: Dados básicos do ensaio para força normal de 0,25 kN.

Fonte: O próprio autor.

Então foi aplicada a tensão normal de 100 kN/m² sobre a amostra e iniciado o adensamento conforme a Figura 37.

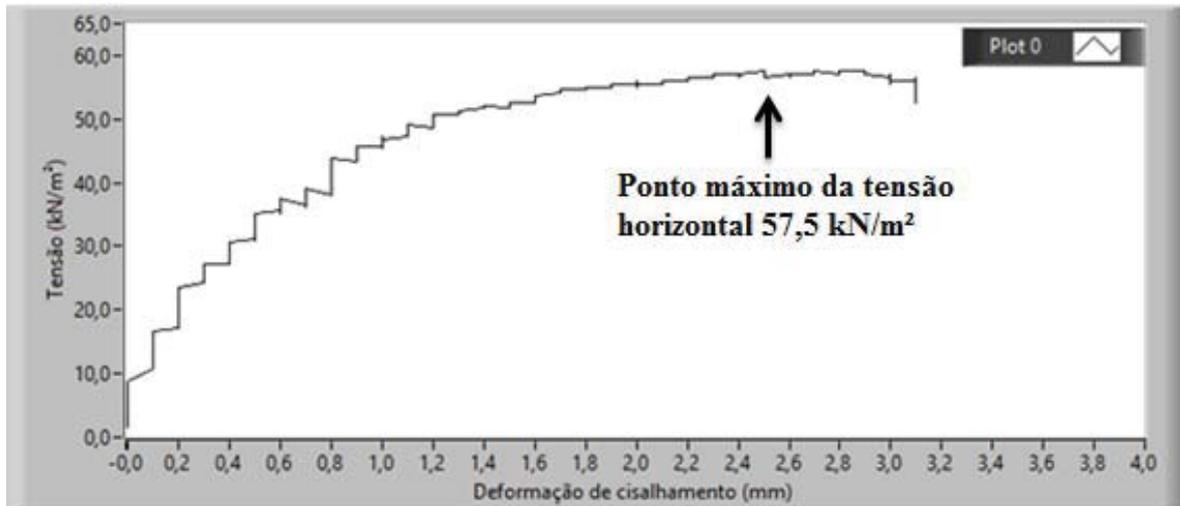
Figura 37: Adensamento do ensaio para força normal de 0,25 kN.



Fonte: O próprio autor.

Como se pode ver, durante o adensamento a amostra permaneceu estabilizada dentro da caixa podendo ser iniciado o ensaio. Na Figura 38 observa-se que a tensão horizontal aumenta com o seu deslocamento, até que a tensão de ruptura seja alcançada, em aproximadamente 2,5 milímetros, com uma tensão cisalhante de 57,5 kN/m². Depois, ela permanece aproximadamente constante para qualquer aumento adicional no deslocamento cisalhante.

Figura 38: Gráfico da tensão horizontal em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,25 kN.



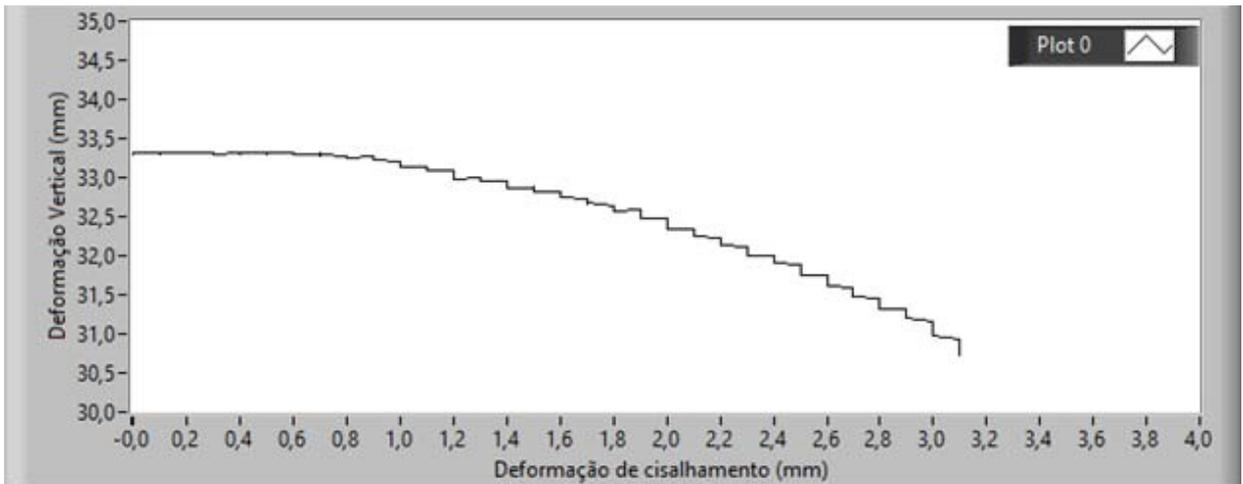
Fonte: O próprio autor.

Através dos resultados desse gráfico é possível calcular o ângulo de atrito para a tensão normal de 0,25 kN, por meio da Equação (7).

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{\tau_f}{\sigma'} = \tan^{-1} \frac{57,5 \frac{kN}{m^2}}{100 \frac{kN}{m^2}} = 29,9^\circ$$

A Figura 39 mostra o gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal. Conforme o deslocamento cisalhante vai aumentando, a amostra vai apresentando redução na sua altura no interior da caixa.

Figura 39: Gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,25 kN.



Fonte: O próprio autor.

- Ensaio para força normal de 0,32 kN.

Cálculo da tensão normal através da Equação (4):

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{0,32 \text{ kN}}{0,0025 \text{ m}^2} = 128 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Após, a amostra foi colocada na caixa e alocada na máquina. No software foram adicionados os dados básicos conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40: Dados básicos do ensaio para força normal de 0,32 kN.

Dados básicos

Lado (m)

Altura (m)

Tensão Vert. (kN/m²)

Velocidade(mm/h)

Pressão cilindro (kPa)

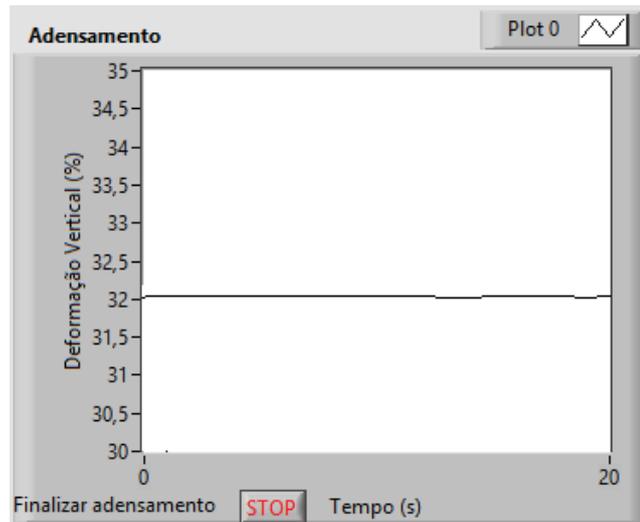
VISA resource name

Encerrar etapa

Fonte: O próprio autor.

Então foi aplicada a tensão normal de 128 kN/m² sobre a amostra e iniciado o adensamento conforme a Figura 41.

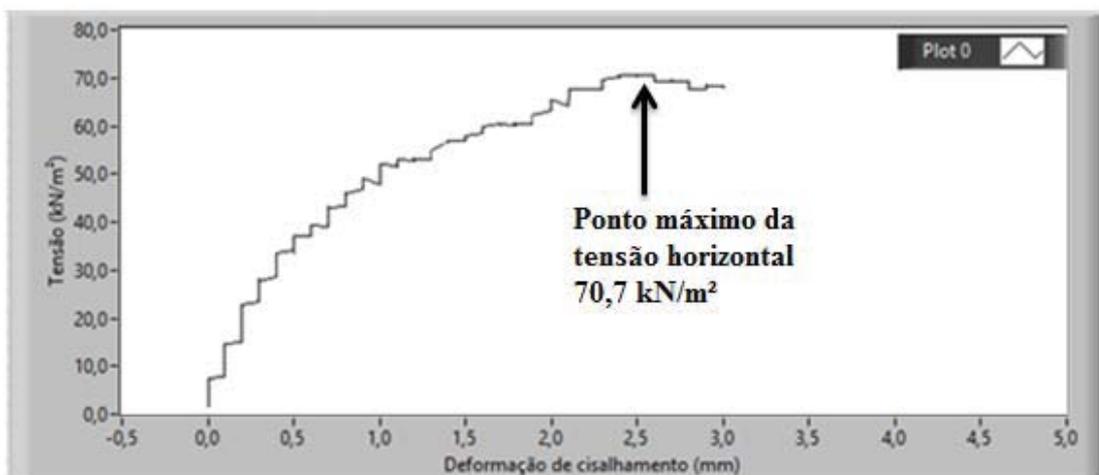
Figura 41: Adensamento do ensaio para força normal de 0,32 kN.



Fonte: O próprio autor.

Como se pode ver, durante o adensamento a amostra permaneceu estabilizada dentro da caixa podendo ser iniciado o ensaio. Na Figura 42 observa-se que a tensão horizontal aumenta com o seu deslocamento, até que a tensão de ruptura seja alcançada, em aproximadamente 2,5 milímetros, com uma tensão cisalhante de 70,7 kN/m². Depois, ela permanece aproximadamente constante para qualquer aumento adicional no deslocamento cisalhante.

Figura 42: Gráfico da tensão horizontal em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,32 kN.



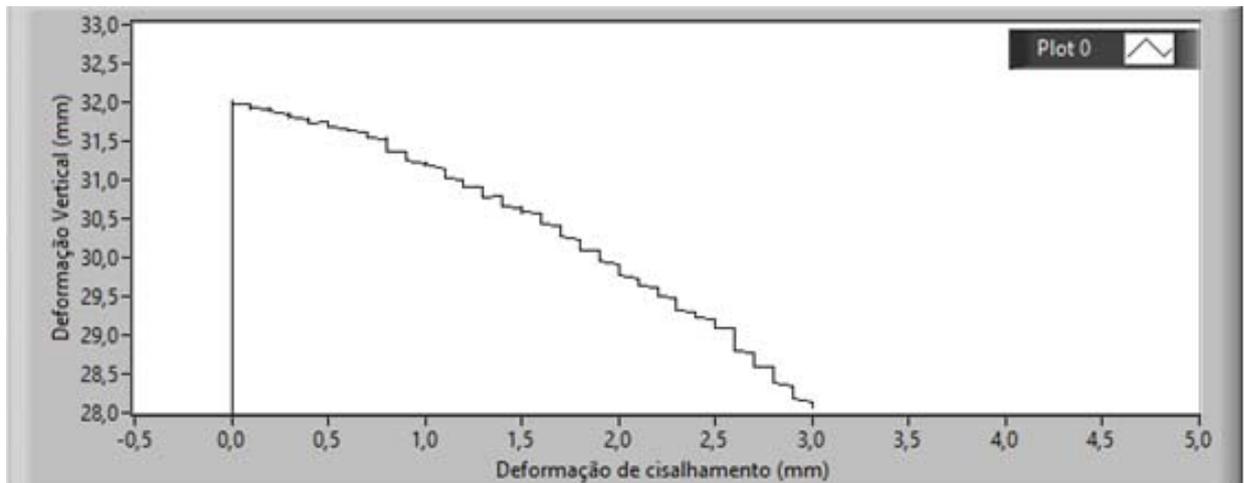
Fonte: O próprio autor.

Através dos resultados desse gráfico é possível calcular o ângulo de atrito para a tensão normal de 0,32 kN, por meio da Equação (7).

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{\tau_f}{\sigma'} = \tan^{-1} \frac{70,7 \frac{kN}{m^2}}{128 \frac{kN}{m^2}} = 28,9^\circ$$

A Figura 43 mostra o gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal. Conforme o deslocamento cisalhante vai aumentando, a amostra vai apresentando redução na sua altura no interior da caixa.

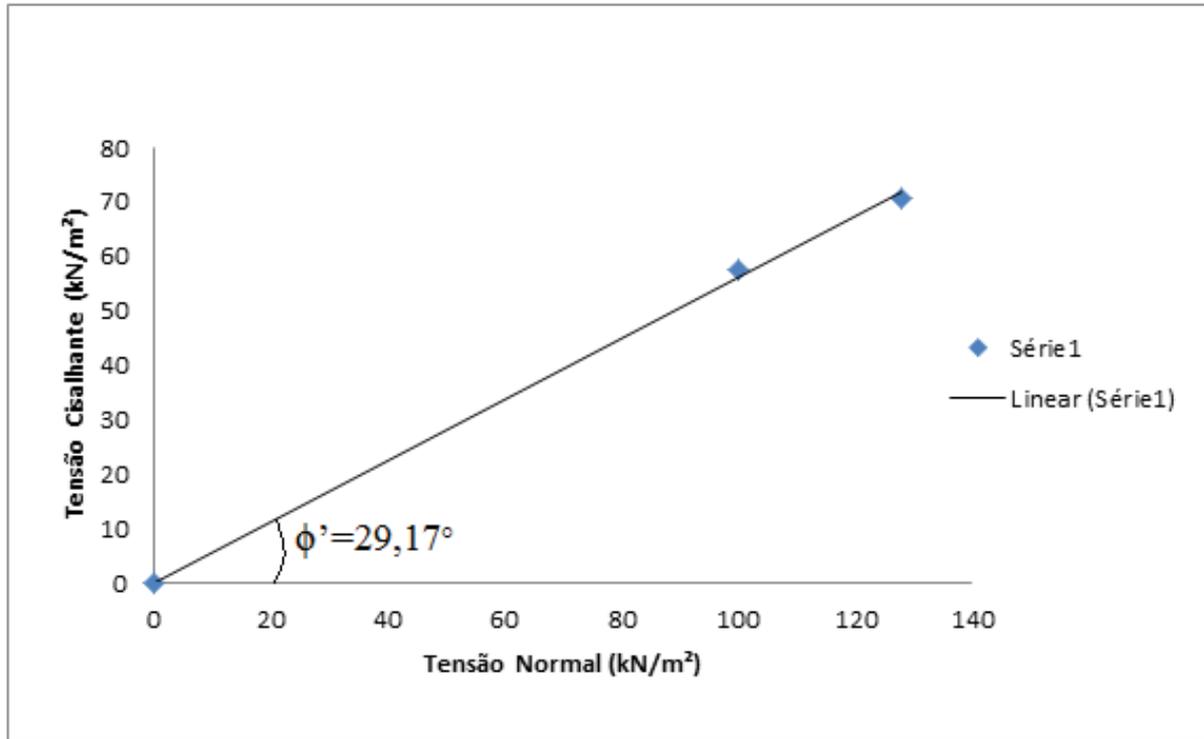
Figura 43: Gráfico do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal para força normal de 0,32 kN.



Fonte: O próprio autor.

Feito isso, para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para a areia ensaiada, devemos traçar o gráfico da tensão cisalhante em relação à tensão normal aplicada sobre a amostra, sabendo que para qualquer tipo de areia o valor da coesão é zero.

Figura 44: Gráfico para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para a areia ensaiada.

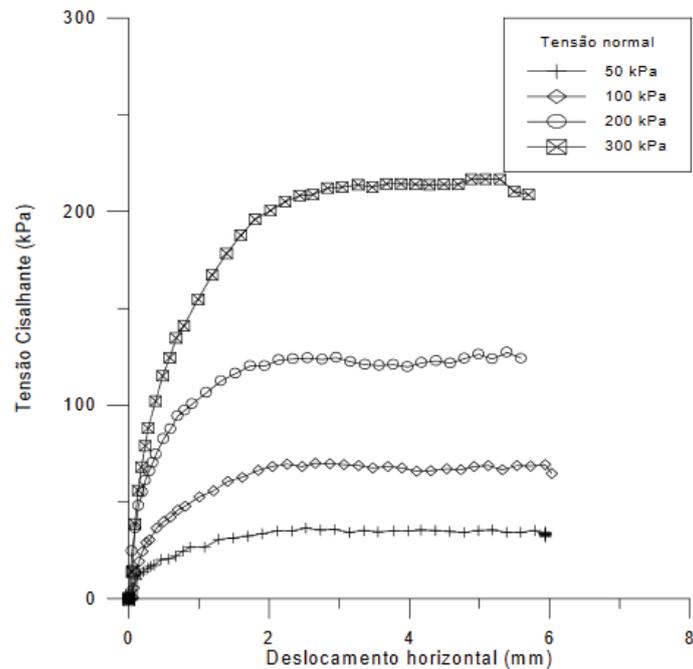


Fonte: O próprio autor.

Através do gráfico da Figura 44 foi possível então calcular o ângulo de atrito interno para o corpo de prova ensaiado. O mesmo resultou no valor de 29,17°.

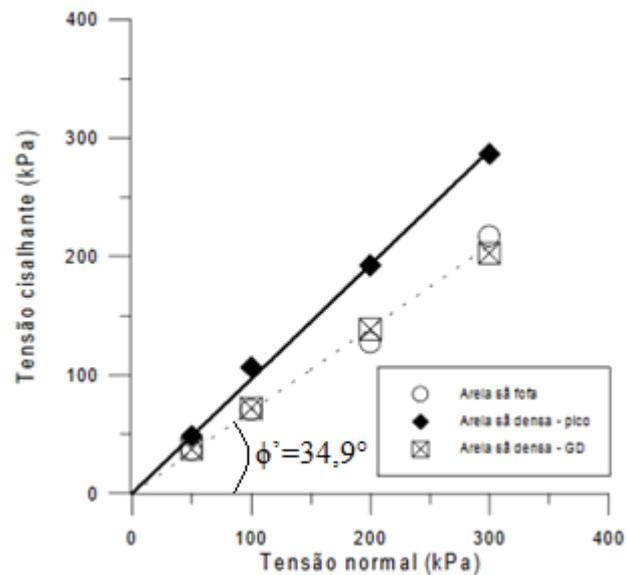
Abaixo estão alguns gráficos retirados de uma dissertação de um aluno de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que mostram um ensaio de cisalhamento direto feito em areia de Osório para poder comparar os resultados.

Figura 45 - Resultado de ensaio de cisalhamento direto em amostras de areia sã fofa seca.



Fonte: Marcon (2005, p. 52).

Figura 46: Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico e a grandes deformações para areia seca.



Fonte: Marcon (2005, p. 74).

Ao comparar o gráfico da Figura 45 com o gráfico da Figura 38 nota-se que o gráfico obtido através do ensaio de cisalhamento direto com a máquina desenvolvida neste projeto está muito parecido com o gráfico obtido na dissertação.

O ângulo de atrito obtido através da envoltória de resistência ao cisalhamento de grandes deformações para areia sã seca, conforme o gráfico da Figura 46 foi de $34,9^\circ$, o qual é muito próximo ao resultado obtido através do gráfico da Figura 44 que foi de $29,17^\circ$, onde o ensaio foi realizado através da máquina do projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Chegando ao final deste trabalho foi possível atender a todos os objetivos que foram propostos inicialmente. Os resultados obtidos através de um ensaio de cisalhamento direto na

máquina desenvolvida no projeto com amostras de areia de Osório foram satisfatórios, quando comparados a um ensaio utilizando o mesmo tipo de corpo de prova sendo feito em uma máquina já existente no mercado.

Foi construído um protótipo em madeira para que fosse possível realizar alguns ensaios e observar seu funcionamento. Com isso, tiveram-se algumas limitações como, por exemplo, o ensaio teve que ser feito com amostras de areia seca e com uma tensão normal não muito elevada, assim, a força horizontal aplicada pelo motor de passo também não foi muito alta, pelo fato de que, com uma força muito alta o motor iria desenvolver um torque muito elevado podendo danificar o protótipo.

Portanto, com esta máquina, então, é possível fazer uma análise prévia do solo, para saber se o mesmo possui resistência necessária para realizar uma obra de Engenharia Civil em um determinado local. Basta ter algumas pequenas amostras do solo onde se deseja realizar a construção, colocar na caixa bipartida horizontalmente e alocar na máquina. Ao ligar a máquina o usuário realiza algumas configurações e inicia o ensaio, todos os seus resultados são mostrados em gráficos gerados pelo software.

REFERÊNCIAS

ATMEL, Corporation. **AVR121: Enhancing ADC Resolution by Oversampling**. Disponível em: <<http://www.atmel.com/Images/doc8003.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017, 15:08:00.

BORGES, Ezequiel. **Ensaio de Cisalhamento Direto**. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/ezequielborges7/ensaio-de-cisalhamento-direto>>. Acesso em: 06 maio 2016, 13:30:00.

BRAMMER. **RA/8100/M/50 Norgren DW-Pneumatikzylinder**. Disponível em: <<http://de.brammer.biz/product/3525768/name/RA-8100-M-50-NORGREN-DW-PNEUMATIKZYLINDER>>. Acesso em: 23 maio 2017, 13:55:00.

CONSTANDINOU, Timothy G. **Tudo Sobre Motores de Passo**. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/step.pdf>. Acesso em: 16 maio 2016, 13:55:00.

CRAIG, R. F. **Craig**: mecânica dos solos. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 2.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEL TORO, Vicent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. São Paulo: Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA, 1994.

DEMARCHI, Prof. **Cópias das Transparências Sobre**: transdutores de posição. Disponível em: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/1088_Capitulo_4_Transdutores.pdf>. Acesso em: 18 maio 2016, 16:49:00.

ELETROSOME. **Getting Started with PL2303 USB to UART Converter**. Disponível em: <<https://electrosome.com/pl2303-usb-to-uart-converter/>>. Acesso em: 18 maio 2017, 14:56:00.

GEFRAN. **PY2 - Apalpador com Ponta de Esfera**. Disponível em: <<http://www.gefran.com/pt/br/products/73-py2-apalpador-com-ponta-de-esfera>>. Acesso em: 08 maio 2017, 10:13:00.

KALATEC, Automação. **Drive de Motor de Passo ST10-PLUS – Applied Motion**. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/drive-de-motor-de-passo-st10s>>. Acesso em: 30 maio 2016, 18:22:00.

KALATEC, Automação. **Fuso de esféras**. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/produtos/fusos-de-esferas>>. Acesso em: 19 junho 2017, 12:41:00.

KALATEC, Automação. **Motor de Passo HT23-400**. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-ht23-400>>. Acesso em: 16 maio 2016, 14:07:00.

KALATEC, Automação. **PEE70T-100-HT23**. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/pee70t-100-ht23>>. Acesso em: 17 maio 2017, 09:23:00.

KALATEC, Automação. **Redutor Planetário Para Servo Motor e Motor de Passo**. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/redutores-de-planetarios>>. Acesso em: 17 maio 2017, 09:04:00.

MARCON, Leandro P. **Estudo Comparativo do Comportamento Mecânico de Duas Areias de Osório-RS**. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

MK, Controle e Instrumentação LTDA. **Célula de Carga**. Disponível em: <http://www.mkcontrole.com.br/ficha_csl_zl.html>. Acesso em: 16 maio 2016, 15:38:00.

MK, Controle e Instrumentação LTDA. **Crítérios para Escolha de uma Célula de Carga**. Disponível em: <<http://www.mkcontrole.com.br/artigos.html>>. Acesso em: 18 maio 2016, 14:40:00.

NORGREN. **50D Pressure Switch**. Disponível em: <http://cdn.norgren.com/pdf/z7074_en_50D_Broch.pdf>. Acesso em: 23 maio 2016, 11:08:00.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORTAL, Célula de Carga. **Definição**. Disponível em: <http://www.celuladecarga.com.br/portal/?page_id=8>. Acesso em: 18 maio 2016, 14:32:00.

SENA, António Sérgio. **Microcontroladores PIC**.

SOLARTRON, Metrology. **Sensor de Deslocamento – Série S**. Disponível em: <<http://www.solartronmetrology.com.br/products/absolute-displacement-transducers-lvdt/displacement-sensor-s.aspx>>. Acesso em: 16 maio 2016, 14:50:00.

TECNOLOG, O Shopping da Automação. **Amplificador para Células de Carga PULS PO-10**. Disponível em: <<http://www.tecnolog.ind.br/forca-ou-peso/384-amplificador-para-celulas-de-carga-puls-po-10.html>>. Acesso em: 16 maio 2016, 16:02:00.