



André Filipe Carvalho do Couto

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com cimento com diferentes teores em água

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil de Construção

Orientadora: Maria Teresa Grilo Santana, Professora Doutora,
Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo
Vogal: Professora Doutora Maria Teresa Grilo Santana



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio, 2018

Propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com cimento com diferentes teores em água

Copyright © André Filipe Carvalho do Couto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, irmã e amigos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Doutora Maria Teresa Santana pela orientação, total disponibilidade, interesse e dedicação demonstrada.

Ao técnico de laboratório Jorge Silvério pelo auxílio na recolha do solo, ajuda prestada durante todos os procedimentos do programa experimental e dedicação infundável, tornando a conclusão deste trabalho possível.

Ao engenheiro Vítor Silva pela prontidão em ajudar-me a qualquer momento com os ensaios de resistência à compressão .

Aos meus pais, porque foram eles quem tornaram tudo isto possível.

Aos meus amigos, aqueles que estiveram presentes durante tudo este percurso.

A persistência é o caminho do êxito.
"Charles Chaplin"

RESUMO

A presente dissertação visa dar um contributo para o melhor conhecimento das propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com cimento, uma vez que não existem metodologias de dosagem em projeto para a sua aplicação, por exemplo em pavimentos rodoviários.

São estudadas misturas com percentagens de cimento de 4% de 6% e 10%, mas com diferentes teores em água e com o mesmo peso volúmico seco, de forma a perceber a influência do teor em água no comportamento mecânico das misturas. O trabalho vem na sequência de estudos anteriores realizados na FCT/UNL, sobre o mesmo solo, com diferentes pesos volúmicos secos, mas mantendo o teor em água. No presente trabalho é analisada a influência de parâmetros, tais como o teor em cimento, o teor em água, a porosidade, a relação água/cimento, a relação volume de vazios/volume de cimento e a relação n/Civ , que relaciona a porosidade com a razão entre a quantidade de cimento e o volume total do provete estudado. Foram ensaiados provetes à resistência à compressão uniaxial com medição de deformações axiais. O indicador n/Civ^p parece ser aplicável só aos solos estudados, não permitindo qualquer comparação. Com base na análise de resultados de resistência e deformabilidade obtidos é possível propor um método de dosagem do cimento a adotar no campo, com base em ensaios de compactação do solo utilizado. Os resultados obtidos são correlacionados com outros estudos.

Palavras-chave: Solo ligado com cimento, Teor em água, Lado seco, Lado húmido, Resistência à compressão uniaxial, Deformabilidade

ABSTRACT

The present dissertation aims to contribute for the better understanding of the mechanical behaviour of mixtures between soil and cement, given that there are no dosing methods for its use, for example, in road pavements.

Mixtures with cement percentages of 4%, 6% and 10%, but with the different water content and with the same dry density are studied in order to understand its influence on the mixtures's mechanical behaviour. The thesis comes in the wake of previous studies done on the same soil, with different dry density and by keeping the water content. In the present project, other parameters are taken in consideration, such as cement amount, water content, porosity, the water/cement ratio, the void volume/cement volume ratio and the n/Civ ratio when it comes to its influence on the matter. The samples were tested on its resistance to uniaxial compression with measuring of the axial deformations. The n/Civ^p indicator seems usable only on the soils used, thus being incomparable. Based on the results from resistance and deformability obtained it is possible to present a cement dosing method in the field, based on the soil compacting studies. The results obtained are in correlation with other studies.

Keywords: Soil-cement, Moisture content, Dry side, Wet side, Unconfined compression tests

ÍNDICE

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Símbolos	xxi
Lista de Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização	2
2 Solo Ligado com Cimento	5
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Definição do Tipo de Mistura Estudada	6
2.3 Materiais Utilizados nas Misturas	6
2.3.1 Solo	6
2.3.2 Cimento	8
2.3.3 Água	9
2.4 Dosagem de Misturas de Solo Ligado com Cimento	9
2.5 Características Comportamentais das Misturas	9
2.5.1 Efeito do Cimento	9
2.5.2 Efeito do Teor em água	10
2.5.3 Razão Água/Cimento, a/c	13
2.5.4 Razão Volume de Vazios/Volume de cimento, V_v/V_c	16
2.5.5 Razão Porosidade/Índice Volumétrico de Cimento, n/Civ	20
2.5.6 Abordagem Crítica	22
2.6 Investigação no Departamento de Engenharia Civil	23
2.6.1 Estudos Anteriores	23
2.6.2 Estabelecimento de Dosagens	24
3 Estudo Experimental	29
3.1 Considerações Iniciais	29

3.2	Materiais Utilizados	29
3.2.1	Solo e sua Caracterização Física	29
3.2.2	Cimento	33
3.2.3	Água	33
3.3	Ensaio de Compactação	33
3.3.1	Compactação Proctor do Solo - Calibração do Compactador Marshall	33
3.3.2	Compactação Proctor do Solo Ligado com Cimento	36
3.4	Moldagem dos Provetes	37
3.4.1	Pontos de Moldagem	37
3.4.2	Procedimento	38
3.4.3	Cura	42
3.5	Resistência à Compressão Uniaxial	43
3.5.1	Realização do Ensaio	43
3.5.2	Módulo de Elasticidade	46
3.5.3	Aceitação dos Provetes	47
4	Análise de resultados	49
4.1	Considerações Iniciais	49
4.2	Características Mecânicas	49
4.2.1	Resistência à Compressão Uniaxial	49
4.2.2	Módulo de Elasticidade, E30	53
4.3	Fatores que Influenciam a Resistência Mecânica	56
4.3.1	Teor em Água	56
4.3.2	Porosidade	56
4.3.3	Razão entre Água e Cimento, a/c	57
4.3.4	Volume de Vazios/Volume de cimento, V_v/V_{ci}	59
4.3.5	Índice Volumétrico de Cimento	61
4.4	Estabelecimento de Dosagens	63
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	65
5.1	Conclusões	65
5.2	Desenvolvimentos Futuros	66
	Bibliografia	69
	A Tabelas	75
	B Gráficos	91
	I Fórmulas	95
	II Deduções	97

LISTA DE FIGURAS

2.1 Granulometria de solos adequados para a estabilização com cimento, adaptado de Pisarczyk (2005)	8
2.2 Efeito do cimento na resistência à compressão uniaxial	10
2.3 Influência da adição de cimento no $\gamma_d \text{ máx}$ e do $\omega_{\acute{o}tm}$	11
2.4 Efeito do teor em água na resistência à compressão	12
2.5 Exemplo do comportamento da curva Proctor com a diminuição da energia de compactação	13
2.6 Efeito da razão a/c	14
2.7 Efeito da razão a/c, (Nusit et al., (2017))	15
2.8 Efeito da razão a/c, (Ikhlef et al., (2015))	15
2.9 Efeito da razão a/c	15
2.10 Correlação entre resistência à compressão uniaxial e V_v/V_c	16
2.11 Efeito da razão V_v/V_c , (Foppa, (2015))	17
2.12 Efeito da razão V_v/V_c , (Vitali, (2008))	17
2.13 Efeito da razão V_v/V_c , (Rios, (2011))	18
2.14 Efeito da razão V_v/V_c , (Consoli et al., (2010))	18
2.15 Efeito da razão V_v/V_c , (Consoli et al., (2011))	19
2.16 Efeito razão V_v/V_c , todos os autores analisados	20
2.17 Exemplo de uma curva $R_c/n/Civ^p$	21
2.18 Análise Granulométrica - Gonçalves (2016) e Matos (2017)	23
2.19 Relação $R_c/n/Civ^p$ de Gonçalves (2016) e Matos (2017)	25
2.20 Estabelecimento de dosagens	26
2.21 Relação $R_c/n/Civ^p$ de Gonçalves (2016) e de Matos (2017)	27
2.22 Valores de peso volúmico seco e percentagem de cimento para p de 0,18	27
3.1 Localização geográfica do solo utilizado no presente trabalho	30
3.2 Armazenamento do solo recolhido	31
3.3 Peneiros e análise granulométrica	31
3.4 Análise granulométrica do presente trabalho	32
3.5 Curvas Proctor de Matos (2017)	34
3.6 Curvas Proctor de Matos (2017) e compactação leve do presente trabalho	35
3.7 Esquema da compactação pesada e compactação mecânica	35

3.8	Curva Proctor pesado de Matos (2017) e curvas Proctor de 4%, 6% e 10%	36
3.9	Localização dos pontos de moldagem	38
3.10	Esquema da altura das camadas	39
3.11	Medição da altura das camadas dos provetes	39
3.12	Provete depois de compactado	39
3.13	Diagrama das massas dos componentes da mistura	40
3.14	Armazenamento e identificação dos provetes	42
3.15	Condições de cura dos provetes	42
3.16	Medição da altura e diâmetro dos provetes	43
3.17	Prensa Zwick	44
3.18	Exemplo de uma curva tensão/deslocamento	45
3.19	Exemplo do módulo de elasticidade	46
3.20	Pontos de Moldados após 7 dias de Cura	48
4.1	Tensão/extensão dos provetes	51
4.2	Tensão/extensão dos provetes consoante o teor em água	52
4.3	Resistência à compressão/percentagem de cimento dos provetes	53
4.4	Resistência à compressão uniaxial/módulo de elasticidade	54
4.5	Módulo de elasticidade/percentagem de cimento	55
4.6	Resistência à compressão uniaxial/teor em água/	56
4.7	Resistência à compressão uniaxial/porosidade	57
4.8	Resistência à compressão uniaxial/ a/c	58
4.9	Módulo de elasticidade/ a/c	58
4.10	Resistência à compressão uniaxial/ a/c, Matos (2017), Gonçalves (2016) e presente trabalho	59
4.11	Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c	60
4.12	Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c , Matos (2017), Gonçalves (2016) e presente trabalho	60
4.13	Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c , comparação	61
4.14	Resistência à compressão uniaxial/ $\frac{n}{Civ^1}$	62
4.15	Resistência à compressão uniaxial/ $\frac{n}{Civ^{0,18}}$	62
4.16	Estabelecimento de dosagens	64
B.1	Tensão/extensão dos provetes com 0% de cimento	91
B.2	Tensão/extensão dos provetes com 4% de cimento	92
B.3	Tensão/extensão dos provetes com 6% de cimento	92
B.4	Tensão/extensão dos provetes com 10% de cimento	93

LISTA DE TABELAS

2.1	Especificações que o solo deve cumprir segundo as Estradas de Portugal (2009)	7
2.2	Características granulométricas segundo ATIC (1993)	7
2.3	Propriedades granulométricas dos autores	19
2.4	Expressões de $R_c = A \times (Civ^p)^B$ dos estudos analisados	21
2.5	Valores de γ_d e ω_{opt} de Gonçalves (2016) e Matos (2017)	24
2.6	Pontos Moldados por Gonçalves (2016) e Matos (2017)	24
2.7	Dados dos pontos de 10%, 6% e 4% de cimento analisados	28
3.1	Resumo da análise granulométrica	31
3.2	Classificação do solo e limites de consistência	33
3.3	Valores de γ_d e ω_{opt} das misturas com 4%, 6% e 10%	37
3.4	γ_d e ω dos pontos moldados	37
3.5	Componentes da mistura	41
3.6	Dosagens da mistura	41
3.7	Propriedades dos provetes depois da cura	47
4.1	Resistência à compressão simples dos provetes	50
4.2	Módulo de elasticidade dos provetes	54
A.1	Análise Granulométrica	75
A.2	Proctor Leve - 1	76
A.3	Proctor Leve - 2	76
A.4	Proctor Pesado 4% - 1	77
A.5	Proctor Pesado 4% - 2	77
A.6	Proctor Pesado 6% - 1	78
A.7	Proctor Pesado 6% - 2	78
A.8	Proctor Pesado 10% - 1	79
A.9	Proctor Pesado 10% - 2	79
A.10	Medições dos provetes com 0% de cimento	80
A.11	Medições dos provetes com 4% de cimento	80
A.12	Medições dos provetes com 6% de cimento	81
A.13	Medições dos provetes com 10% de cimento	81
A.14	Peso, diâmetro médio e altura média dos provetes depois da cura	82

A.15 Características dos provetes 0c13,5w	83
A.16 Características dos provetes 0c17,5w	83
A.17 Características dos provetes 4c13,5w	84
A.18 Características dos provetes 4c17,5w	84
A.19 Características dos provetes 6c13,5w	85
A.20 Características dos provetes 6c17,5w	85
A.21 Características dos provetes 10c13,5w	86
A.22 Características dos provetes 10c17,5w	86
A.23 Propriedades dos provetes depois da cura	87
A.24 Porosidade alvo	87
A.25 Valores da porosidade dos provetes	88
A.26 Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^P dos provetes com 4% de cimento	88
A.27 Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^P dos provetes com 6% de cimento	89
A.28 Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^P dos provetes com 10% de cimento	89

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Quantidade de água.
A	Área da base dos provetes.
$A_{média}$	Área média da base dos provetes.
c	Quantidade de cimento.
Civ	Índice volumétrico de cimento.
C_c	Coefficiente de curvatura.
C_u	Coefficiente de uniformidade.
D_{10}	Dimensão do peneiro onde passam 10% do material.
D_{30}	Dimensão do peneiro onde passam 30% do material.
D_{50}	Dimensão do peneiro onde passam 50% do material.
D_{60}	Dimensão do peneiro onde passam 60% do material.
D_{medio}	Diâmetro médio.
$D_{máx}$	Diâmetro máximo.
e	Índice de vazios.
E	Módulo de elasticidade.
E_{medio}	Módulo de elasticidade médio.
ϵ	Extensão.
$\epsilon_{0,3F_{máx}}$	Extensão do provete correspondente a 30 % da força máxima exercida.
F	Força exercida sobre os provetes.
$F_{máx}$	Força máxima exercida sobre os provetes.
G	Densidade das partículas sólidas.
G_c	Densidade das partículas sólidas do cimento.
G_m	Densidade média das partículas sólidas.
G_s	Densidade das partículas sólidas do solo.

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Peso volúmico.
$\gamma_{pós\ cura}$	Peso volúmico dos provetes depois dos 7 dias de cura.
γ_d	Peso volúmico seco.
$h_{média}$	Altura média.
I_p	Índice de plasticidade.
$I_p^{máx}$	Índice de plasticidade máximo.
n	Porosidade.
ω	Teor em água.
$\omega_{natural}$	Teor em água natural.
ω_{opt}	Teor em água ótimo.
p	Expoente do índice volumétrico de cimento.
$\%_s$	Percentagem de solo.
$\%_{ci}$	Percentagem de cimento.
q_u	Resistência à compressão uniaxial.
R^2	Coeficiente de determinação.
$R_c\ média$	Resistência à compressão uniaxial média.
R_t	Resistência à tração.
R_c	Resistência à compressão uniaxial.
σ	Tensão.
V	Volume.
V_{Total}	Volume total do provete.
V_c	Volume de cimento.
V_v	Volume de vazios.
W	Massa.
$W_{água}$	Massa de água.
$W_{água\ natural}$	Massa da água natural.
W_{ci}	Massa de cimento.

$W_{pós\ cura}$	Massa do provete depois do tempo de cura.
$W_{sólido}$	Massa de sólido.
W_{solo}	Massa de solo.
$W_{solo\ a\ pesar}$	Massa da solo a pesar.
$W_{solo\ seco}$	Massa de solo seco.
W_{Total}	Massa total da mistura.
w_L	Limite de liquidez.
w_p	Limite de plasticidade.

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	American Society for Testing Materials.
ATIC	Associação Técnica da Indústria do Cimento.
CEN	Comité Europeu de Normalização.
CL	Areia de baixa plasticidade.
DEC	Departamento de Engenharia Civil.
EN	European Standard.
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
IP	Índice de Plasticidade.
IPQ	Instituto Português de Qualidade.
LH	Linha horizontal.
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
LNEC E	LNEC Especificação.
LV	Linha vertical.
NP	Norma Portuguesa.
PCA	Portland Cement Association.
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial.
SW	Areia bem graduada.

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O uso de cimento torna-se uma estratégia de tratamento do solo local, com variadas aplicações, como é o caso das bases do pavimento, da proteção de declives, barragens de terra, de camadas base de fundações superficiais e ainda a prevenção da liquefação.

Em geral, um solo ligado com cimento, aumenta a sua durabilidade e resistência aos agentes climáticos, assim como garante a proteção do ambiente e a economia de energia, Cunha (2014). Contudo, o projeto destas obras é feito de forma predominantemente empírica não havendo um método objetivo para o estabelecimento de dosagens dos componentes, ao contrário do que acontece com o betão, onde a relação água/cimento desempenha um papel fundamental na obtenção da resistência pretendida.

Para o estabelecimento de dosagens pode ser necessário realizar uma grande quantidade de ensaios de forma a determinar a percentagem de cimento que dita determinada resistência à compressão simples ou o conjunto da resistência à tração, módulo de elasticidade. Como tal, têm existido tentativas de estabelecer novos métodos com o intuito de reduzir o tempo e assim facilitar o processo de obtenção das dosagens. Alguns métodos desenvolvidos, baseiam-se na relação entre a resistência à compressão uniaxial aos 7 ou aos 28 dias, em relação água/cimento ou a razão entre o volume de vazios do provete e o volume de cimento.

Uma nova abordagem foi apresentada por Foppa (2005), que consiste na utilização de um parâmetro que relaciona a porosidade e o índice volumétrico de cimento, n/Civ . No Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, FCT/UNL, autores como Gonçalves (2016) e Matos (2017) estudaram este parâmetro em dissertação de mestrado.

O presente trabalho pretende dar continuidade aos trabalhos referidos, na procura

de métodos simplificados para o estabelecimento de dosagens. Para o efeito é utilizado o mesmo solo das dissertações referidas e percentagens de cimento idênticas, mas enquanto que os trabalhos anteriores utilizaram o mesmo teor em água de compactação, variando o peso volúmico seco de todas as misturas, este trabalho propões-se variar o teor em água e manter o peso volúmico das misturas realizadas.

De realçar ainda que o material estudado neste trabalho é designado por solo ligado com cimento, segundo a norma NP EN 14 227-10 (2013) – *Misturas tratadas com ligantes hidráulicos. Especificações. Parte 10: Solo tratado com cimento.*

1.2 Objetivos

No contexto definido, os principais objetivos deste trabalho são:

- Analisar e comparar os métodos de preparação de provetes de solo ligado com cimento com recurso ao compactador Marshall.
- Analisar a influência de diferentes parâmetros nas características mecânicas de resistência e deformabilidade de misturas ligadas com cimento;
- Avaliar a viabilidade de correlações obtidas para o estabelecimento de dosagens de solo ligado com cimento, designadamente de curvas baseadas no índice n/Civ^p .

1.3 Organização

Esta dissertação é organizada em cinco capítulos, dois apêndices e dois anexos.

No primeiro capítulo, que coincide com o presente capítulo é realizada uma breve explicação e contextualização do tema abordado neste trabalho, são indicados os seus objetivos e por fim é apresentada a estrutura do presente trabalho.

O segundo capítulo é reservado à caracterização das misturas de solo ligado com cimento estudada no âmbito deste trabalho, nomeadamente os seus componentes, referindo alguns métodos de dosagem. É ainda feita uma análise aos trabalhos realizados anteriormente, por outros autores além dos das dissertações antes mencionadas. O capítulo termina com a apresentação dos trabalhos realizados neste âmbito, realizados no Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL.

No terceiro capítulo é dado a conhecer o programa experimental da presente dissertação. Começando por identificar e caracterizar os equipamentos utilizados para a compactação dos provetes, nomeadamente o compactador Marshall. De seguida são definidos as características dos provetes a moldar, definidas por pontos de moldagem nas curvas compactação. Finalmente, neste capítulo, são referidos os procedimentos para a obtenção das características mecânicas dos provetes.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios referidos no parágrafo anterior, relacionando-os com os diferentes parâmetros

referidos no Capítulo 2. O capítulo termina com propostas para o estabelecimento de dosagens.

No capítulo cinco são expostas as principais conclusões do trabalho. Por fim são sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros.

No final são apresentados dois apêndices, um direcionado para as tabelas e outro para os gráficos.

Os anexos contêm todas as fórmulas e deduções que foram necessárias para a realização da presente dissertação.

SOLO LIGADO COM CIMENTO

2.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo tem como principal objetivo definir o tipo de mistura estudada na presente dissertação, assim como dar a conhecer alguns dos trabalhos desenvolvidos no âmbito da temática dos solos ligados com cimento. Para o efeito, este capítulo está organizado em seis partes. Em primeiro lugar, é definida a denominação do tipo de mistura estudada no presente trabalho e inumeradas as suas aplicações. É apresentada a discretização do solo, cimento e água adequados a misturas de solo ligado com cimento, com base nas normas e na pesquisa bibliográfica. São ainda apresentadas as formas de dosagem para obtenção das quantidades de cada componente da mistura. Os parâmetros que influenciam o comportamento das misturas de solo ligado com cimento são variados, como tal, neste capítulo é analisado o efeito da adição de cimento às misturas, tanto em termos de resistência à compressão como em relação ao peso volúmico seco máximo e teor em água ótimo. É investigado o comportamento das misturas com diferentes teores em água consoante as percentagens de cimento utilizadas e resistências à compressão uniaxial alcançadas. A razão entre a quantidade de água e cimento também foi alvo de estudo, de modo a perceber a sua viabilidade como método de dosagem. São ainda apresentadas outras duas formas de determinação de quantidades, são elas a razão entre o volume de vazios e o volume de cimento, V_v/V_c e a razão entre a porosidade e o parâmetro $Civ, n/Civ$. Por fim é apresentada a investigação realizada por Matos (2017) e Gonçalves (2016) no DEC da FCT/UNL.

2.2 Definição do Tipo de Mistura Estudada

No caso do presente trabalho, será adotada a designação descrita na norma NP EN 14 227-10 (2013) – *Misturas tratadas com ligantes hidráulicos. Especificações. Parte 10: Solo tratado com cimento*, onde especifica os solos tratados com cimento, solos estes que serão posteriormente utilizados para diversas aplicações, como por exemplo em pavimentos de estradas, pavimentos de aeródromos, de zonas de circulação no geral, e ainda especifica os requisitos quanto aos seus constituintes, à sua composição e à sua classificação de desempenho laboratorial. Segundo a norma, os solos tratados com cimento dividem-se em dois grupos: os solos estabilizados com cimento ou solos ligados com cimento, em que o aspeto que os distingue é o ensaio a que se destinam. Sendo assim, o presente estudo trata de um solo ligado com cimento por ser uma mistura de solo ou de agregados, com cimento como ligante, formulada para atingir uma estabilidade estrutural medida diretamente pela resistência à compressão simples ou pelo conjunto da resistência à tração e do módulo de elasticidade. É necessário, segundo a norma, definir os constituintes e a mistura, pois cada parâmetro segue uma norma específica.

Existem variadas denominações para a mistura que resulta da adição de cimento ao solo encontradas na literatura. Termos como solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado são alguns dos exemplos, como tal, o presente trabalho assume a designação de solo tratado com cimento para todos trabalhos realizados fora do Departamento de Engenharia Civil. De uma forma geral, os processos são os mesmo, isto é, a introdução e mistura do cimento com o solo e posterior adição de água para a obtenção de propriedades como resistência à compressão adequadas a uma certa utilidade na engenharia, sendo que o critério para a adoção de uma ou outra designação é o grau de modificação e alteração das propriedades do solo natural em relação com as quantidades de cimento adicionado.

2.3 Materiais Utilizados nas Misturas

2.3.1 Solo

Consoante a futura aplicação das misturas de solo ligado com cimento, existem normas específicas que apresentam parâmetros que se devem respeitar quanto à escolha do solo a ser empregue. A maioria das normas utiliza uma classificação dos solos baseada na sua granulometria e limites de Atterberg, dando elevada relevância à percentagem de finos e às dimensões máximas das partículas.

O único requisito exigido pela norma NP EN 14 227-10 (2013), em relação ao solo é que pelo menos 95% do solo deve passar no peneiro de 63mm quando ensaiado pelo método de peneiração húmida, efetuado em conformidade com a norma EN 933-1 - *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração* e quando aplicável, o solo deve garantir as exigências de classificação de

homogeneidade dos regulamentos em vigor no local de aplicação.

A especificação LNEC E 243 (1971) - *Solos. Solo - cimento*, tem como objectivo descrever quais as características dos solos apropriados para serem utilizados na construção de sub-bases e bases de solo-cimento para pavimentação de estradas. Segundo a norma, os solos não devem conter qualquer substância prejudicial para o cimento como por exemplo raízes ou capim, poderão no máximo conter 2% de matéria orgânica. As partículas de solo no máximo poderão ter 75mm. É recomendado que a percentagem de solo que passa no peneiro de 4,75mm (nº4) ASTM seja igual ou superior a 45%, a percentagem que passa no peneiro 50mm ASTM deverá ser igual ou superior 80% e ainda que o limite de liquidez seja menor ou igual a 45%.

As recomendações da instituição nacional, Estradas de Portugal, S.A. EP (2009), declara que o solo a ser tratado com cimento deverá satisfazer as características expostas na figura 2.1.

Tabela 2.1: Especificações que o solo deve cumprir segundo as Estradas de Portugal (2009)

	$D_{m\acute{a}x}(mm)$	% material passado no peneiro # 200 (%)	$I_p^{m\acute{a}x}$ (%)
Misturado em central	50	35	12
Misturado "in situ"	100	-	12

A *Portland Cement Association, PCA*, (1971) segundo a sua experiência, define que os solos mais indicados para o tratamento com cimento são os materiais bem graduados. Posto isto, o solo deve conter no mínimo 55% de material com dimensões inferiores a 4,75mm, no mínimo 35% menor que 2,00mm e conter no mínimo 25% de material entre os 0,075mm e 2,00mm.

Por fim, segundo a Associação Técnica da Indústria do Cimento, ATIC (1993), todos os solos podem ser tratados, visto que não é difícil de se enquadrarem nas recomendações por eles definidas, tabela 2.2. Define ainda que o limite de liquidez, deve ser menor ou igual a 40% e o índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Tabela 2.2: Características granulométricas segundo ATIC (1993)

Peneiro	nº3	nº4	nº40	nº200
Material Passado (%)	100	50-100	15-100	0-50

A pesquisa bibliográfica não ofereceu informação relevante em relação a que solos são adequados a este tipo de estudo, no entanto, alguns autores acreditam que qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento embora que para solos arenosos se note uma maior eficiência, devido à facilidade de mistura e pelas maiores resistências obtidas. É constatado que os resultados finais das misturas de solo ligado com cimento dependem maioritariamente do tipo de solo misturado. De acordo com Felt (1955), a composição química do solo compromete as propriedades e reações do cimento.

Segundo Pisarczyk (2005), os solos com as curvas granulométricas compreendidas na zona a vermelha da figura 2.1 são adequados a este tipo de tratamento.

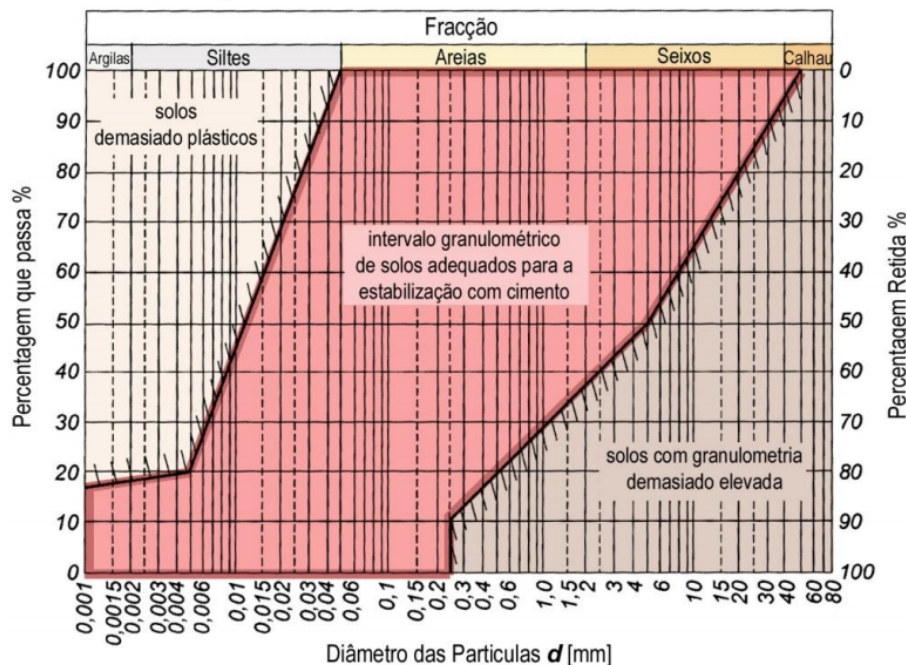


Figura 2.1: Granulometria de solos adequados para a estabilização com cimento, adaptado de Pisarczyk (2005)

Os melhores resultados do tratamento de solos com cimento obtêm-se, quando a distribuição granulométrica do solo é aproximada da distribuição granulométrica da mistura ótima de argila-areia ou areia-cascalho. Além disso, os solos adequados para a estabilização com cimento devem ter um limite de liquidez $w_L < 40\%$ e um índice de plasticidade IP na faixa de 0-15%.

Solos com $pH < 4,5$ não se adequam para a estabilização com cimento. O teor de poluentes orgânicos no solo não pode exceder 2%, enquanto o teor de sulfato (SO_4) ou os sais solúveis não podem exceder 1%. O conteúdo de matéria orgânica $> 2\%$ origina a degradação dos parâmetros de resistência e para valores de sulfato superior a 2% a estabilização não é aconselhável, Wilun (2007).

2.3.2 Cimento

A NP EN 14 227-10 (2013) define que o ligante deve ser um cimento conforme a EN 197-1 (2012) - *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, que apenas estipula as especificações do cimento e seus constituintes. Não sendo definidas quaisquer percentagens de cimento a utilizar para as misturas de solo ligado com cimento.

Não existem restrições quanto ao tipo de cimento a utilizar no tratamento de solos, no entanto o cimento Portland tem sido o mais recorrido.

Quanto à quantidade de cimento a misturar com solo, calculadas em relação ao peso seco do solo, não são definidas explicitamente, contudo tipicamente são utilizadas em prática percentagens entre 3% e 10%.

2.3.3 Água

Em relação à água de amassadura, a norma NP EN 14 227-10 (2013) remete para a EN 1008 (2005). Contudo o uso de água potável é considerado adequado para a sua empregabilidade em misturas de solo ligado com cimento, Foppa (2005).

2.4 Dosagem de Misturas de Solo Ligado com Cimento

A dosagem de misturas de solo ligado com cimento visa definir a quantidade de cimento a misturar com o solo que fornecerá a resistência e consequente durabilidade adequada ao uso que o material se destina. A resistência é definida pela resistência à compressão uniaxial, R_c , de provetes cilíndricos ensaiados ao fim de 7 dias após a compactação.

A *American Society for Testing and Materials, ASTM* (1944), elaborou métodos de ensaio baseados nos primeiros estudos sobre a técnica. Desde então, têm sido aperfeiçoados e outros surgiram, todos baseados no método da *Portland Cement Association*, aceite pela *ASTM*.

Atualmente os métodos usuais de dosagem do solo ligado com cimento consistem na elaboração de um conjunto de ensaios laboratoriais de forma a apurar as quantidades de cimento ideais. São processos demorosos e que necessitam de equipamento e pessoal treinado.

No sentido de encurtar o tempo de determinação das dosagens apropriadas surgiu o estudo da viabilidade de novos métodos de dosagem. A razão entre a quantidade de água e a quantidade de cimento, a/c , é um dos métodos analisados, assim como a investigação da razão entre o volume de vazios e o volume de cimento, V_v/V_c . Foppa (2005) propôs uma forma mais expedita de se conseguir obter a quantidade de cimento, diminuindo a quantidade de ensaios necessários o que por sua vez leva à redução do tempo requerido para a determinação do teor de cimento. O que o autor sugere é a utilização de um índice volumétrico de cimento, C_{iv} , que será explicado nos próximos capítulos.

2.5 Características Comportamentais das Misturas

2.5.1 Efeito do Cimento

São inúmeros os trabalhos que se dedicaram ao estudo de misturas de solo tratado com cimento. Todos eles demonstraram que a adição de cimento provoca uma melhoria da resistência à compressão uniaxial da mistura.

Na figura 2.2 estão representadas retas que definem o comportamento do solo com a adição de cimento ao fim de 7 dias que alguns autores estudaram. Cada um dos pontos foi retirado dos artigos dos respectivos autores recorrendo ao programa *PlotDigitizer*, viabilizando a construção do gráfico.

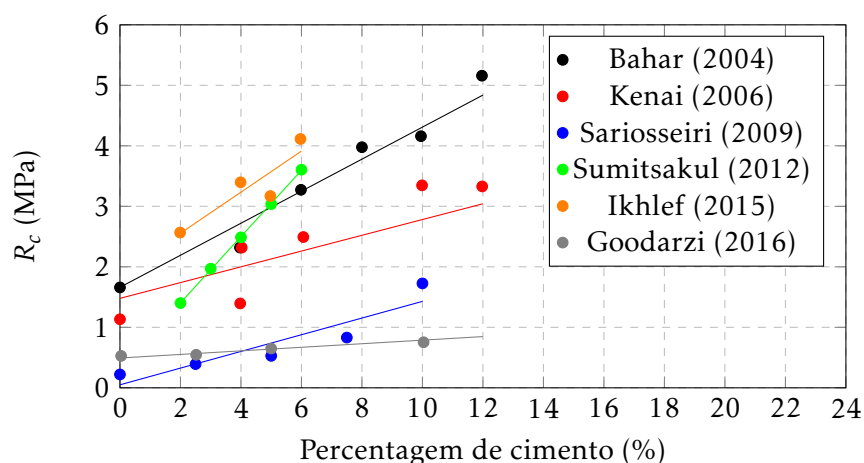


Figura 2.2: Efeito do cimento na resistência à compressão uniaxial

É facilmente perceptível que independentemente de se saber qual o tipo de solo, cimento ou água utilizada, o efeito que o cimento tem na mistura é o aumento da resistência à compressão uniaxial.

Os resultados de ensaios de compactação de outro conjunto de autores, Pereira (2009), Pereira (2010), Goodarzi et al. (2016), Mohamedzein e Al-Rawas (2011) e Ikhlef et al. (2015) quanto à relação do peso volúmico seco e do teor em água ótimo com as respectivas percentagens de cimento foram compilados na figura 2.3, mais uma vez recorrendo ao programa *PlotDigitizer* para a extração da informação. Para cada autor está representado um único tipo de solo. De uma forma geral, e comparando todo o conjunto de resultados, maiores valores de peso volúmico seco deram origem a teores em água ótimos mais baixos.

No entanto, analisando cada um dos estudos não é possível concluir qual a influência da percentagem de cimento nos parâmetros analisados. Apenas Ikhlef et al. (2015) apresenta este estudo e constata que a adição de cimento aumenta o teor em água ótimo e diminui o peso volúmico seco máximo.

2.5.2 Efeito do Teor em água

O teor em água é definido como a percentagem de quantidade de água existente na mistura em relação à soma da quantidade de solo seco e cimento.

O efeito do teor em água na resistência à compressão dos estudos de Bahar et al. (2004), Rios (2011), Vitali (2008), Foppa (2005) e Nusit et al. (2017) são apresentados de seguida. Os gráficos foram obtidos recorrendo novamente ao programa *PlotDigitizer*, à exceção do gráfico (c) onde foram utilizadas as expressões das curvas do estudo, foi ainda adicionada a informação do teor em água ótimo dos solos analisados. Portanto, os gráficos foram

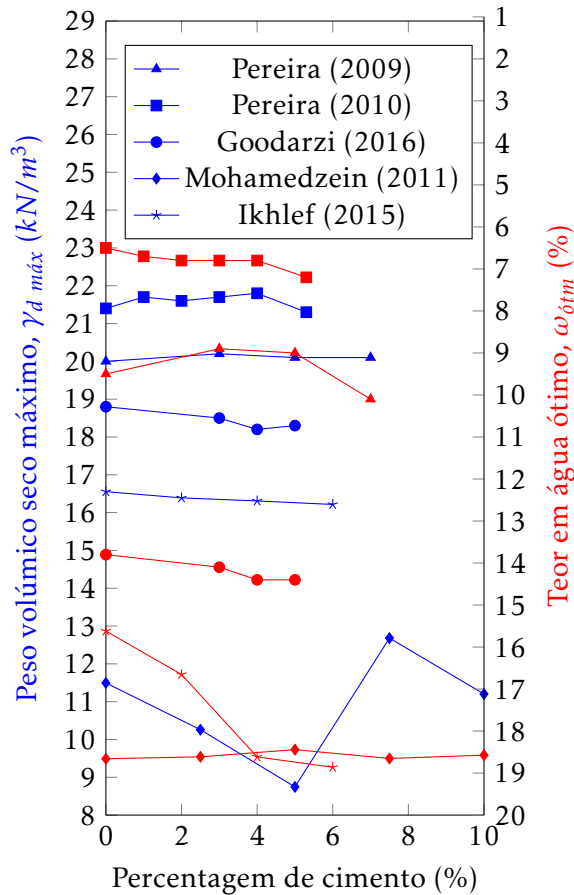


Figura 2.3: Influência da adição de cimento no $\gamma_d máx$ e do $\omega_{ótím}$

compilados na figura 2.4, sendo que os gráficos (d) e (e) não apresentam a mesma escala para facilitar o ajustamento à janela de leitura.

De um modo geral, pode dizer-se que existe um teor em água intermédio para o qual se obtém maiores valores de resistência à compressão, com um valor máximo mais pronunciado em alguns casos.

No caso de Rios (2011), o gráfico representa curvas com diferentes percentagem de cimento. O teor em água que atinge os maiores valores de resistência é de 14%, notando-se uma diferença significativa no comportamento das curvas de 2% e 3% para o teor em água de 12%. A autora afirma que essa incongruência deve-se ao facto de os pontos moldados terem um baixo peso volúmico seco.

Relativamente ao gráfico (c), é representada uma reta tracejada a azul que representa o teor em água ótimo para uma mistura de solo ligado com 2% de cimento. Se analisarmos a curva a azul nota-se que o teor em água ótimo não corresponde ao máximo valor de resistência à compressão. Como os pontos moldados com 2% de cimento não foram compactados com a mesma energia que a curva Proctor, aquela que determina o teor em água ótimo, significa que para a mistura de solo ligado com 2% de cimento o teor em água ótimo será um pouco maior que 12% (reta azul tracejada) que acaba por coincidir com o

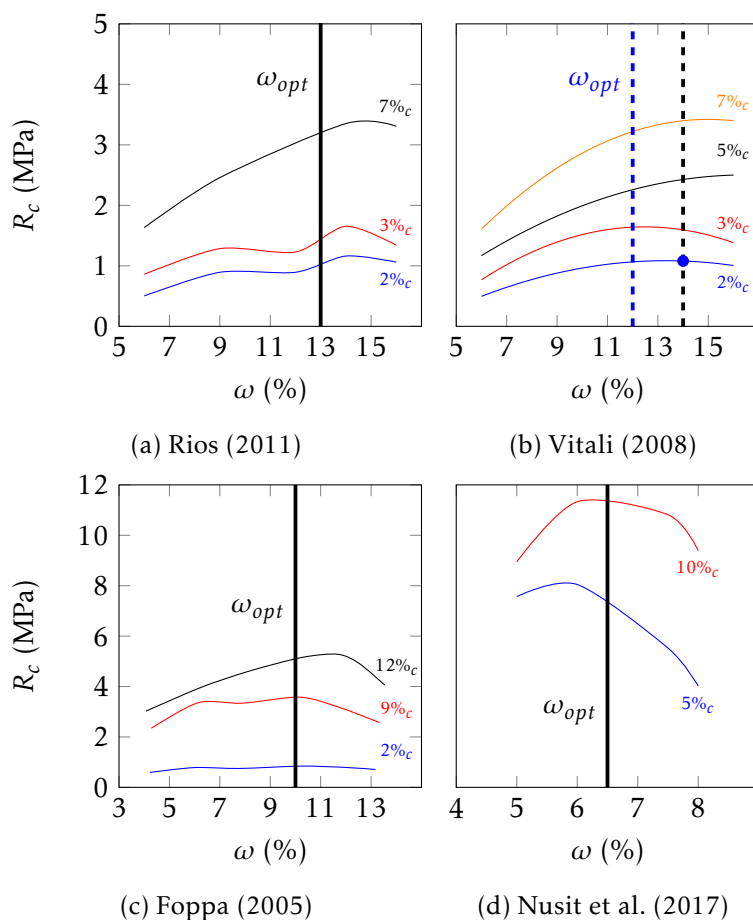


Figura 2.4: Efeito do teor em água na resistência à compressão

máximo valor de resistência à compressão. Concluindo, um valor perto do teor em água ótimo da mistura leva aos maiores valores de resistência à compressão uniaxial.

O mesmo pode ser observado nas curvas de Foppa (2005) onde se observa um aumento da resistência com o aumento do teor em água. Sendo mais pronunciado nas curvas de maior percentagem de cimento.

Por fim é apresentado o estudo de Nusit et al. (2017) em relação ao efeito do teor em água onde se pode reforçar a ideia apresentada anteriormente, ou seja, que o aumento da percentagem de cimento significa um acréscimo da resistência à compressão uniaxial, assim como o teor em água que torna a resistência à compressão uniaxial máxima para cada percentagem de cimento é próximo do ótimo.

No geral, em todos os gráficos nota-se uma redução da resistência à compressão uniaxial após o teor em água ótimo. O que os resultados encontrados na literatura preconizam é que a resistência à compressão uniaxial aumentam até um valor máximo que corresponde a um valor de teor em água relativamente próximo do teor em água ótimo da mistura, a partir do qual decrescem. Visto que para uma mistura de solo ligado com cimento, se se reduzir a energia de compactação (ponto azul da figura 2.5 (a)) em relação à compactação Proctor, o teor em água ótimo altera-se, pois existe uma tendência de

deslocamento da curva de menor energia, para baixo e para a direita, figura 2.5 (b).

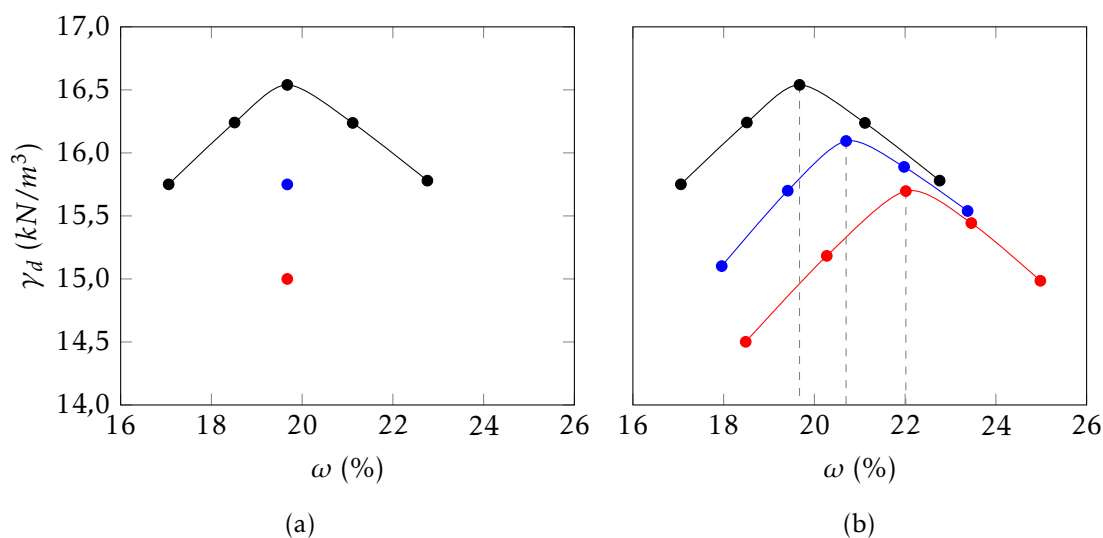


Figura 2.5: Exemplo do comportamento da curva Proctor com a diminuição da energia de compactação

2.5.3 Razão Água/Cimento, a/c

A razão entre a quantidade de água e a quantidade de cimento foi um dos primeiros parâmetros analisados no que se refere aos métodos de dosagem. Ferét em 1892 descobriu que os resultados da resistência à compressão uniaxial obtidos em misturas de betão podem ser determinados em função da relação entre a soma do volume de ar e do volume de água com o volume de cimento. No caso das misturas estudadas pelo autor, grande parte dos vazios eram preenchidos pela água, tornando o volume de vazios praticamente igual ao volume de água. Como tal, foi adotada a razão expressa pela razão entre a dosagem de água, expressa em litros por metro cúbico, e a dosagem de cimento, expressa em quilograma por metro cúbico de betão, a/c, como método de dosagem.

Apesar de se ter provado o sucesso desta abordagem para misturas de betão, vários autores estudaram a sua aplicação em misturas de solo tratado com cimento. Na verdade, os estudos de Horpibulsuk et al. (2001), Horpibulsuk et al. (2003) e Azambuja (2004) mostraram que este quociente é adequado à análise da caracterização do comportamento das misturas de solo tratado com cimento quanto à sua resistência mecânica. É de notar que o material em análise nos seus trabalhos tinha objetivos/aplicações diferentes do solo ligado com cimento, pois como se destinavam à produção de caldas de cimento, para injetar em solos com elevada heterogeneidade, a preparação requeria a adição de elevadas quantidades de água, utilizando teores em água entre os 67% e os 200%.

Contudo, nesses dois estudos, a elevada quantidade de água que os autores usaram era suficiente para que os espaços vazios fossem quase preenchidos na totalidade pela água, dessa forma a quantidade de água reflete a quantidade de vazios. Nas misturas de

solo tratado com cimento as quantidades de água não são suficientes para preencher os vazios, mesmo assim vários autores dedicaram-se ao estudo da razão a/c como método de dosagem.

Foppa (2005) estudou duas percentagens diferentes de cimento de 2% e 9%, chegando à conclusão de que não é possível estabelecer uma relação entre a/c e a resistência à compressão uniaxial, argumentando que os valores dos seus dados se encontram em «patamares» distintos de resistência consoante a percentagem de cimento. Analisando o gráfico por ele determinado, representado na figura 2.6 (a), percebe-se que o autor não estudou percentagens de cimento entre 2% e 9%, como tal, não se pode rejeitar a hipótese de uma hipotética correlação.

Noutro estudo, Sunitsakul et al. (2012), foram moldados 520 provetes e de acordo com as suas características em relação à resistência à compressão uniaxial e à razão a/c foi elaborado o gráfico da figura 2.6 (b).

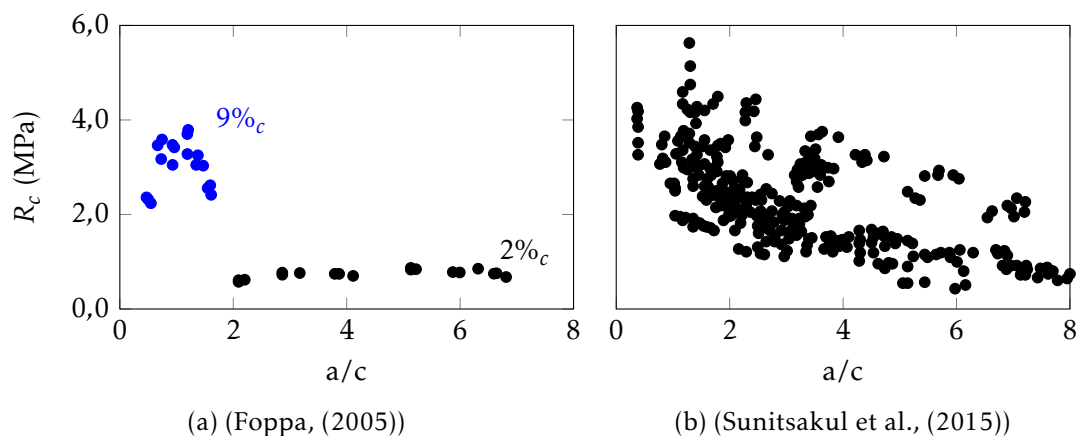


Figura 2.6: Efeito da razão a/c

É notada uma tendência do conjunto dos pontos, para maiores valores da razão a/c a resistência à compressão uniaxial é menor, vindo a aumentar com a diminuição da razão entre a quantidade de água e a quantidade de cimento. É concluído pelo autor que a razão a/c é um fator influente na R_c .

No gráfico da figura 2.7 é representada a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a razão a/c do trabalho de Nusit et al. (2017) onde segundo o autor é claramente verificada uma relação entre a R_c e a razão a/c.

A ideia de que com o aumento da razão a/c a resistência à compressão da mistura de solo ligado com cimento diminui e que a diminuição da R_c é mais acentuada para menores valores de a/c é reforçada por Ikhlef et al. (2015), comprovada pelo gráfico da figura 2.8.

Um estudo com uma diferente perspectiva é o de Ribeiro et al. (2016) onde o autor conclui que independentemente da percentagem de cimento, existe uma razão a/c que providencia uma R_c máxima, figura 2.9 (a).

Por fim, o estudo de Bitir e Bo (2016) feito com diferentes dosagens de cimento, vem

2.5. CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DAS MISTURAS

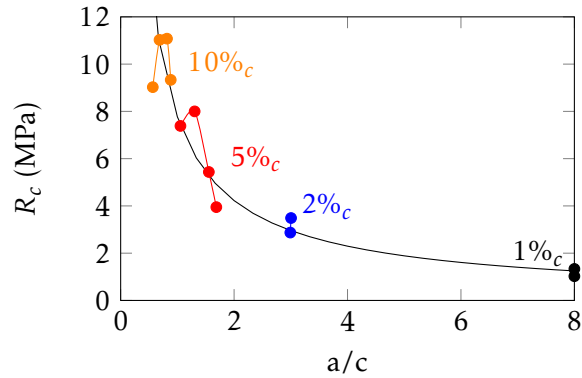


Figura 2.7: Efeito da razão a/c, (Nusit et al., (2017))

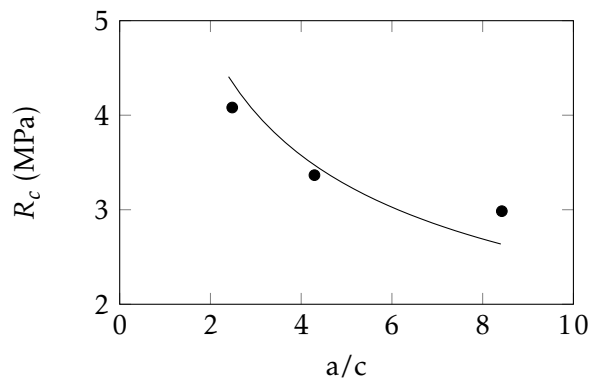


Figura 2.8: Efeito da razão a/c, (Ikhlef et al., (2015))

ao encontro do de Ribeiro et al. (2016), onde o autor refere que ao aumentar a razão a/c a resistência aumenta até a um dado ponto, a partir do qual começa a diminuir, considerando esse ponto o valor ótimo para a razão a/c, figura 2.9 (b).

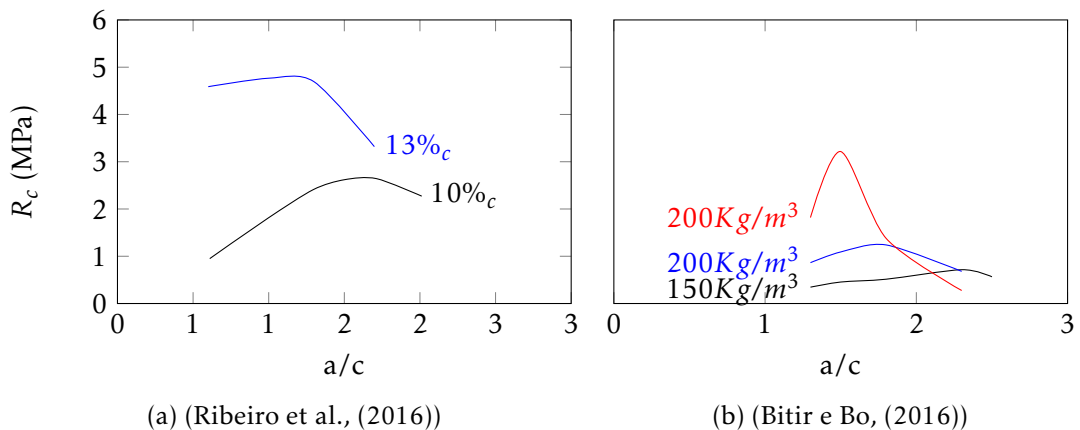


Figura 2.9: Efeito da razão a/c

Os últimos dois estudos mencionados acabam por estar em concordância com o que acontece no estudo de Nusit et al. (2017). Se repararmos no conjunto de pontos relativos aos 5% e 10% de cimento, figura 2.7, também é observado um pico de R_c .

2.5.4 Razão Volume de Vazios/Volume de cimento, V_v/V_c

O estudo da razão entre o volume de vazios e o volume de cimento vem na sequência da descoberta de Ferét, que acaba por relacionar a resistência à compressão com a razão a/c . Como para as misturas de solo ligado com cimento as quantidades de água utilizadas são menores, os vazios não são totalmente preenchidos, como tal, o estudo da razão entre o volume de vazios e o volume de cimento pareceu mais apropriado.

Larnach (1960) foi o primeiro autor a usar esta relação, no trabalho realizado o autor estudou uma areia fina misturada com uma argila pulverizada na proporção de nove partes de areia para uma de argila. As percentagens de cimento utilizadas foram de 5,3%, 11,1% e 17,7%, calculadas em relação ao peso do solo seco. Os provetes foram moldados com os teores em água ótimos provenientes das curvas de compactação Proctor. Perante este cenário, o autor propõe a relação V_v/V_c . Uma possível correlação entre a razão V_v/V_c e a resistência à compressão uniaxial foi determinada, figura 2.10.

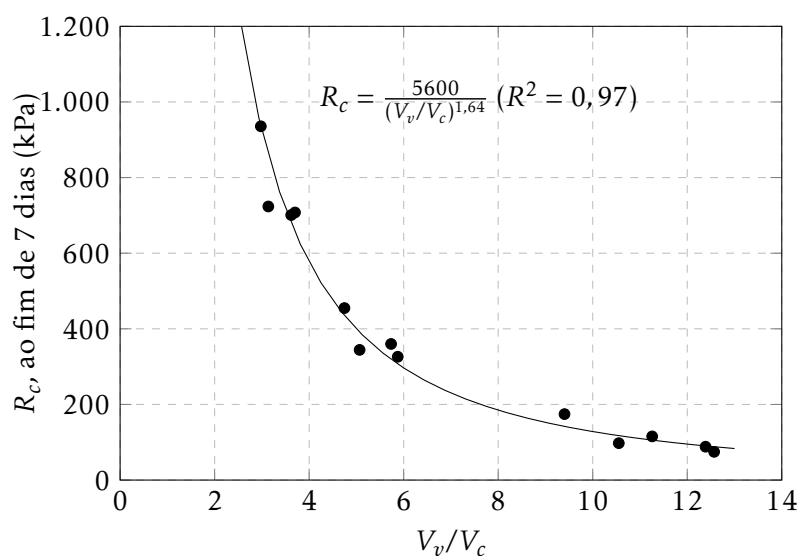


Figura 2.10: Correlação entre resistência à compressão uniaxial e V_v/V_c , adaptado de Larnach (1960)

Pode-se constatar que a curva faz um bom ajuste, comprovado pelo coeficiente de determinação, R^2 , perto da unidade. Comprovando que de facto existe uma boa correlação entre a resistência à compressão uniaxial e a razão entre o volume de vazios e o volume de cimento.

Outros autores encontraram também uma correlação entre a resistência à compressão uniaxial e a razão V_v/V_c , designadamente Foppa (2005), Vitali (2008), Rios (2011), Consoli et al. (2010) e Consoli et al. (2011).

Dos trabalhos analisados no presente subcapítulo, só no de Foppa (2005) e no de Rios (2011) é que não constavam as curvas de aproximação aos pontos, tendo estes sido determinados com o auxílio de um software apropriado, *PlotDigitizer*, a partir dos gráficos dos autores, pois só desta forma foi possível comparar os resultados entre os diferentes

estudos.

O primeiro estudo aqui analisado é o de Foppa (2005), onde é claramente visível a tendência do aumento da R_c com a diminuição da razão V_v/V_c , figura 2.11. É importante mencionar que para os estudos analisados o de Foppa (2005) é o único que não menciona se foram ou não substituídos os finos, os restante trabalhos substituíram.

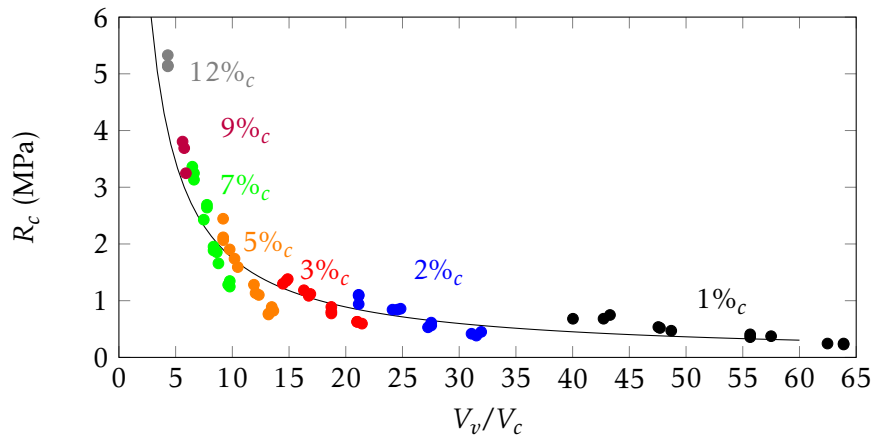


Figura 2.11: Efeito da razão V_v/V_c , (Foppa, (2015))

No caso do estudo de Vitali (2008) o autor realizou dois estudos: num estudou a razão V_v/V_c dos provetes moldados numa linha vertical, isto é, provetes com o mesmo teor em água e diferentes pesos volúmcos, noutra estudou o conjunto dos provetes da linha vertical e horizontal, em que a linha horizontal é caracterizada pelo peso volúmcico constante e variação de teor em água, ambos os estudos são apresentados na figura 2.12.

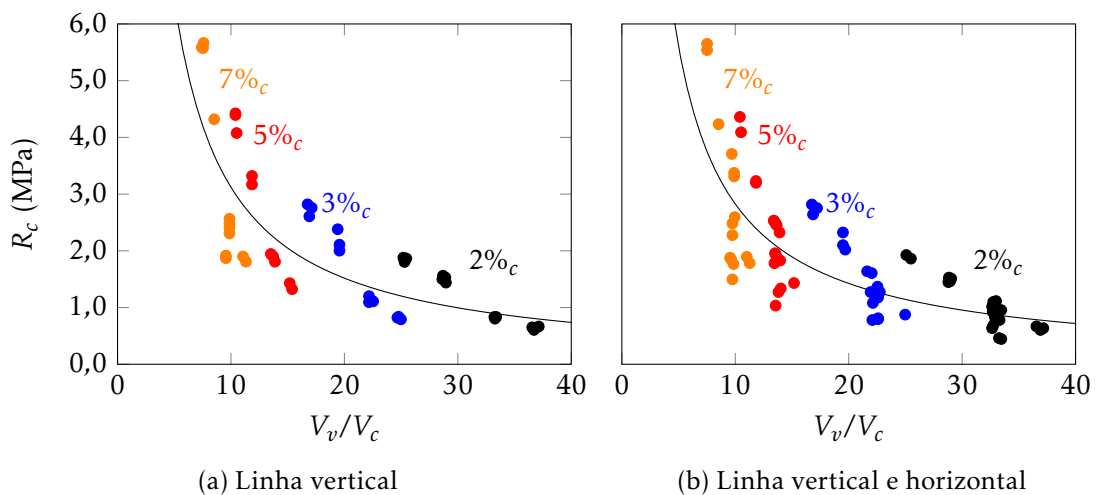


Figura 2.12: Efeito da razão V_v/V_c , (Vitali, (2008))

Ao representar as duas curvas de Vitali (2008) é perceptível que se se juntar os pontos moldados consoante uma linha horizontal com os de uma linha vertical a razão entre volume de vazios e volume de cimento é afetada, provocando um deslocamento da curva para a esquerda.

Rios (2011) constatou que esta razão não representa a influência dos dois parâmetros. Porém, no presente trabalho foi traçada uma curva de ajuste, com os dados do autor, para se fazer uma posterior comparação com outros trabalhos, representada na figura 2.13.

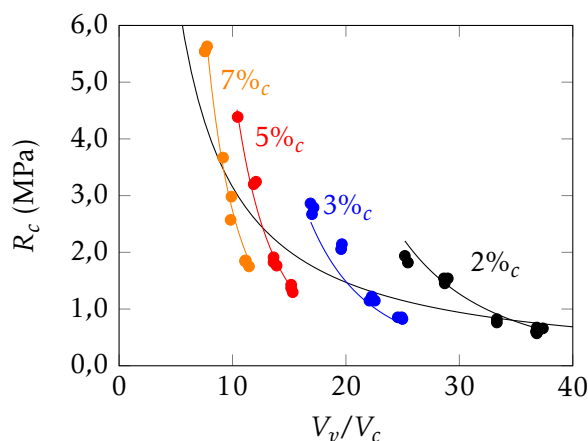


Figura 2.13: Efeito da razão V_v/V_c , (Rios, (2011))

O trabalho de Consoli et al. (2010) vem comprovar o que foi mencionado anteriormente, pois no seu trabalho é evidente uma boa correlação entre a razão V_v/V_c e a R_c , figura 2.14.

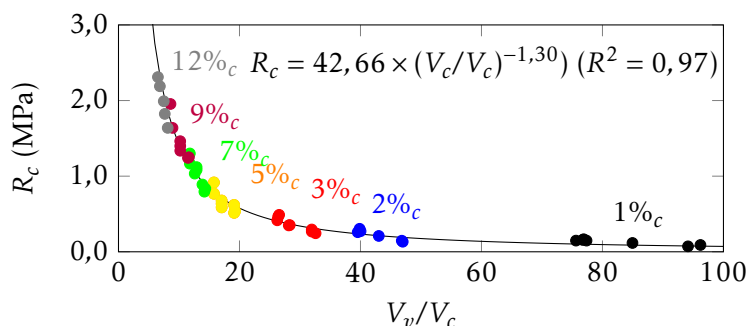


Figura 2.14: Efeito da razão V_v/V_c , (Consoli et al., (2010))

Por fim, são apresentadas as curvas obtidas por Consoli et al. (2011), figura 2.15. É um estudo interessante uma vez que o autor estudou diferentes teores em água, 17%, 20% e 23%. Na figura estão representadas três curvas, cada uma delas ajusta os pontos com o mesmo símbolo, ou seja, com o mesmo teor em água, enquanto que as cores representam os teores em cimento.

A curva a traço interrompido representa os pontos moldados com 17% de teor em água, a curva a cheio representa um teor em água de 20% e a curva a traço-ponto 23%. De um modo geral, os valores da resistência são mais baixos para teores em água mais baixos. Deste modo, o autor conclui que o teor em água revela ser bastante importante na determinação da R_c do solo estudado por provocar mudanças na estrutura do solo devido à compactação de distintos teores em água.

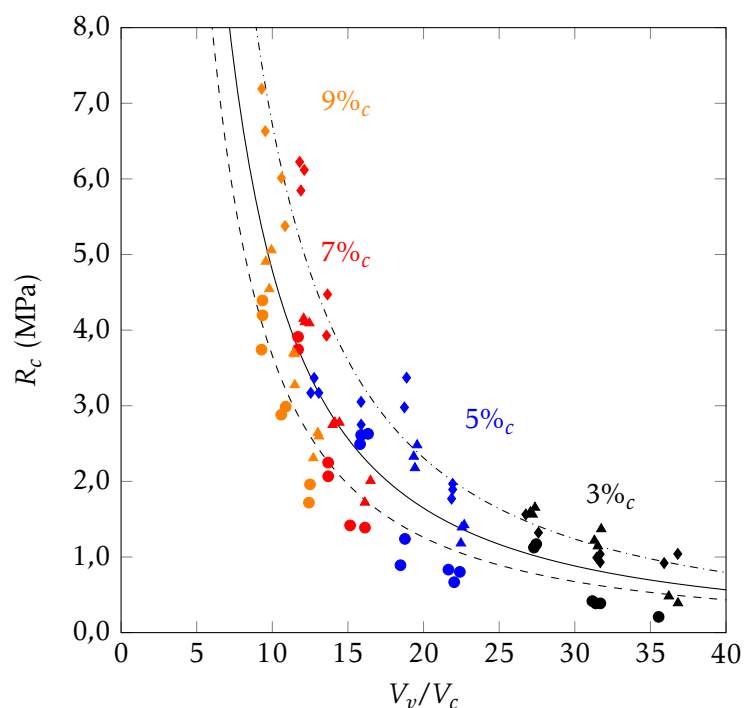


Figura 2.15: Efeito da razão V_v/V_c , (Consoli et al., (2011))

Posto esta análise individual de cada autor, foram reunidas todas as curvas dos respectivos autores, como representado na figura 2.16. É ainda apresentada a tabela 2.3, servem de auxílio á análise da figura.

Tabela 2.3: Propriedades granulométricas dos autores

	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	Tipo de solo
Foppa (2005)	0,003	0,009	0,13		43	-	Areia argilosa
Vitali (2008)	-	0,13	-	0,64	-	-	Areia siltosa
Consoli et al. (2010)	-	-	0,16	1,9	0,6	-	Areia fina
Rios (2011)		0,07	0,25		113	2,72	Areia siltosa
Consoli et al. (2011)	0,004	0,01	0,07	-	-	-	Silte

No gráfico, as curvas de Foppa (2005) e Consoli et al. (2010), estão relativamente próximas e por outro lado, estão também próximas as curvas de Vitali (2008) e Rios (2011). A análise das características granulométricas parece revelar que os dois primeiros solos são mais finos e os de Vitali (2008) e Rios (2011) um pouco mais grosseiros. Mas esta análise não carece de confirmação. As curvas de Consoli et al. (2011) ficam afastadas desta análise dado que o autor poderia ter recorrido a uma só curva agregasse os três teores em água estudados. No entanto este gráfico será objeto de análise no capítulo 4, em comparação com os resultados do presente trabalho.

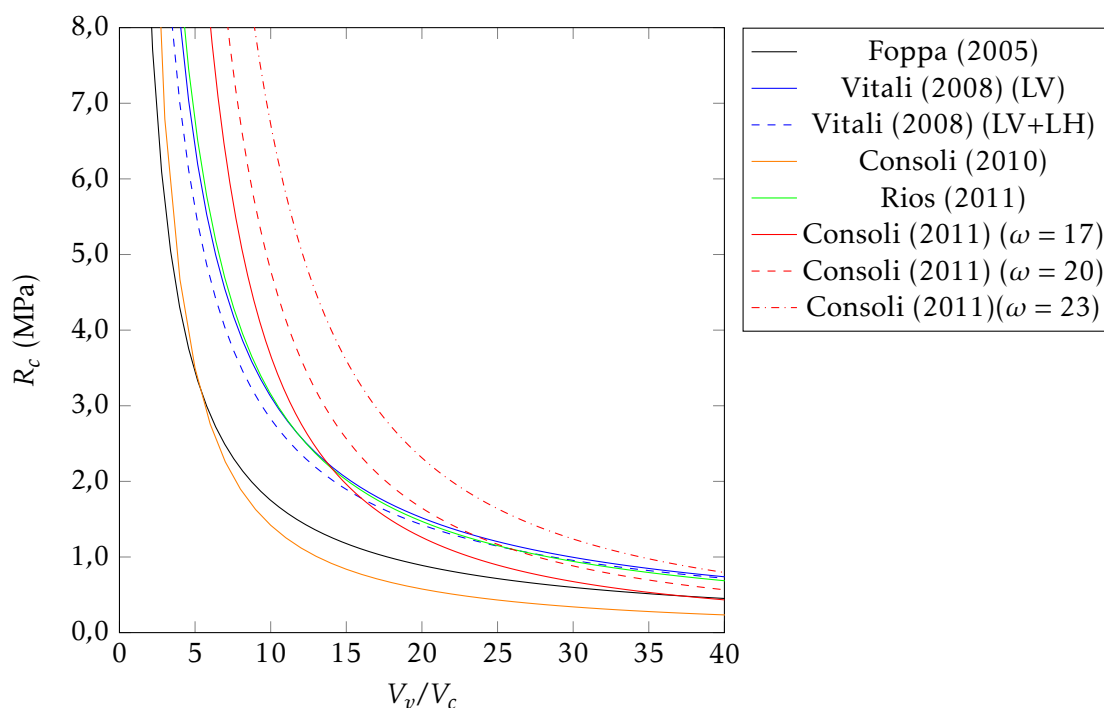


Figura 2.16: Efeito razão V_v/V_c , todos os autores analisados

2.5.5 Razão Porosidade/Índice Volumétrico de Cimento, n/Civ

Com o propósito de melhorar os ajustes feitos aos pontos determinados segundo a razão V_v/V_c , isto é, permitir o aumento do coeficiente de determinação, R^2 , surgiu uma nova abordagem, apresentada por Foppa (2005). Esta abordagem consiste em partir da expressão V_v/V_c estudada a primeira vez por Larnach (1960) e dividir o numerador e o denominador pelo volume total do provete testado. Ao dividir o volume de vazios pelo volume total obtém-se a porosidade, e dividindo o volume de cimento pela totalidade do volume do provete chega-se ao índice volumétrico de cimento, Civ , sendo este a novidade em relação a Larnach (1960).

$$\frac{\frac{V_v}{V}}{\frac{V_c}{V}} = \frac{n}{Civ} \quad (2.1)$$

Em que:

- V_v é o volume de vazios;
- V_c é o volume de cimento;
- V é o volume total do provete;
- n é a porosidade
- Civ é o índice volumétrico de cimento

Ao colocar os pontos num gráfico resistência à compressão uniaxial/ n/Civ é possível traçar uma curva que melhor ajusta a sua distribuição. De forma a evitar que os pontos fiquem espalhados, ou seja, mais afastados dessa curva, o numerador é elevado a um expoente p .

O expoente p deve ser aquele que quando traçada a curva, o coeficiente de determinação seja o mais próximo do unitário, podendo variar entre 0 e 1. Ainda não é perceptível que propriedades do solo influenciam na quantificação do expoente, mas os estudos de Rios (2011) e Rios et al. (2013) apontam a distribuição granulométrica e a quantidade de finos como factores relevante e de grande importância.

A aparência da curva e a expressão tipo de ajuste dos pontos do gráfico resistência à compressão simples/ n/Civ^p são representados na figura 2.17, em que A e B são parâmetros da própria equação da reta.

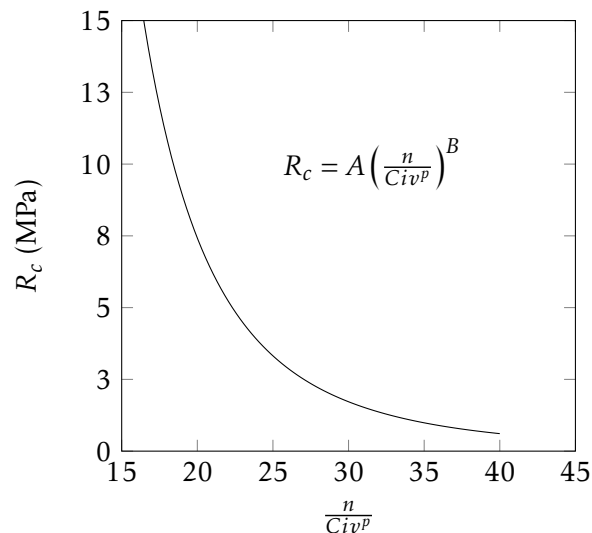


Figura 2.17: Exemplo de uma curva $R_c/n/Civ^p$

Da literatura surgiram os estudos de Foppa (2005), Vitali (2008), Consoli et al. (2010), Consoli et al. (2011), Rios (2011) e Rios et al. (2013). Na tabela 2.4 são apresentadas as expressões das curvas dos respectivos autores, assim como a classificação do solo.

Tabela 2.4: Expressões de $R_c = A \times (Civ^p)^B$ dos estudos analisados

$R_c = A \times (Civ^p)^B$	A	p	B	Classificação do Solo
Foppa (2005)	$5,03 \times 10^7$	0,28	-3,32	Areia Argilosa (SC)
Consoli (2010)	$2,82 \times 10^4$	1	-1,3	Areia Fina
Consoli (2011, $\omega = 17\%$)	$0,84 \times 10^8$	0,35	-3,7	Silte (ML)
Consoli (2011, $\omega = 20\%$)	$0,99 \times 10^8$	0,35	-3,7	Silte (ML)
Consoli (2011, $\omega = 23\%$)	$1,29 \times 10^8$	0,35	-3,7	Silte (ML)
Rios (2013)	10×10^8	0,21	-3,279	Porto silty sand
Rios (2011)	7×10^9	0,21	-4,475	Silty Sand (SM)
Vitali (2008)	$2,0 \times 10^{12}$	0,21	-4,316	Solo Residual de granito

No entanto, não foi estabelecida uma comparação entre as diversas curvas devido à incerteza da possibilidade da junção das mesmas, pois apresentam diferentes expoentes p .

2.5.6 Abordagem Crítica

A presumível utilidade desta forma de dosagem é que uma vez que se tenha a curva de aproximação pode-se calcular as quantidades de cimento para qualquer valor de força de compressão, ou seja, seria uma mais valia na fase do projeto, pois consegue-se otimizar a relação entre a quantidade de cimento e as características que se pretendem para o solo num prazo de tempo mais reduzido.

Apesar de na bibliografia ser dito de forma clara que se consegue facilmente calcular as quantidades de cimento tendo o valor de n/Civ^p nunca é demonstrada nem provada essa afirmação.

Basicamente os autores têm assim a possibilidade de, a partir de n/Civ^p conseguirem obter o valor da massa de cimento, W_{ci} , para uma determinada resistência pretendida, do modo seguinte:

$$\begin{aligned} Civ^p &= \frac{n}{\left(\left(\frac{V_c}{V}\right) \times 100\right)^p} = \frac{n}{\left(\left(\frac{W_{ci}}{\frac{3150}{V}}\right) \times 100\right)^p} = \frac{n}{\left(\left(\frac{W_{solo} \times \%_{ci}}{\frac{3150}{V}}\right) \times 100\right)^p} = \frac{n}{\left(\left(\frac{W_{solo} \times \%_{ci}}{3150 \times V}\right) \times 100\right)^p} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{n}{\left(\left(\frac{\frac{V \times \gamma_d}{1 + \%_{ci}} \times \%_{ci}}{3150 \times V}\right) \times 100\right)^p} = \frac{n}{\left(\left(\frac{V \times \gamma_d}{3150 \times V \times (1 + \%_{ci})} \times \%_{ci} \times 100\right)^p\right)} = \frac{n}{\left(\frac{\gamma_d \times \%_{ci} \times 100}{3150 \times (1 + \%_{ci})}\right)^p} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{\frac{G_m \times \gamma_w - \gamma_d}{G_m \times \gamma_w} \times 100}{\left(\frac{\gamma_d \times \%_{ci} \times 100}{3150 \times (1 + \%_{ci})}\right)^p} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Em que:

- G_m é a densidade média das partículas sólidas, dada pela ponderação entre as partículas sólidas do solo e do cimento $G_m = G_s \times \%_s + G_c \times \%_c$, em que $G_s = 2,64$ e $G_c = 3,15$;
- γ_w é o peso volúmico da água;
- γ_d é o peso volúmico seco;
- $\%_c$ é a percentagem de cimento.

Pode-se concluir que a partir da dedução 2.2 consegue-se saber qual o valor do peso volúmico seco do solo e a percentagem de cimento pois são a única incógnita, uma vez que o valor da densidade média das partículas sólidas, G_m , depende do solo e do cimento.

A percentagem de cimento é escolhida pelo projetista, sendo o seu dever encontrar o equilíbrio entre a quantidade de cimento e o valor do peso volúmico seco do solo, γ_d , peso volúmico esse que retrata a energia de compactação a ser aplicada no terreno.

Depois de atribuído o valor do γ_d é facilmente calculada a massa de solo e de cimento, demonstrado em II.1.

$$W_{solo} = \frac{V \times \gamma_d}{1 + \%_{ci}} \quad (2.3)$$

$$W_{ci} = \%_{ci} \times W_{solo} \quad (2.4)$$

Constata-se que realmente se conseguem estabelecer dosagens de cimento e solo tendo a equação da curva do solo em questão porque é essa curva que fornece os valores de n/Civ^p . Ao passo que as dosagens de água não são obtidas a partir da curva.

O presente trabalho procura investigar de que forma é que o teor em água, ω , influencia o comportamento do solo ligado com cimento, aplicado ao parâmetro n/Civ^p .

2.6 Investigação no Departamento de Engenharia Civil

2.6.1 Estudos Anteriores

A investigação nesta área realizada anteriormente no Departamento de Engenharia Civil foi realizada com o mesmo solo, recolhido exatamente na mesma zona. No entanto, as curvas granulométricas obtidas no seus trabalhos, apresentam algumas discrepâncias, visíveis na figura 2.18.

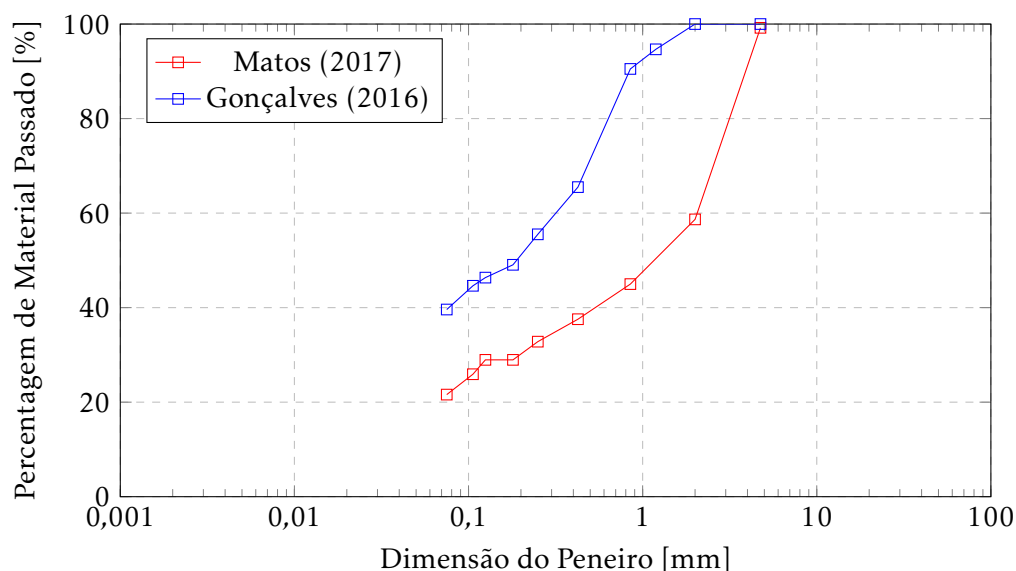


Figura 2.18: Análise Granulométrica - Gonçalves (2016) e Matos (2017)

Segundo a Classificação Unificada proposta pela norma ASTM D2487-11 (2011) - *Standard practice for classification of soils for engineering purposes*, Gonçalves (2016) classificou

o solo como sendo uma Argila Magra (classe - CL) enquanto que Matos (2017) classificou o solo como uma Areia Argilosa (finos CL).

Nos estudos anteriormente mencionados foram estudadas misturas com diferentes teores de cimento. Gonçalves (2016) estudou percentagens de cimento de 10 e 14% e Matos (2017) de 4 e 6%.

Os autores realizaram ensaios Proctor pesados do solo, tendo obtido de peso volúmico seco máximo e teor em água ótimo os valores apresentados na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Valores de γ_d e ω_{opt} de Gonçalves (2016) e Matos (2017)

	γ_d (kN/m ³)	ω_{opt} (%)
Gonçalves (2016)	17,6	13,7
Matos (2017)	17,8	14,5

Em ambos os estudos foram escolhidos pontos de moldagem para os provetes ensaiados numa "linha vertical" do gráfico de compactação, isto é, com teor em água constante e peso volúmico seco variável.

Para o efeito é necessário variar a energia de compactação, assim sendo, os autores aplicaram diferentes energias de compactação ao variar o número de pancadas. Na tabela 2.6 são apresentados as características dos pontos moldados para cada estudo.

Tabela 2.6: Pontos Moldados por Gonçalves (2016) e Matos (2017)

	% _{ci}	nº de pancadas	ω (%)
Gonçalves (2016)	10 e 14	25	12,8
		20	
		15	
		10	
Matos (2017)	4 e 6	40	14,5
		30	
		25	
		20	

Após obtidos os resultados de resistência à compressão e determinados os parâmetros n/Civ^p , foram determinadas as curvas de ajuste que se encontram na figura 2.19.

Cada curva contem um expoente p diferente, ou seja, no caso de Matos (2017) o autor obteve um p de 0,16, no caso de Gonçalves (2016) o valor determinado para o expoente foi de 0,21.

2.6.2 Estabelecimento de Dosagens

Foi averiguada a possibilidade de se juntar as duas curvas e foi procurada uma presumida relação. Como tal, comparou-se um ponto de cada curva, ponto A e B, da figura 2.19.

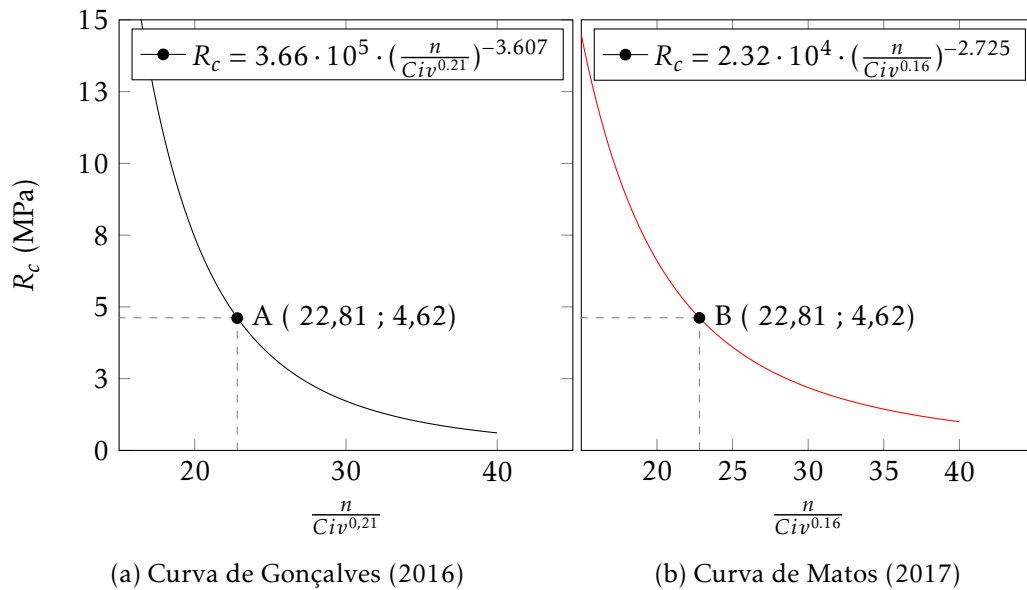


Figura 2.19: Relação $R_c/n/Civ^p$ de Gonçalves (2016) e Matos (2017)

Com isto estudou-se a influência do parâmetro n/Civ^p para uma mesma resistência à compressão uniaxial de curvas diferentes.

Fazendo na equação 2.2, $n/Civ^p = 22,81$ podem obter-se diferentes combinações de valores de γ_d e $\%_{ci}$, uma vez que depende somente do peso volúmico seco, γ_d e da percentagem de cimento, $\%_{ci}$, utilizados. Levantam-se três questões, como é que é perceptível a influência da quantidade de cimento no parâmetro, comparando as duas curvas? Para o mesmo valor de n/Civ^p a quantidade de cimento é a mesma? E o peso volúmico seco que papel tem?

Para cada um dos pontos, A e B, determinou-se qual seria o peso volúmico seco para valores de percentagem de cimento que levariam a n/Civ^p igual a 22,81, com os resultados obtidos construiu-se o gráfico representado na figura 2.20. Cada ponto do gráfico foi calculado um a um, ou seja, era destinada uma percentagem de cimento e determinava-se o peso volúmico correspondente, aquele que levava a que n/Civ^p fosse 22,81. O processo foi utilizado para as percentagens de cimento entre 1% e 14%, para cada autor, pois é preciso realçar que o expoente p utilizado foi o adequado consoante o autor estudado.

Quer isto dizer que qualquer ponto do gráfico da figura 2.20 ao ser substituído na expressão 2.2 toma o valor de 21,81, consoante o respetivo autor.

Desta feita, é possível responder às questões anteriormente levantadas. A quantidade de cimento como é dependente do peso volúmico seco não permite que sejam retiradas conclusões apenas analisando o parâmetro n/Civ^p . Existe uma panóplia de combinações possíveis que levam aos valores pretendido. Por exemplo, ao escolher-se uma percentagem de 8% de cimento o peso volúmico seco necessário é diferente de autor para autor, ou se se fizer o pensamento ao contrário, se escolhermos um peso volúmico de $19kN/m^3$, para cada autor existe uma percentagem de cimento adequada, ou ainda, podemos escolher

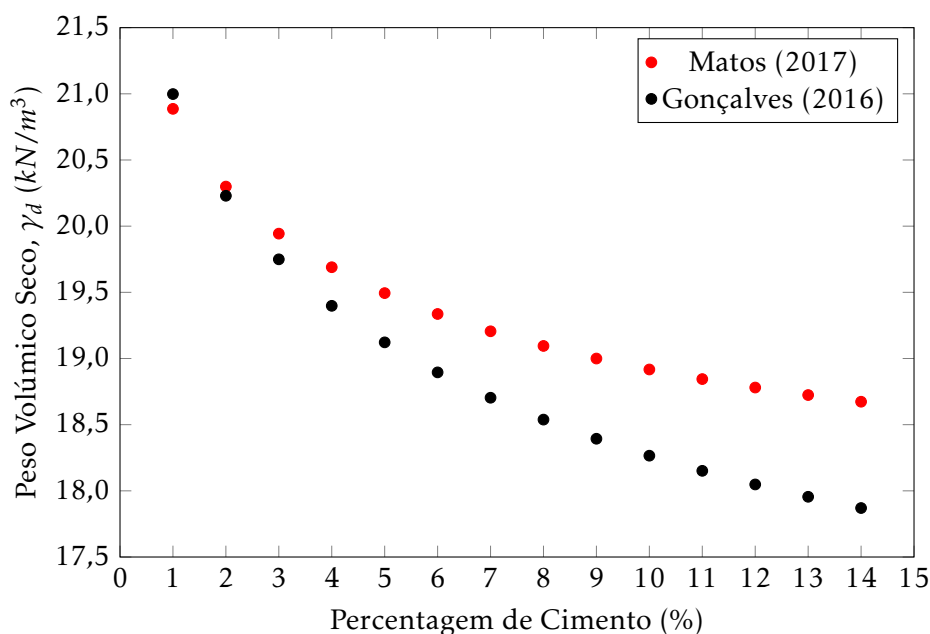


Figura 2.20: Estabelecimento de dosagens

dois pontos completamente diferentes e ainda assim obter o mesmo n/Civ^p .

O problema é que aquando a leitura de uma comparação entre duas ou mais curvas este facto não é perceptível e na realidade não se está a comprar coisa alguma. Contudo, a curva por si só não deixa de ser um bom processo que leva à dosagem de misturas ligadas com cimento.

Recorrendo ao tipo de análise que foi apresentada anteriormente e tomando os valores de n e Civ dos trabalhos de Matos (2017) e Gonçalves (2016), fez-se um estudo mais aprofundado da utilidade desta análise.

Assim sendo, foram colocados os dois conjuntos de pontos no mesmo gráfico, mas para tal, foi necessário determinar o valor do expoente p que permitisse traçar a curva com o melhor ajuste.

Para descobrir o valor de p apropriado foi necessário fazer-se várias iterações, ou seja, calcular vários n/Civ^p (n e Civ são sempre os mesmos para cada ponto, só varia o p) e ir acompanhando as variações do coeficiente de determinação. O expoente p é determinado quando os pontos de n/Civ^p são tais que a curva descrita de melhor ajuste tem um coeficiente de determinação máximo.

Recorrendo ao software Matlab, chegou-se à conclusão que o valor de p que leva ao maior coeficiente de determinação, $R^2(0,84)$, para o conjunto dos pontos de Matos (2017) e Gonçalves (2016) é 0,18.

Os pontos e a curva são apresentados na figura 2.21, onde é feita a distinção entre as quantidades de cimento utilizadas por cada autor. Adicionou-se ao gráfico, uma parte ampliada, e estudou-se os três pontos contidos no círculo dessa zona do gráfico. Os pontos estão relativamente alinhados verticalmente, resultando num $n/Civ^{0,18}$ médio de 30,63.

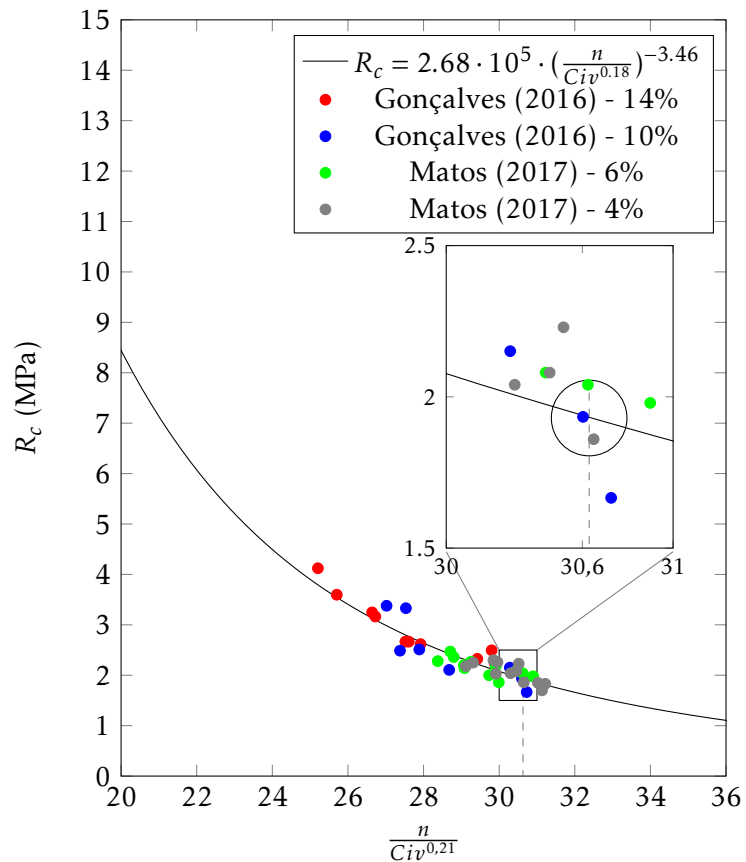


Figura 2.21: Relação $R_c/n/Civ^p$ de Gonçalves (2016) e de Matos (2017)

Analogamente ao procedimento apresentado anteriormente, determinou-se os valores do peso volúmico seco e percentagem de cimento que levam a que $n/Civ^{0,18}$ seja igual a 30,63. Os valores obtidos são apresentados na figura 2.22.

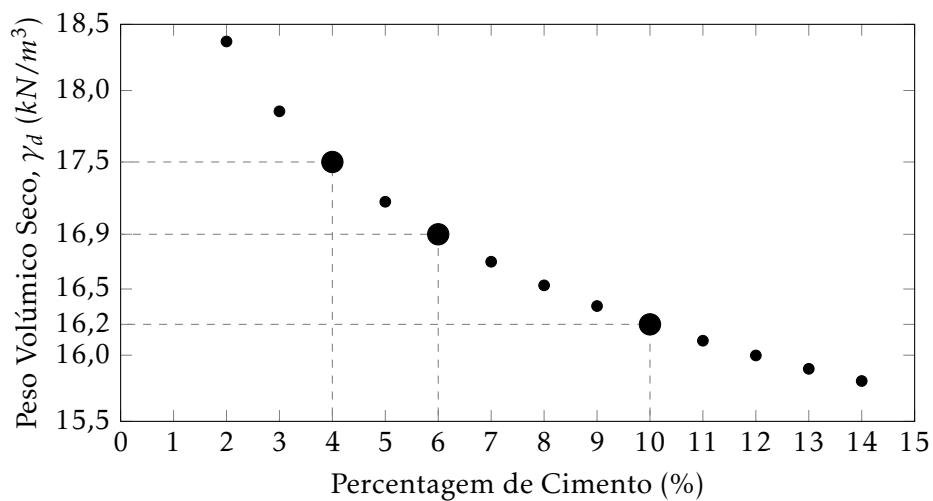


Figura 2.22: Valores de peso volúmico seco e percentagem de cimento para p de 0,18

Para as percentagens de cimento analisadas, os valores de peso volúmico seco são

apresentados na tabela 2.7, assim como os valores retirados dos trabalhos dos autores.

Tabela 2.7: Dados dos pontos de 10%, 6% e 4% de cimento analisados

$\%_c$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$\gamma_d_{gráfico}(kN/m^3)$
10	16,2	16,2
6	16,8	16,9
4	17,3	17,5

Constata-se que a partir do gráfico da figura 2.22 consegue-se estimar de uma forma bem aproximada os valores do peso volúmico seco. Para o caso dos 6% o valor é o mesmo e no caso dos 10% e 4% a diferença não é superior a 1%.

Posto esta análise exaustiva, propõe-se neste estudo, analisar o efeito da variação do teor em água nas curvas que relacionam o parâmetro n/Civ^p com a resistência à compressão uniaxial, visto que a quantidade de água utilizada não tem influencia direta no parâmetro, como se pode ver na equação 2.2. Matos (2017) e Gonçalves (2016) utilizaram percentagens de cimento de 4%, 6%, 10% e 14%, de forma a dar continuidade aos estudos por eles desenvolvidos, no presente trabalho serão admitidas percentagens de 4%, 6% e 10% de cimento, deixando de parte os 14% de cimento por ser uma quantidade elevada e por não se enquadrar no âmbito do estudo pretendido.

ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, em primeiro lugar é feita a discretização do solo, água e cimento utilizados para a mistura de solo ligado com cimento do presente trabalho. De seguida são determinadas as curvas Proctor através dos ensaios de compactação Proctor, onde se procedeu à compactação leve para fazer-se a calibração da máquina e à compactação pesada de forma a determinar o peso volúmico seco máximo e teor em água ótimo das misturas ligadas com 4%, 6% e 10% de cimento. São estabelecidos os pontos de moldagem que determinaram as características dos provetes moldados, viabilizando os cálculos das quantidades necessárias de cada constituinte. Posto isto, é descrito o método utilizado para a compactação dos provetes a serem utilizados nos ensaios de compressão uniaxial, que passou por garantir uma certa quantidade de mistura pré-determinada no molde do provete. Ao fim do período de cura de sete dias, os provetes são sujeitos aos ensaios de compressão uniaxial. Depois do tempo de cura, são calculados os pesos volúmicos secos e o teor em água dos provetes com o material restante do provete após a compressão, permitindo que sejam averiguadas as condições de admissibilidade dos provetes.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Solo e sua Caracterização Física

O solo utilizado para este estudo foi recolhido da localidade de Capuchos, freguesia de Caparica e Trafaria, no concelho de Almada. A figura 3.1 representa a localização geográfica.

De acordo com Silva (2010), os solos desta zona pertencem à unidade de Cotter (1956) das Argilas azuis de Xabregas. Segundo a Notícia Explicativa da Folha 34 – D – Lisboa, da



Figura 3.1: Localização geográfica do solo utilizado no presente trabalho

Carta Geológica de Portugal, trata-se de um conjunto silto-argiloso, por vezes com areias finas, de cor cinzento azulado. Esta unidade representa a maior transgressão de todo o Miocénico e data do Serravaliano.

Os terrenos de onde foram retirados os solos, figura 3.1, estendem-se entre a auto-estrada A2 e a Costa de Caparica ao longo de grande parte da superfície planáltica das colinas de Almada e, a partir daí, ocupam a encosta suave que desce sobre a via rápida IC 20. Toda esta área apresenta uma morfologia suave, favorecida pela estrutura das camadas miocénicas inclinando 5° a 8° para SSE, o que a torna particularmente atrativa para a construção. De facto, é sobre estes terrenos que, desde há algumas décadas, a cidade de Almada tem vindo a crescer, na sua expansão para leste na direção da Costa de Caparica, Silva (2010)

Na recolha foi utilizada uma pá para auxiliar a extração das quantidades de solo no estado natural necessárias para a realização dos ensaios. A amostra recolhida foi colocada em recipientes de plástico, devidamente vedados, e foi transportada até ao laboratório de mecânica dos solos da FCT/UNL.

O solo apresentava um teor em água natural médio de 29,5%, pelo que foi necessário fazê-lo secar porque não estava em condições para a desagregação e posterior peneiração. Deste modo o solo foi disposto uniformemente na bancada do laboratório até estar em condições que permitissem ser trabalhado, como apresentado na figura 3.2.

Com vista à classificação do solo foi realizada uma peneiração, (figura 3.3), segundo a especificação LNEC E 196-1966 - *Solos. Análise granulométrica*, da qual se obteve a curva granulométrica, figura 3.4, traçada com recurso aos valores apresentados na tabela A.1, em Apêndice.



Figura 3.2: Armazenamento do solo recolhido



Figura 3.3: Peneiros e análise granulométrica

De seguida o solo foi objeto de duas classificações: classificação unificada e classificação AASHTO. Como tal, foram analisadas as frações de cascalho, areia e finos do solo, representadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resumo da análise granulométrica

Fração	Dimensão (mm)	Peneiro	%
cascalho	> 4,75	retido no #4	0%
areia	0,075 a 4,75	passa no #4; retido no #200	95,3%
finos	<0,075	passa no #200	4,7%

Percentagem retida no #200 > 50%
 Percentagem de areia > Percentagem de cascalho

Através da Classificação Unificada, o solo é considerado um solo grosseiro, dado que

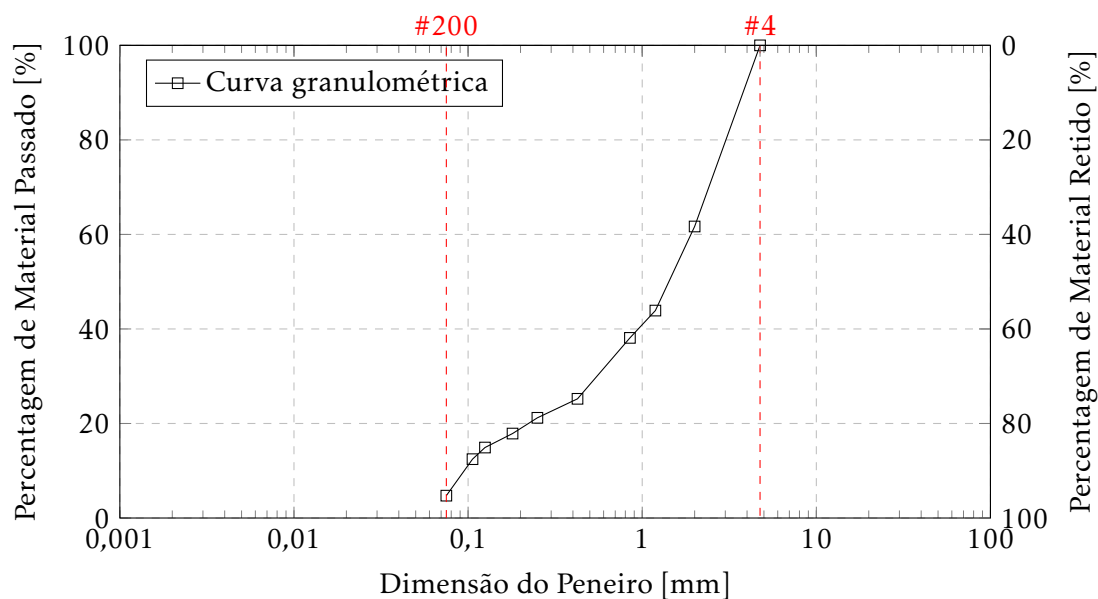


Figura 3.4: Análise granulométrica do presente trabalho

a percentagem de solo que fica retida no peneiro 200 é superior a 50%. A percentagem de areia é superior à percentagem de cascalho, permitindo classificar o solo como sendo uma Areia, S. Por outro lado, e sabendo que a percentagem de finos é menor que 5%, há que determinar o coeficiente de uniformidade, C_u , e o coeficiente de curvatura, C_c , dados por,

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (3.1)$$

Como $C_u > 6$ e $1 \leq C_c \leq 3$, é possível classificar o solo como uma areia bem graduada, SW, de acordo com a Classificação Unificada relativa à norma ASTM D2487 (1985).

No entanto, segundo a classificação relativa à norma AASHTO M145-42 (1991) - *Standard specification for classification of soil and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*, o solo pertence ao conjunto dos solos granulares pois a percentagem de finos é inferior a 35%. Como a determinação do índice de plasticidade e do limite de plasticidade não é aplicável a solos com cerca de 30% ou menos, de partículas de dimensões inferiores a 0,075mm, como é o caso do solo em estudo, significa que o solo é não plástico. Deste modo, o solo pertence ao subgrupo A-1-b, em que o seu comportamento na camada sob o pavimento é considerado excelente a bom.

A norma inclui ainda, o índice de grupo (IG), que se apresenta entre parêntesis à frente do grupo ou sub-grupo. No caso de solos não plásticos o índice de grupo é nulo.

Em forma de resumo é apresentado na tabela 3.2 as propriedades do solo e as suas classificações unificada e para fins rodoviários AASHTO.

Tabela 3.2: Classificação do solo e limites de consistência

Propriedade	Solo	Norma
Classificação Unificada	SW	ASTM D 2487
Classificação AASHTO	A-1-b	AASHTO M145-42
Limite de Liquidez (%)	NP	NP-143
Índice de Plasticidade (%)	NP	NP-143
Limite de Plasticidade (%)	-	NP-143

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado foi o mesmo dos trabalhos anteriores realizados no DEC, referidos em 2.6. É um Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N, cimento Portland tipo II, classificação atribuída pela norma do IPQ (Instituto Português da Qualidade) NP EN 197-1 (2012). Devido às suas características, tais como a trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no adequado aos trabalhos correntes da construção, sendo por este motivo o cimento mais utilizado em obras de construção civil.

É um cimento de cor cinzenta, e em comparação com um cimento CEM I com a mesma classe de resistência tem menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade apesar de desenvolver as resistências mais lentamente, menor resistência inicial.

Para garantir a sua integridade o cimento foi armazenado em sacos de plásticos bem vedados de modo a impedir a sua hidratação.

3.2.3 Água

Tal como os restantes materiais utilizados, a água não está isente de cumprir normas. A água utilizada foi proveniente da rede pública, assumido-se que as disposições previstas na norma NP EN 1008 (2003) foram cumpridas.

3.3 Ensaios de Compactação

3.3.1 Compactação Proctor do Solo - Calibração do Compactador Marshall

A utilização do compactador Marshall é recente no DEC da FCT/UNL. Matos (2017), já referido anteriormente, capítulo 2, realizou ensaios de compactação com o molde pequeno, compactando o solo em 5 camadas utilizando diferentes energias de compactação, 25, 30 e 35 pancadas por camada de uma altura de queda de 457 ± 3 mm do compactador. O autor obteve ainda a curva de compactação pesada manual. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.5. É possível reparar que a curva de compactação Proctor pesada obtida pelo autor situa-se num patamar superior às diferentes curvas Marshall com qualquer energia de compactação.

Desta forma é possível questionar se o compactador Marshall compacta perto da compactação pesada ou da compactação leve.

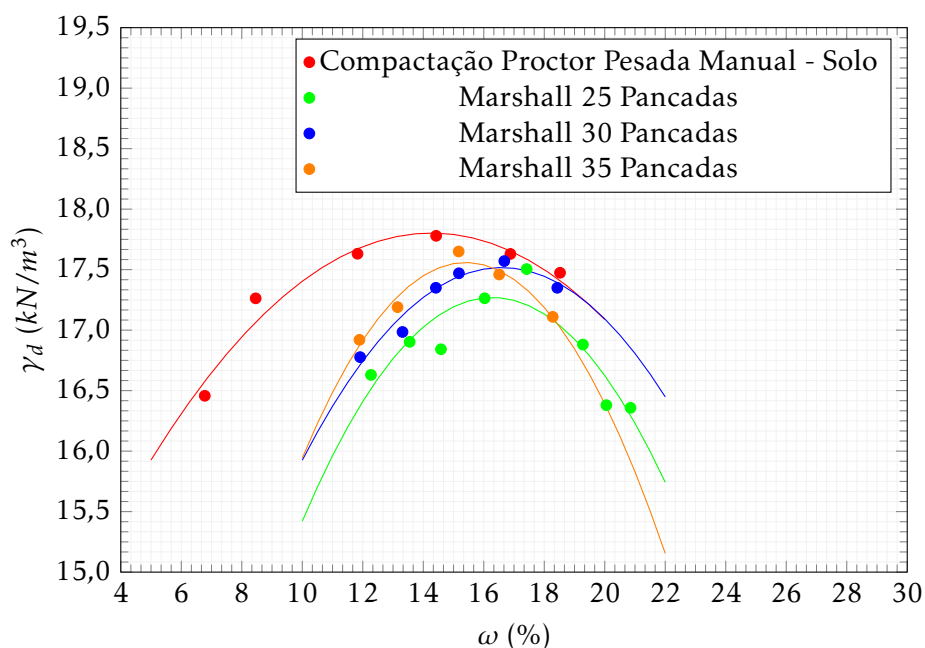


Figura 3.5: Curvas Proctor de Matos (2017)

Com o intuito de responder a esta questão foi determinada a curva Proctor correspondente à compactação leve. Segundo a especificação descrita na norma LNEC E 197-1966. Apesar da toma de solo não ser a mesma da do autor anterior, o solo foi retirado do mesmo local, à mesma profundidade, julgando-se adequado para o efeito de comparação pretendido.

A curva de compactação obtida, foi colocada na figura 3.5 obtendo-se a figura 3.6.

De acordo esta figura percebe-se que a curva de compactação Proctor leve obtida neste trabalho está mais afastada do conjunto das curvas resultantes do compactador Marshall do que a curva correspondente à compactação Proctor pesada. Pode-se assim concluir que compactando os provetes recorrendo ao compactador Marshall os resultados obtidos aproximam-se da compactação pesada.

De notar que a compactação com recurso ao compactador Marshall tem um ritmo de aplicação das pancadas diferente, assim como a área que entra em contacto com o solo colocado dentro do molde: no caso da compactação manual o pilão, que tem 50mm de diâmetro e as suas pancadas são distribuídas pela área total do provete, figura 3.7, é deixado cair e entra em contacto com o solo, no caso do compactador Marshall a sua área é definida quase pela totalidade da área do provete.

Dada a elevada quantidade de provetes a moldar, quer para os ensaios de compactação, quer para os ensaios de resistência à compressão, decidiu-se pela utilização do compactador Marshall disponível no DEC, daí o estudo sobre o comportamento do compactador servir para futuras ilações.

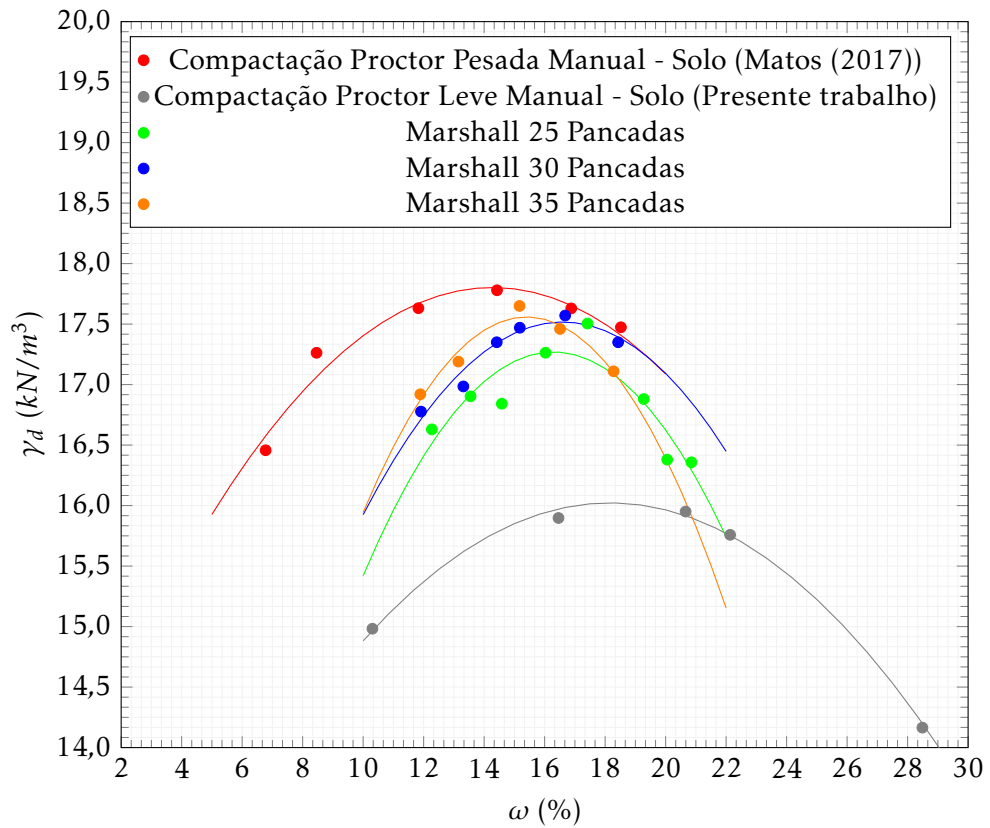


Figura 3.6: Curvas Proctor de Matos (2017) e compactação leve do presente trabalho

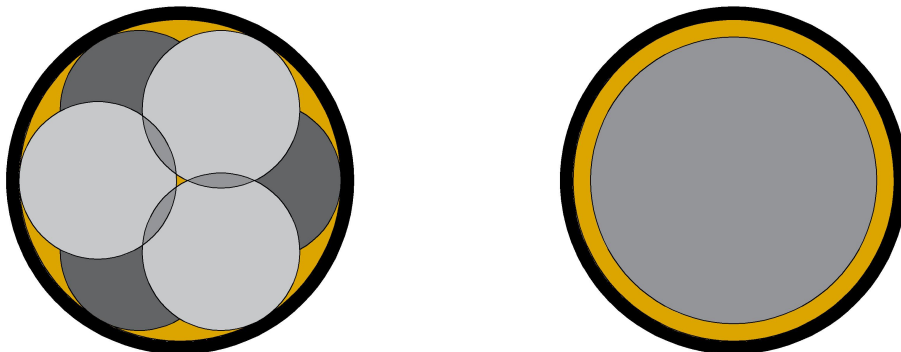


Figura 3.7: Esquema da compactação pesada e compactação mecânica

3.3.2 Compactação Proctor do Solo Ligado com Cimento

Para a caracterização das misturas, adotadas neste trabalhos, foi necessário fazer-se ensaios de compactação Proctor pesado manual para misturas de solo ligado com 4, 6 e 10% de cimento para determinar o teor em água ótimo e o peso volúmico seco máximo para cada mistura.

Para a preparação das misturas foi determinado o teor em água natural do solo de forma a determinar a quantidade de ligante a adicionar, visto que a percentagem de cimento é calculada em relação ao peso seco do solo. Determinadas as quantidades dos constituintes, foi misturado material suficiente para um ensaio, a mistura foi devidamente armazenada num tabuleiro metálico coberto por um pano para evitar a perda de humidade antes da compactação. O tempo que demorou a preparar o provete, mistura e compactação, foi sempre inferior a 1 hora, e segundo a ficha técnica do cimento este tem um princípio de presa a partir dos 75min, não oferecendo perigo. O restante procedimento foi realizado segundo a especificação descrita na norma LNEC E 197-1966.

As curvas obtidas para as misturas de solo ligado com 4, 6 e 10% de cimento estão representadas na figura 3.8. As tabelas A.4, A.5, A.6, A.7, A.8 e A.9, em apêndice, apresentam os dados que serviram de auxílio à realização da curva Proctor pesado 4%, 6% e 10%.

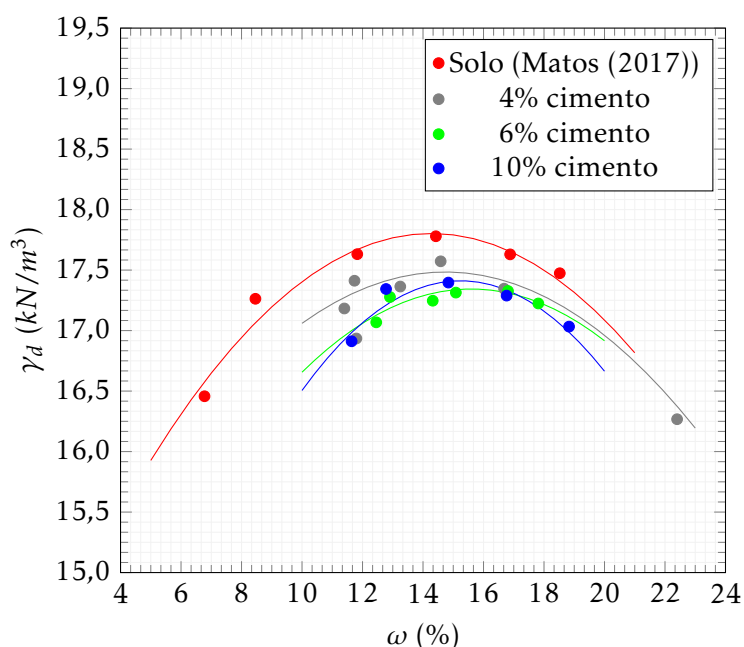


Figura 3.8: Curva Proctor pesado de Matos (2017) e curvas Proctor de 4%, 6% e 10%

Os valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água ótimo, constam na tabela 3.3, para as misturas de solo com 4, 6 e 10% de cimento.

Tabela 3.3: Valores de γ_d e ω_{opt} das misturas com 4%, 6% e 10%

	γ_d (kN/m ³)	ω_{opt} (%)
Solo	17,8	14,5
4%	17,5	15,0
6%	17,3	16,0
10 %	17,4	15,5

3.4 Moldagem dos Provetes

3.4.1 Pontos de Moldagem

Em face dos resultados das curvas de compactação obtidas anteriormente é necessário definir os pontos de moldagem a adotar para cada um das misturas. Estes pontos são definidos pelos valores γ_d e ω que irão apresentar os provetes a ser sujeitos aos ensaios de resistência à compressão.

Para a moldagem dos provetes optou-se por fixar o peso volúmico seco e fazer variar o teor em água, de maneira a perceber o papel da quantidade de água nas misturas de solo ligado com cimento.

Ao escolher os pontos de moldagem foi preciso ter em atenção os valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água ótimo, obtidos nos ensaios Proctor, tabela 3.3.

Optou-se por escolher pontos de moldagem entre $\pm 2\%$ do valor do teor em água ótimo normalmente preconizado em obra. Em face dos resultados obtidos considerou-se um teor em água ótimo médio de 15,5% para as três misturas, donde resultam dois pontos, um com teor em água de 13,5% e outro com 17,5%, para as três percentagens de cimento, como apresentado na tabela 3.4 e na figura 3.9

Em relação ao peso volúmico, optou-se por definir aquele que corresponde a cerca de 95% do peso volúmico seco máximo do seco.

Tabela 3.4: γ_d e ω dos pontos moldados

	γ_d (kN/m ³)	ω (%)
4%	17,0	13,5 17,5
6%	17,0	13,5 17,5
10%	17,0	13,5 17,5

Foram determinadas as percentagens do grau de saturação dos pontos de moldagem e adicionadas ao gráfico da figura 3.9 as curvas correspondentes a esse valor. Para o ponto de teor em água de 13,5% o grau de saturação resultante é de 64,0% e para o ponto de 17,5% o grau de saturação corresponde a 83,0%.

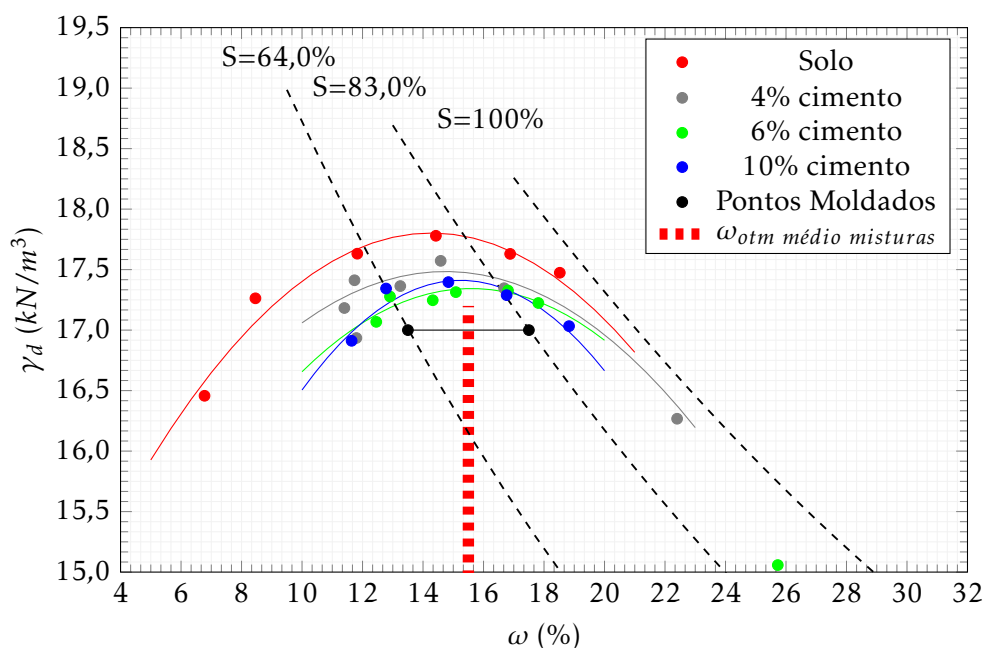


Figura 3.9: Localização dos pontos de moldagem

3.4.2 Procedimento

Como o peso volúmico seco é fixo para todas as misturas, a energia de compactação será variável de modo a obter $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$ para os diferentes teores em água requeridos. Assim, pôde ser utilizado o compactador Marshall sem qualquer calibração para estas misturas, pondo-o a funcionar até obter o γ_d desejado. Conhecidos γ_d e ω pretendidos para cada mistura, obtém-se facilmente o peso volúmico que a mistura deve ter no final. Para um molde de dimensões conhecidas é conhecido o peso total da mistura pretendida a colocar no molde. De modo a distribuir a energia de compactação o mais possível, foram utilizadas 5 camadas, com a mesma altura como representado na figura 3.10.

O procedimento passou por colocar 1/5 do peso de mistura estipulada para cada camada no molde, de 117mm de altura e 102mm de diâmetro, levá-lo ao compactador mecânico Marshall e compactar a mistura até que a altura da camada fosse 23,4mm. A distância entre a camada e o cimo do molde foram medidas com recurso a uma régua, por ser a forma mais prática de o fazer. A régua estava assinalada com as medidas pretendidas, sendo apenas necessário colocá-la dentro do molde e ver se correspondia ao desejado, figura 3.11.

As pancadas foram aplicadas de uma forma gradual. O primeiro provete a moldar de cada ponto de moldagem fez a calibração para os restantes, assim como a primeira camada fez a calibração para as outras camadas do mesmo provete.

Entre a compactação de cada camada foi ligeiramente escafiçada a superfície para favorecer a adesão entre camadas. Ao desmoldar o provete ao fim da última camada compactada a superfície estava ao nível da altura do molde, figura 3.12.

Para aplicar o procedimento de moldagem dos provetes, anteriormente descrito, é

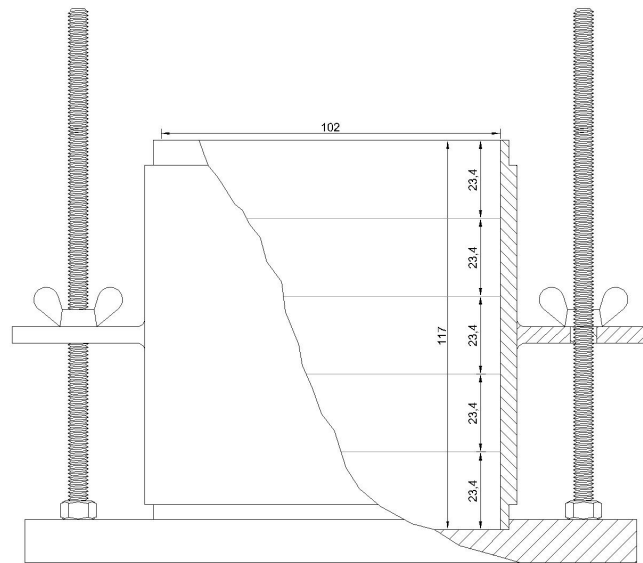


Figura 3.10: Esquema da altura das camadas



Figura 3.11: Medição da altura das camadas dos provetes

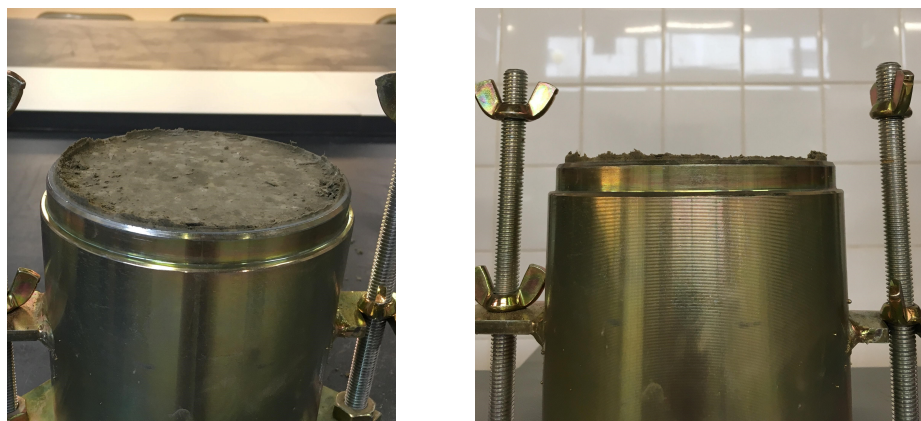


Figura 3.12: Proвете depois de compactado

necessário efetuar os cálculos, descritos em seguida. Serve a figura 3.13 de auxílio à explicação.

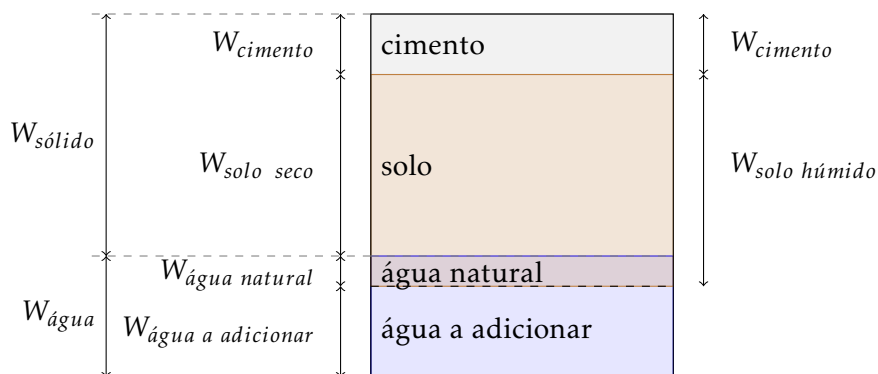


Figura 3.13: Diagrama das massas dos componentes da mistura

A massa de solo seco, $W_{solo\ seco}$, necessária a adicionar à mistura para provetes de peso volúmico seco, γ_d , pretendido é dada por:

$$W_{solo\ seco} = \frac{\gamma_d \times V}{1 + \%_{ci}} \quad (3.2)$$

em que V é o volume total do molde e $\%_{ci}$ é a percentagem de cimento. A expressão apresentada em 3.2 está demonstrada em II.1.

A quantidade de cimento, $W_{cimento}$, para cada mistura é determinada em função massa do solo seco:

$$W_{cimento} = \%_c \times W_{solo\ seco} \quad (3.3)$$

A mistura deve conter uma masa de água dada por:

$$W_{água} = \omega \times W_{sólido} \quad (3.4)$$

Para garantir o teor em água, ω , pretendido é preciso ter em conta o teor em água natural inicial do solo, $\omega_{natural}$, pelo que é necessário pesar uma quantidade inicial de solo húmido para obter o $W_{solo\ seco}$ pretendido:

$$W_{solo\ húmido\ a\ pesar} = W_{solo\ seco} + \omega_{natural} \times W_{solo\ seco} \quad (3.5)$$

em que $W_{solo\ húmido\ a\ pesar}$ é a soma da massa de solo seco, $W_{solo\ seco}$, e a massa de água natural, $W_{água\ natural}$.

No mesmo sentido, para obter a quantidade de água pretendida para misturar, $W_{água\ a\ misturar}$, tem que se ter em conta o $\omega_{natural}$ do solo pelo que a quantidade de água a adicionar ao $W_{solo\ húmido}$ é dada por:

$$W_{\text{água a adicionar}} = \omega \times (W_{\text{solo seco}} + W_{\text{cimento}}) - \omega_{\text{natural}} \times W_{\text{solo seco}} \quad (3.6)$$

De modo a verificar a veracidade dos cálculos feitos pode-se comparar o valor do peso volúmico total pois sabe-se que,

$$\gamma_{\text{Total}} = \left\{ \begin{array}{l} \gamma_d \times (1 + \omega) \\ \frac{W_{\text{Total}}}{V} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Tendo em conta as dimensões do molde, referidas anteriormente, as quantidades de solo, cimento e água são calculadas para cada provete, a partir das expressões:(3.2),(3.3) e (3.4),

No caso do presente estudo pretende-se fazer testes de compressão uniaxial o que significa que os provetes a compactar têm um volume total de $95,6 \times 10^4 \text{ mm}^3$.

As quantidades de solo, cimento e água foram calculadas para cada provete consoante as características requeridas, a tabela 3.5 resume as quantidades de material utilizado.

Tabela 3.5: Componentes da mistura

γ_d (kg/m^3)	1700					
ω (%)	13,5			17,5		
%cimento	4	6	10	4	6	10
$W_{\text{solo seco}}$ (g)	1562,76	1533,27	1477,52	1562,76	1533,27	1477,52
W_{cimento} (g)	62,51	92,00	147,75	62,51	92,00	147,75
$W_{\text{água}}$ (g)	219,41			284,42		
W_{Total} (g)	1844,68			1909,69		
γ (kg/m^3)	1929,50			1997,50		

Para efeitos práticos, em seguida é apresentada uma tabela com as dosagens de cada mistura em kg/m^3 .

Tabela 3.6: Dosagens da mistura

γ_d (kg/m^3)	1700					
ω (%)	13,5			17,5		
%ci	4	6	10	4	6	10
Solo (kg/m^3)	1634,62	1603,77	1545,45	1634,62	1603,77	1545,45
Cimento (kg/m^3)	65,38	96,23	154,55	65,38	96,23	154,55
Água (kg/m^3)	229,50			297,50		
Total (kg/m^3)	1929,50			1997,50		

As dosagens apresentadas representam a massa de solo, cimento e água que 1m^3 contém.

3.4.3 Cura

Ao fim da compactação, os provetes foram pesados com o molde, mas sem a alonga. Foram retirados do molde com o auxílio do extrator de provete, um macaco hidráulico. Após a pesagem e extração, os provetes foram imediatamente colocados em sacos plásticos selados e identificados com o nome código de cada provete.

Para a identificação dos provetes destinou-se que seriam catalogados com a forma Px - yc zw, onde o x representa o número do provete, y a percentagem de cimento e z o teor em água, por exemplo P1 - 4c 13,5w, ou seja, provete número um da mistura de solo com 4% de cimento e teor em água de 13,5%, figura 3.14.



Figura 3.14: Armazenamento e identificação dos provetes

Os provetes foram armazenados dentro de sacos plásticos para evitar variações significativas de teor em água, e colocados numa sala com condições térmicas controladas com humidade relativa de 43% a 26,3°C durante 7 dias.



Figura 3.15: Condições de cura dos provetes

Ao fim desse período foram pesados e medidos com o auxílio de um paquímetro, figura 3.16. Foram tiradas 6 medidas do diâmetro e 6 medidas da altura, tabelas A.10, A.11, A.12 e A.13 em Apêndice A, com o objectivo de se fazer a média e com esses valores calcular o novo volume do provete, pois devido à retração existem variações nas

dimensões do provete.



Figura 3.16: Medição da altura e diâmetro dos provetes

Determinadas as medidas do diâmetro médio e da altura média foram calculados os volumes que correspondem ao volume que o provete tinha após a cura, $V_{pós\ cura}$, tabela A.14 em Apêndice A.

3.5 Resistência à Compressão Uniaxial

3.5.1 Realização do Ensaio

A resistência à compressão simples do solo ligado com cimento é determinada em conformidade com a norma NP EN 13286-41: *Métodos de ensaio para a determinação da resistência à compressão de misturas tratadas com ligantes hidráulios*, CEN (2011).

Para os ensaios de compressão uniaxial foi utilizada a prensa Zwick do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, que se apresenta na figura 3.17.

Os provetes utilizados para este ensaio foram moldados como explicado anteriormente, tendo havido o cuidado de nivelar as faces horizontais, para que a carga seja distribuída uniformemente e aplicada no total da área, mesmo que esta situação não se verifique é precavida pelo facto de o prato superior ter uma rótula que permite que se ajuste ao topo do provete.

Segundo a norma NP EN 13286-41, a carga aplicada aos provetes deve ser feita de forma contínua e uniforme sem choque, de modo a que o colapso ocorra entre os 30 e 60 segundos a contar desde o início do ensaio, ou seja, desde o início da aplicação da carga ao provete. Foi assim adotada a mesma velocidade utilizada por Matos (2017), de 3mm/min, uma vez que se trata do mesmo solo base e de quantidades de cimento idênticas.

A resistência à compressão de cada provete é dada por:

$$R_c = \frac{F_{máx}}{A} \quad (3.8)$$



Figura 3.17: Prensa Zwick

onde,

- R_c é a resistência à compressão em MPa ;
- $F_{máx}$ é a força máxima aplicada ao provete em N ;
- A é a área da base do provete em mm^2 .

De acordo com a norma NP EN 14227-10: *Misturas tratadas com ligantes hidráulicos. Especificações. Parte10: Solo tratado com cimento*, CEN (2013) a resistência à compressão deve ser a média dos resultados obtidos em três provetes. Se algum desses valores tiver um desvio superior a 20% em relação ao valor médio, esse valor deve ser ignorado e a resistência à compressão passará a ser a média dos outros dois valores.

Para a análise dos resultados é apresentado na figura 3.18, a tracejado, um exemplo de um gráfico de tensão/deformação. A parte do gráfico correspondente ao instante inicial, está em destaque no canto superior direito, notando-se uma perturbação do seu andamento. Este comportamento é usual neste tipo de ensaios e deve-se à adaptação dos pratos da prensa quando é iniciado o ensaio.

Sendo assim, a fase de comportamento plástico considerada foi a fase após a perturbação, como ilustrada a curva a cheio na figura 3.18.

Para o efeito consideram-se dois pontos situados na fase de comportamento elástico, o primeiro, A, situado logo após a perturbação, e o ponto B um pouco depois, assim é possível determinar o ponto X, sendo este o ponto que dá seguimento ao segmento de reta definido po A e B, para o qual a tensão é nula.

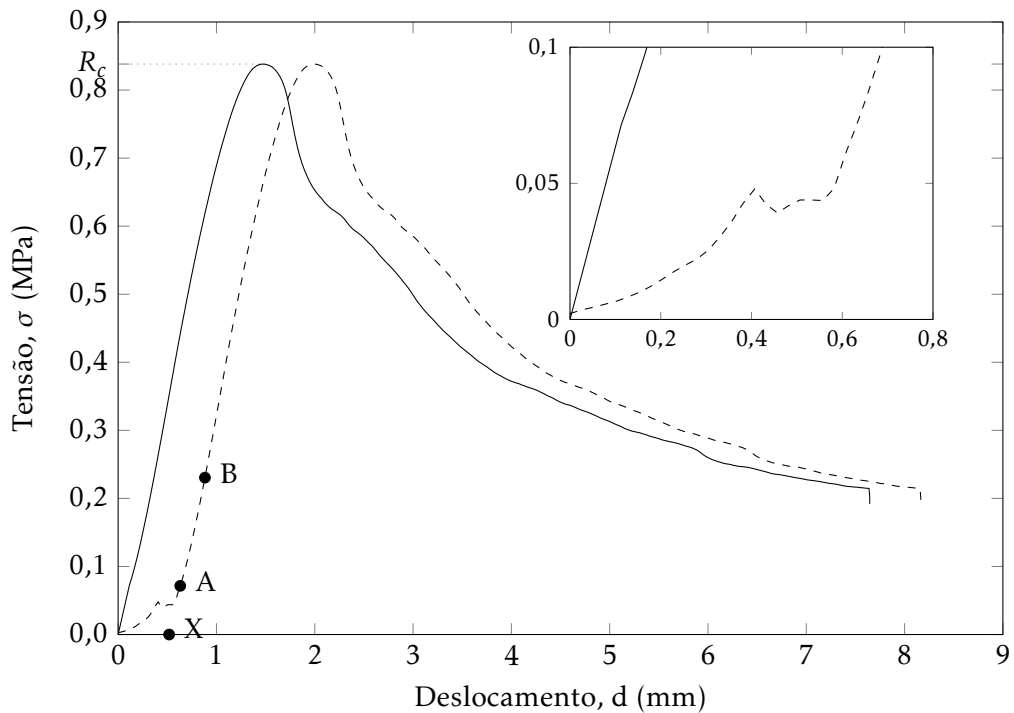


Figura 3.18: Exemplo de uma curva tensão/deslocamento

Para os pontos A e B da figura 3.18, sabemos que,

$$\frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} = \frac{B_y - 0}{B_x - X_x} \quad (3.9)$$

ou seja, facilmente são calculadas as coordenadas do ponto X. Ligando este ponto, por um segmento de recta, ao ponto A e admitindo todos os outros pontos a partir desse, fica definida a curva tensão/deformação corrigida.

Tendo o gráfico de começar no ponto (0 ; 0) basta subtrair a coordenada de X_x a todas as coordenadas x de todos os pontos que formam o gráfico, desta forma vai haver um deslocamento para a esquerda até à origem, curva a cheio na figura 3.18.

Os gráficos de tensão/extensão podem ser obtidos a partir dos de tensão/deformação. Para que isso aconteça basta que se divida a deformação pelo comprimento do provete, equação 3.10.

$$\epsilon = \frac{d}{h} \quad (3.10)$$

Em que:

- ϵ é a extensão;
- d é a deformação em mm;
- h é a altura do provete em mm.

Após os provetes terem sido ensaiados à resistência de compressão simples, foram retiradas amostras do provete de forma a determinar o teor em água e calcular os pesos volúmicos secos respetivos, tendo em conta as medições efetuadas antes do ensaio, referidas anteriormente. As tabelas A.15 a A.22 em Apêndice A, apresentam os valores determinados.

3.5.2 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é um parâmetro mecânico que permite a medição da rigidez de um certo material sólido. É uma propriedade intrínseca dos materiais que é obtida pelo quociente entre a tensão exercida e a extensão provocada. Este quociente retrata o declive que a reta que ajusta o desempenho inicial do provete faz.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.11)$$

Segundo a norma EN 13286-43: *Método de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade de misturas tratadas com ligantes hidráulicos* (2003) o valor do módulo de elasticidade é determinado pelo declive que essa reta faz quando se atinge 30% da força máxima exercida sobre o provete, figura 3.19.

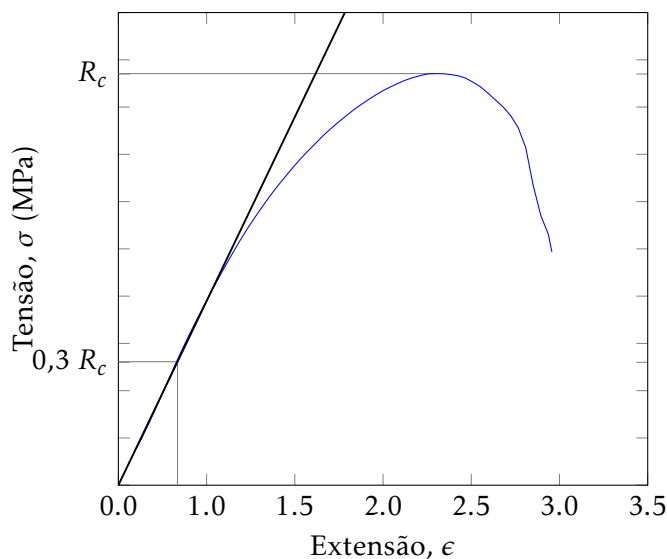


Figura 3.19: Exemplo do módulo de elasticidade

Assim sendo o módulo de elasticidade é dado por:

$$E_{30} = \frac{1,2F_{máx}}{\pi \times D^2 \times \epsilon_{0,3F_{máx}}} = \frac{0,3F_{máx}}{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \epsilon_{0,3F_{máx}}} = \frac{0,3F_{máx}}{A \times \epsilon_{0,3F_{máx}}} = \frac{0,3R_c}{\epsilon_{0,3F_{máx}}} \quad (3.12)$$

em que:

- E_{30} é o módulo de elasticidade para uma uma força $F = 0,3F_{máx}$ em MPa;

- $F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada ao provete em N;
- D é o diâmetro do provete ensaiado em mm;
- $\epsilon_{0,3F_{m\acute{a}x}}$ é a extensão do provete correspondente a uma força de $F = 0,3 F_{m\acute{a}x}$.

3.5.3 Aceitação dos Provetes

Como referido anteriormente, foram determinados os valores de peso volúmico seco e teor em água dos provetes, apresentados nas tabela 3.7. Com esta informação foi possível avaliar os provetes quanto à sua admissibilidade, ou seja, se podiam ser ou não alvo de estudo.

Tabela 3.7: Propriedades dos provetes depois da cura

$\%_c$	Provete	$W_{p\acute{o}s\ cura}$	$V_{p\acute{o}s\ cura}$	$\gamma_{p\acute{o}s\ cura}$	$\omega_{p\acute{o}s\ cura}$	$\gamma_d\ p\acute{o}s\ cura$
0	P1 - 0c 13,5w	1830,6	0,000954	19,19	13,3%	16,93
	P2 - 0c 13,5w	1827,6	0,000953	19,18	13,5%	16,90
	P3 - 0c 13,5w	1830,0	0,000952	19,23	13,3%	16,98
	P1 - 0c 17,5w	1897,4	0,000944	20,09	17,3%	17,12
	P2 - 0c 17,5w	1892,6	0,000954	19,83	17,3%	16,91
	P3 - 0c 17,5w	1900,5	0,000952	19,96	17,5%	16,99
4	P1 - 4c 13,5w	1810,4	0,000972	18,63	11,6%	16,69
	P2 - 4c 13,5w	1827,4	0,000958	19,08	13,1%	16,88
	P3 - 4c 13,5w	1830,0	0,000949	19,28	13,3%	17,01
	P1 - 4c 17,5w	1899,0	0,000958	19,86	17,3%	16,92
	P2 - 4c 17,5w	1896,0	0,000953	19,79	17,3%	16,88
	P3 - 4c 17,5w	1898,2	0,000956	19,76	17,4%	16,84
6	P1 - 6c 13,5w	1831,0	0,000947	19,33	13,7%	17,00
	P2 - 6c 13,5w	1833,9	0,000950	19,30	14,0%	16,93
	P3 - 6c 13,5w	1833,2	0,000951	19,27	13,7%	16,95
	P1 - 6c 17,5w	1887,7	0,000954	19,79	17,1%	16,90
	P2 - 6c 17,5w	1877,9	0,000957	19,63	16,7%	16,82
	P3 - 6c 17,5w	1916,4	0,000953	20,11	17,7%	17,09
10	P1 - 10c 13,5w	1837,2	0,000961	19,14	13,4%	16,87
	P2 - 10c 13,5w	1838,3	0,000959	19,15	13,3%	16,91
	P3 - 10c 13,5w	1839,7	0,000966	19,13	13,3%	16,89
	P1 - 10c 17,5w	1907,4	0,000962	19,82	17,4%	16,88
	P2 - 10c 17,5w	1910,3	0,000959	19,85	17,2%	16,93
	P3 - 10c 17,5w	1910,2	0,000957	19,97	17,1%	17,06

Os testes feitos aos provetes foram considerados admissíveis se cumprissem os seguintes requisitos:

1. Peso volúmico seco (γ_d) entre $\pm 1\%$;

2. Teor em água (ω) entre $\pm 0,5\%$;

Posto isto, os dados foram colocados no gráfico da figura 3.20, com vista a determinar a admissibilidade dos provetes.

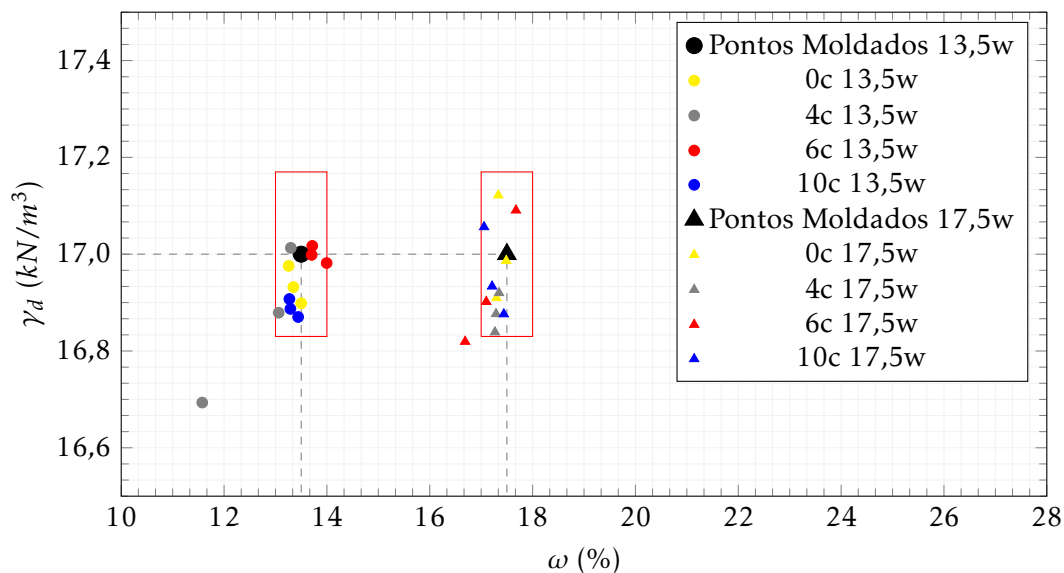


Figura 3.20: Pontos de Moldados após 7 dias de Cura

Os retângulos vermelhos representados na figura 3.20 marcam os limites que definem a admissibilidade dos provetes. O limite horizontal superior corresponde a 101% do peso volúmico seco adotado, ou seja, $17,17kN/m^3$. O limite horizontal inferior é de $16,83kN/m^3$ e corresponde a 99% do peso volúmico seco. Os limites verticais dos pontos com 13,5% são de 13% e 14%, enquanto que os de 17% têm como limite os 17% e 18% de teor em água.

Todos os pontos contidos nos retângulos a vermelho foram admitidos como aptos a serem alvo de estudo, sendo posto de parte todos aqueles que se encontravam no exterior dos retângulos.

Como se pode ver na figura 3.20, são dois os pontos que não cumprem os requisitos, um deles moldado com 13,5% de teor em água e 4% de cimento, P1-4c13,5w, e outro com um teor em água de 17,5% e 6% de cimento, P2-6c17,5w.

É preciso notar que mesmo não admitindo cada um destes provetes, os valores das resistências à compressão uniaxial médias entre os outros dois provetes com as mesmas características não diferiam entre si mais do que 20%

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e interpretados os resultados dos procedimentos experimentais realizados. Os valores estimados neste ensaio relacionados com os respectivos valores de teor em água, porosidade e quantidade de cimento permitem retirar conclusões em relação ao comportamento do material testado aquando aplicado em obra.

Esta análise inicia-se com a apresentação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples após um tempo de cura de 7 dias, na forma de gráfico tensão/extensão. Estes gráficos permitem estabelecer relações entre os provetes com diferentes teores de em água. Consequentemente são determinados os módulos de elasticidade para os provetes testados.

De seguida são estudados os fatores que influenciam a resistência à compressão uniaxial onde se enquadram o teor em água, porosidade, razão água cimento, razão entre o volume de vazios e o volume de cimento e a razão entre a porosidade e o índice volumétrico de cimento.

Por último, é apresentada uma proposta de método de dosagem de misturas de solo ligadas com cimento.

4.2 Características Mecânicas

4.2.1 Resistência à Compressão Uniaxial

Como mencionado anteriormente no subcapítulo 3.5, os valores das cargas aplicadas aos provetes e as deformações verificadas foram registadas durante o ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Com os dados fornecidos pela máquina de compressão e tendo calculado os valores da altura média e diâmetro médio, tabelas A.10, A.11, A.12 e A.13 e conseqüentemente calculadas as áreas, foram elaborados gráficos de tensão/extensão de cada provete como explicado no subcapítulo 3.5. Foram também realizados os mesmos ensaios para a mistura de solo com 0% de cimento para perceber a influência do teor em água na resistência à compressão simples sem qualquer adição de cimento.

Como referido anteriormente, nalguns casos foram admitidos apenas dois ensaios de resistência à compressão em vez de três, devido à falta de condições de aceitação.

Numa primeira análise geral de todos os valores de resistência à compressão, tabela 4.1 pode-se verificar que os provetes moldados com menor teor em água resistem mais ao esforço axial do que os provetes com maior teor em água. O menor teor em água corresponde aos 13,5% e encontra-se à esquerda do valor ótimo de teor em água do solo, lado seco, assim como de qualquer valor de teor em água ótimo das misturas de 4%, 6% e 10%.

Tabela 4.1: Resistência à compressão simples dos provetes

% _c	Provete	$h_{média}$ (mm)	$A_{média}$ (mm ²)	d (mm)	$F_{máx}$ (N)	ϵ_{R_c} (%)	R_c (MPa)	R_c médio (MPa)
0	P1 - 0c 13,5w	117,795	8097,48	2,46	4706,74	2,09	0,58	0,59
	P2 - 0c 13,5w	117,62	8101,73	2,29	4599,65	1,94	0,57	
	P3 - 0c 13,5w	117,59	8094,82	2,51	4955,78	2,13	0,61	
	P1 - 0c 17,5w	116,84	8083,40	3,95	3206,60	3,38	0,40	0,39
	P2 - 0c 17,5w	117,89	8093,76	4,09	3002,25	3,47	0,37	
	P3 - 0c 17,5w	117,91	8076,49	4,28	3169,50	3,63	0,39	
4	P2 - 4c 13,5w	117,29	8163,81	1,82	12990,95	1,55	1,59	1,55
	P3 - 4c 13,5w	116,86	8124,62	2,01	12330,10	1,72	1,52	
	P1 - 4c 17,5w	117,69	8138,74	2,32	11477,85	1,97	1,41	1,37
	P2 - 4c 17,5w	117,58	8106,26	2,34	10824,81	1,99	1,34	
	P3 - 4c 17,5w	117,79	8112,37	2,27	11086,76	1,93	1,37	
	6	P1 - 6c 13,5w	116,83	8108,65	1,85	13158,10	1,59	1,62
P2 - 6c 13,5w		117,10	8113,70	2,02	14761,80	1,72	1,82	
P3 - 6c 13,5w		116,89	8139,00	1,96	13956,80	1,68	1,71	
P1 - 6c 17,5w		117,33	8129,15	2,17	13676,80	1,85	1,68	1,71
P3 - 6c 17,5w		117,46	8112,64	2,11	14129,80	1,80	1,74	
10	P1 - 10c 13,5w	118,17	8129,68	1,93	18459,90	1,64	2,27	2,17
	P2 - 10c 13,5w	118,20	8114,77	2,03	18679,00	1,72	2,30	
	P3 - 10c 13,5w	118,72	8135,54	1,74	15866,40	1,47	1,95	
	P1 - 10c 17,5w	118,33	8132,87	2,37	15424,00	2,01	1,90	1,93
	P2 - 10c 17,5w	118,10	8119,83	2,28	15897,50	1,93	1,96	
	P3 - 10c 17,5w	117,96	8110,51	2,26	15654,60	1,91	1,93	

Na figura 4.1, são apresentados os resultados para 0%, 4%, 6% e 10% de adição de cimento.

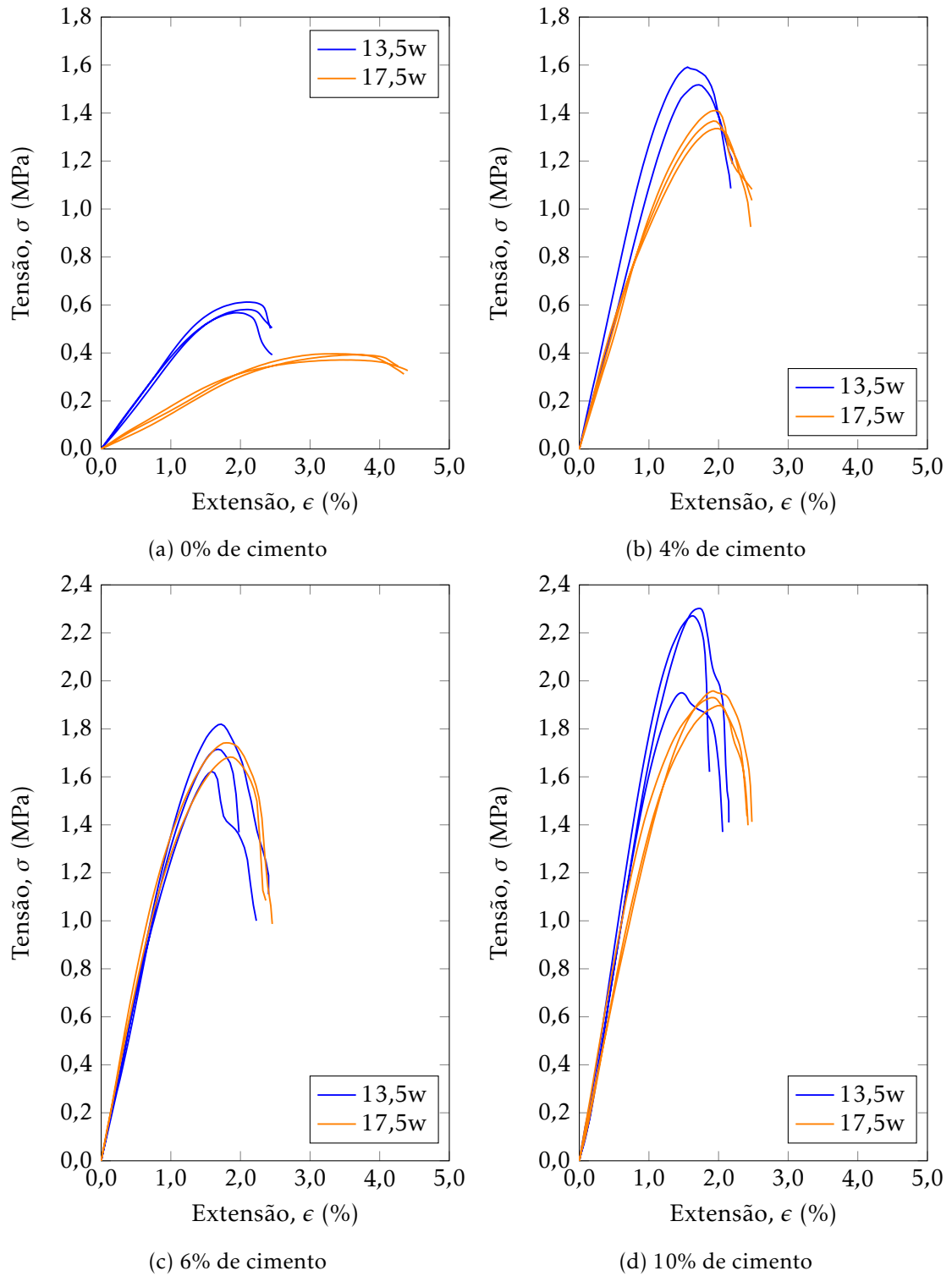


Figura 4.1: Tensão/extensão dos provetes

Comparando os resultados obtidos para ambos os teores em água, verifica-se que para os resultados obtidos para os provetes sem qualquer adição de cimento, 0% de cimento, são registados mais baixos valores de resistência à compressão para os provetes com 17,5% de teor em água.

Para todos os teores em cimento, a resistência é sempre mais elevada do lado seco ($\omega = 13,5\%$). Esta diferença é bem visível na figura 4.2 na qual estão sobrepostos os gráficos anteriores por cada teor em água ensaiado.

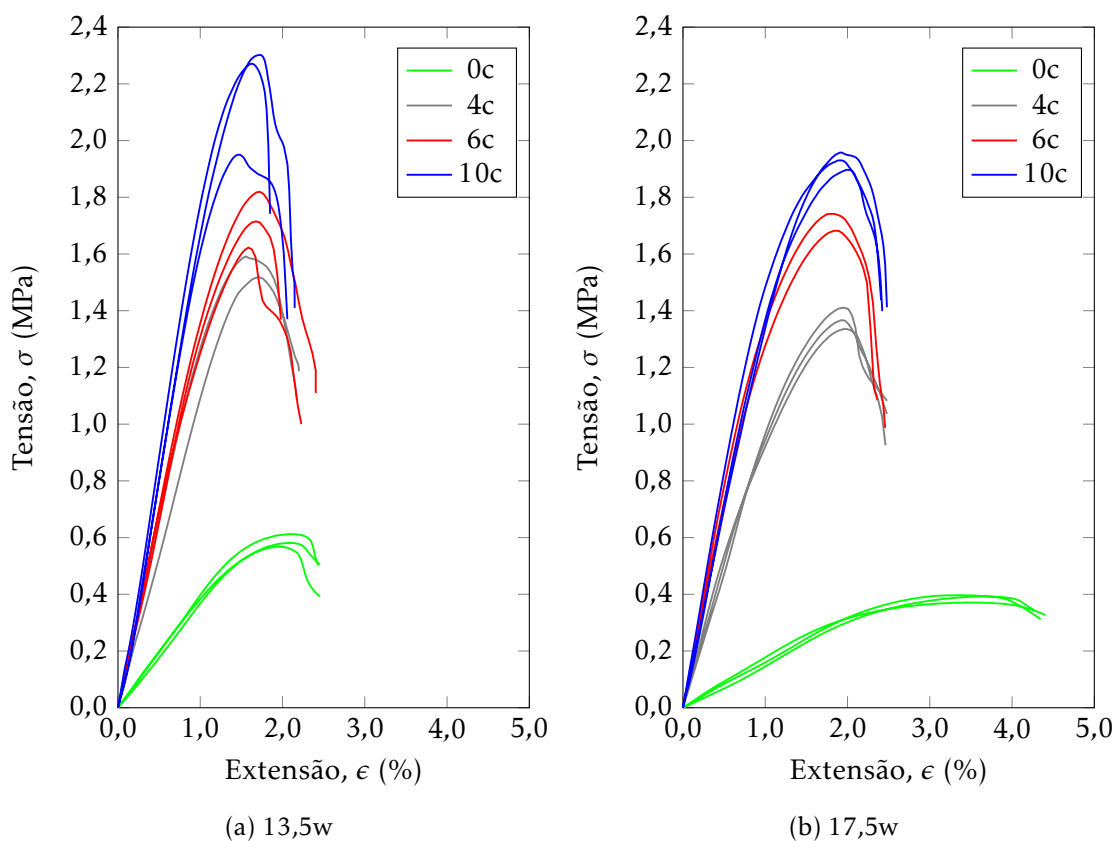


Figura 4.2: Tensão/extensão dos provetes consoante o teor em água

Visualmente conseguem-se distinguir os diferentes teores em cimento no caso do teor em água de 17,5% mas no caso dos provetes com 13,5% de teor em água, as curvas correspondentes aos diferentes teores em cimento não estão tão separadas indo ao encontro de Nusit et al. (2017) que afirma que a força de compressão uniaxial dos provetes moldados no lado seco não é determinada com precisão devido a complexos processos físico-químicos entre a água, o cimento e o solo.

Os valores de resistência à compressão média de cada provete deram o origem ao gráfico apresentado na figura 4.3 que ajudam a perceber o que foi descrito anteriormente. Os pontos com o mesmo teor em água foram unidos por retas.

Apesar de se verificar uma certa anomalia no resultado obtido para 6% de cimento com teor em água de 13,5%, a resistência à compressão continua a ser mais elevada nos provetes compactados do lado seco, para todas as percentagens de cimento.

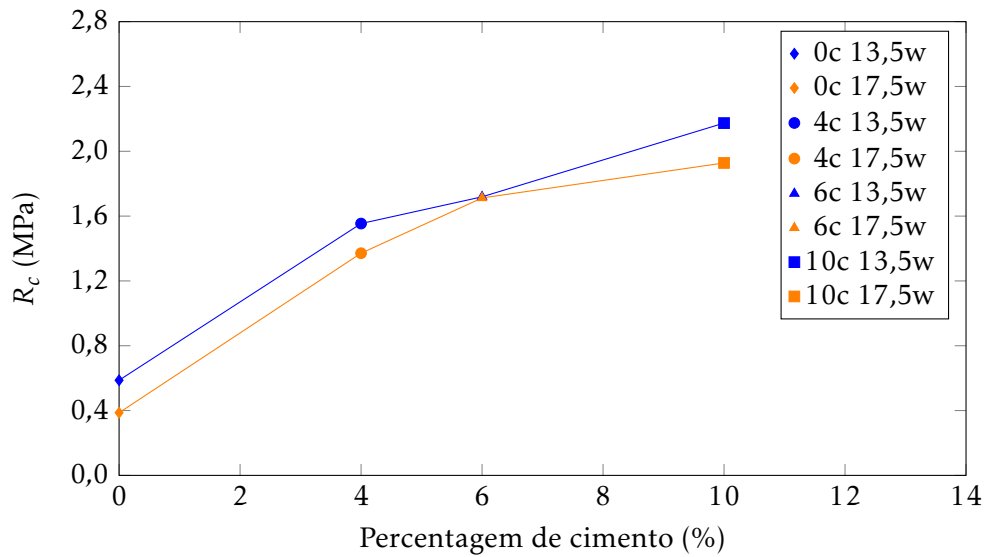


Figura 4.3: Resistência à compressão/porcentagem de cimento dos provetes

Por fim, é importante referir que a partir dos resultados obtidos neste ensaio, todos os provetes de solo ligado com cimento testados cumprem as recomendações da Estradas de Portugal, S.A. EP (2009), que estipulam que a resistência à compressão uniaxial deve ser superior a 1MPa.

4.2.2 Módulo de Elasticidade, E30

Como descrito no subcapítulo 3.5.2, os valores do módulo de elasticidade foram calculados tendo em conta a norma EN 13286-43: *Método de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade de misturas tratadas com ligantes hidráulicos* (2003), onde o módulo de elasticidade é determinado a 30% do valor da força máxima exercida. Os módulos de elasticidade dos provetes de solo ligado com cimento com quantidades de 0%, 4%, 6% e 10% são apresentados na tabela 4.2.

Os valores obtidos foram colocados num gráfico em função da resistência à compressão uniaxial, como se pode ver na figura 4.4. Foi traçada uma reta de ajuste aos pontos segundo uma regressão linear de onde se obteve um coeficiente de determinação, R^2 de 0,96.

Pode verificar-se que em ambos os casos (13,5% e 17,5% de teor em água) há uma tendência para um aumento de rigidez com o aumento da percentagem de cimento.

Tabela 4.2: Módulo de elasticidade dos provetes

% _c	Provete	R_c (MPa)	$0,3R_c$ (MPa)	$\epsilon_{0,3R_c}$ (%)	E_{30} (MPa)	$E_{30_{médio}}$ (MPa)	
0	P1 - 0c 13,5w	0,58	0,17	0,50	35,12	38,09	
	P2 - 0c 13,5w	0,57	0,17	0,43	40,02		
	P3 - 0c 13,5w	0,61	0,18	0,47	39,13		
	0	P1 - 0c 17,5w	0,40	0,12	0,73	16,28	16,21
		P2 - 0c 17,5w	0,37	0,11	0,61	18,23	
		P3 - 0c 17,5w	0,39	0,12	0,83	14,11	
4	P2 - 4c 13,5w	1,59	0,48	0,36	132,14	118,99	
	P3 - 4c 13,5w	1,52	0,46	0,43	105,84		
	4	P1 - 4c 17,5w	1,41	0,42	0,45	93,94	102,15
		P2 - 4c 17,5w	1,34	0,40	0,36	110,86	
		P3 - 4c 17,5w	1,37	0,41	0,40	101,65	
	6	P1 - 6c 13,5w	1,62	0,49	0,35	138,46	135,25
P2 - 6c 13,5w		1,82	0,55	0,39	138,42		
P3 - 6c 13,5w		1,71	0,51	0,40	128,88		
6		P1 - 6c 17,5w	1,68	0,50	0,34	147,61	153,22
		P3 - 6c 17,5w	1,74	0,52	0,33	158,83	
10	P1 - 10c 13,5w	2,27	0,68	0,40	172,27	161,58	
	P2 - 10c 13,5w	2,30	0,69	0,44	157,62		
	P3 - 10c 13,5w	1,95	0,59	0,38	154,85		
	10	P1 - 10c 17,5w	1,90	0,57	0,40	141,63	159,75
		P2 - 10c 17,5w	1,96	0,59	0,34	168,84	
		P3 - 10c 17,5w	1,93	0,58	0,34	168,79	

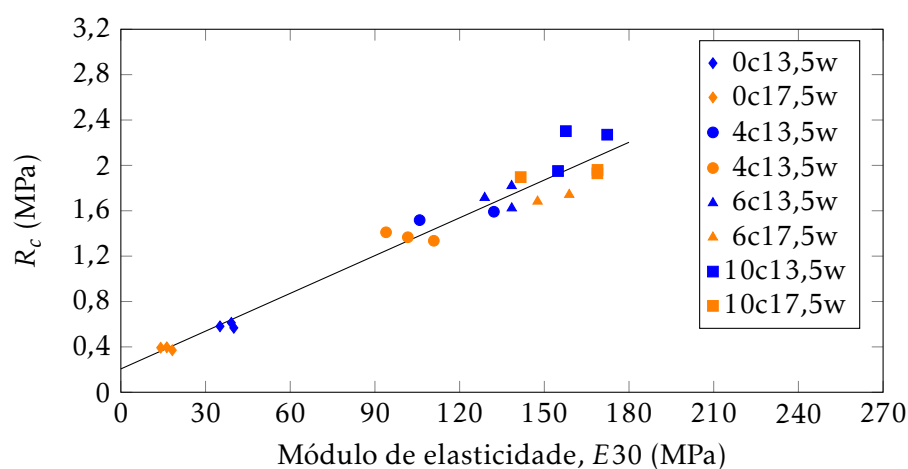


Figura 4.4: Resistência à compressão uniaxial/módulo de elasticidade

Tomando os resultados da média dos módulos de elasticidade, apresentados na tabela 4.2, foi feito um estudo consoante o teor em cimento e o teor em água, apresentado na figura 4.5.

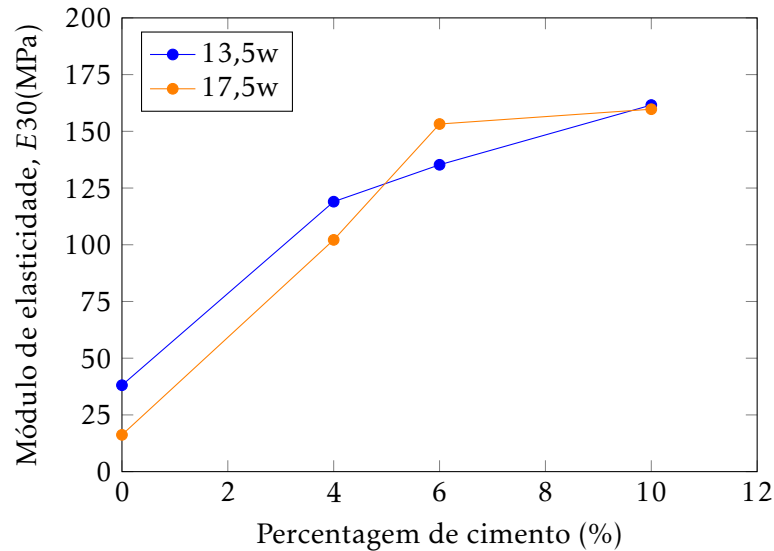


Figura 4.5: Módulo de elasticidade/percentagem de cimento

Como seria de esperar, para percentagens baixas de cimento, existe maior rigidez no caso dos provetes compactados do lado seco. Os valores obtidos para 6% de cimento, não estão de acordo com a tendência, tendo que ser analisados mais em pormenor.

Para os pontos do lado seco, ou seja, os com 13,5% de teor em água o módulo de elasticidade aumenta à medida que a percentagem de cimento aumenta, notando-se uma diminuição do declive desse aumento de ponto para ponto. Os pontos moldados com 17,5% de teor em água, lado húmido, seguem a mesma tendência com exceção feita para o valor correspondente a 6% como já referido.

Para 10%, os pontos com diferentes teores em água parecem tender para o mesmo valor de módulo de elasticidade. Percentagem mais elevada de cimento parece afastar o comportamento do material do que seria típico dos solos.

4.3 Fatores que Influenciam a Resistência Mecânica

4.3.1 Teor em Água

Com os valores dos teores em água e respectivas resistências à compressão dos provetes, tabelas A.23 e 4.1, foi elaborado o gráfico da figura 4.6 de modo a perceber a resposta da resistência consoante o teor em água dos provetes. Foi traçada uma reta a tracejado que indica o teor em água médio das misturas para se perceber de que lado, lado seco ou húmido, se encontram os pontos.

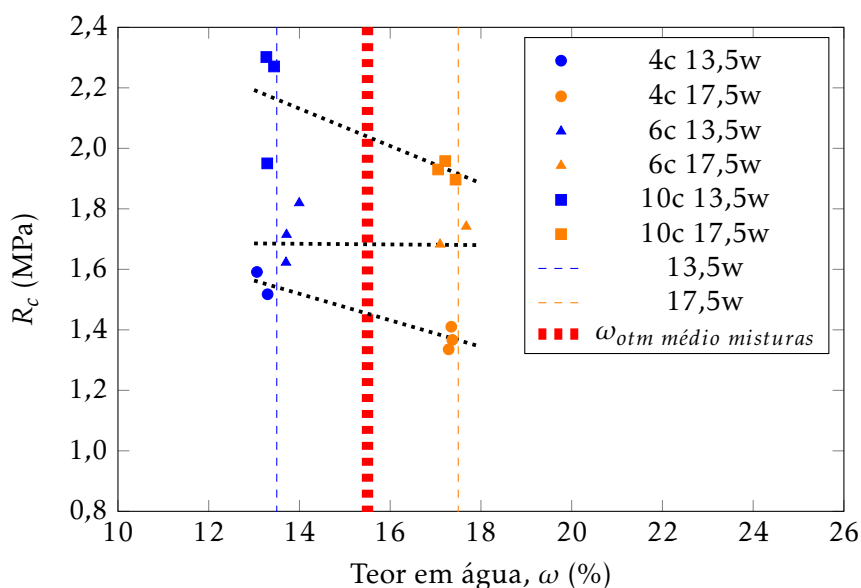


Figura 4.6: Resistência à compressão uniaxial/teor em água/

Para todas as quantidades de cimento estudadas os provetes com menor teor em água apresentam maior resistência mecânica, figura 4.6. No entanto, no caso do presente estudo como foram analisadas duas percentagens de teor em água, não é perceptível se o pico da resistência à compressão uniaxial aconteceria do lado seco, lado húmido ou para o teor em água ótimo.

4.3.2 Porosidade

Dado que neste trabalho se manteve constante o peso volúmico seco, resulta que a porosidade deve ser a mesma nos provetes para cada teor em cimento, como indicado pela expressão 4.1 cuja dedução é dada no Anexo II. A porosidade, n , para cada teor em cimento é dada por:

$$n = \frac{G_m \times \gamma_w - \gamma_d}{G_m \times \gamma_w} \quad (4.1)$$

é a densidade média das partículas sólidas o único fator influente na porosidade, de cada mistura para o caso do presente estudo.

Com base nas percentagens de cimento foi calculada a densidade média das partículas sólidas, G_m , e por conseguinte os valores da porosidade para cada provete tendo em conta o peso volúmico seco registado ao fim do tempo de cura de 7 dias, apresentados na tabela A.25 em Apêndice A.

Como os valores de porosidade obtidos e tendo em conta as porosidades teóricas, apresentadas na tabela A.24 em Apêndice A, foi traçado um gráfico que relaciona a porosidade com a resistência à compressão uniaxial dos provetes, figura 4.7.

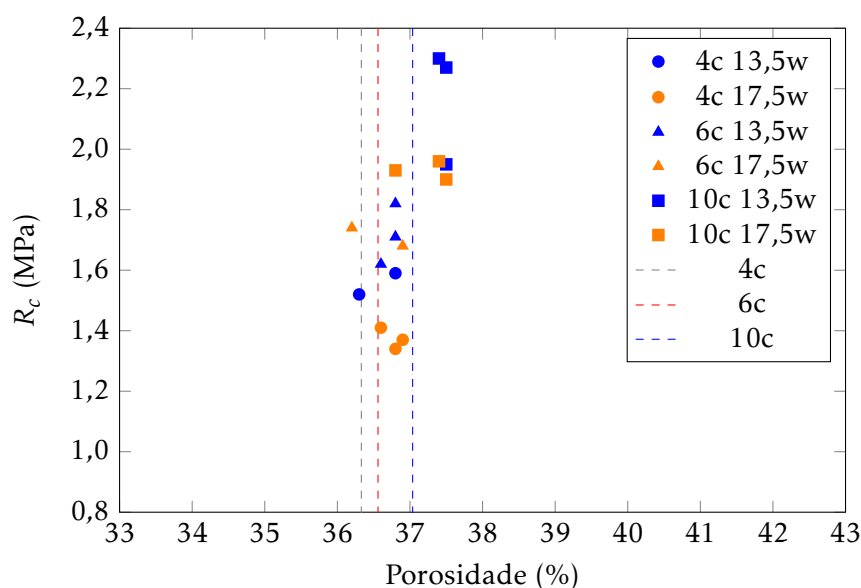


Figura 4.7: Resistência à compressão uniaxial/porosidade

A análise da porosidade acaba por não ser conclusiva, porque para os mesmos teores em água não existe grande variação de porosidade, não se conseguindo estabelecer qualquer relação.

4.3.3 Razão entre Água e Cimento, a/c

A razão água/cimento foi proposta em diversos trabalhos como referido em 2.5.3. Como nos estudos referidos, a viabilidade daquela relação não é aceite unanimemente para caracterizar as misturas de solo ligado com cimento, o presente trabalho decidiu avaliar este indicador. Como tal, para avaliar a razão entre a quantidade de água e a quantidade de cimento, a/c, foram calculadas as massas de água e as massas de cimento correspondentes a cada provete. Os valores são apresentados nas tabelas A.26, A.27 e A.28 em Apêndice A.

Estes valores foram colocados no gráfico da figura 4.8, para todas as misturas estudadas. Foi ainda traçada uma curva de ajuste aos pontos, observando-se que a resistência à compressão uniaxial diminui à medida que aumenta a relação água/cimento. A figura tem desenhadas três elipses que englobam os pontos conforme o seu teor em cimento. Se analisarmos uma elipse por si só, verifica-se para o mesmo teor em cimento, o teor em

água inferior é o que apresenta maiores valores de resistência à compressão, como já visto anteriormente.

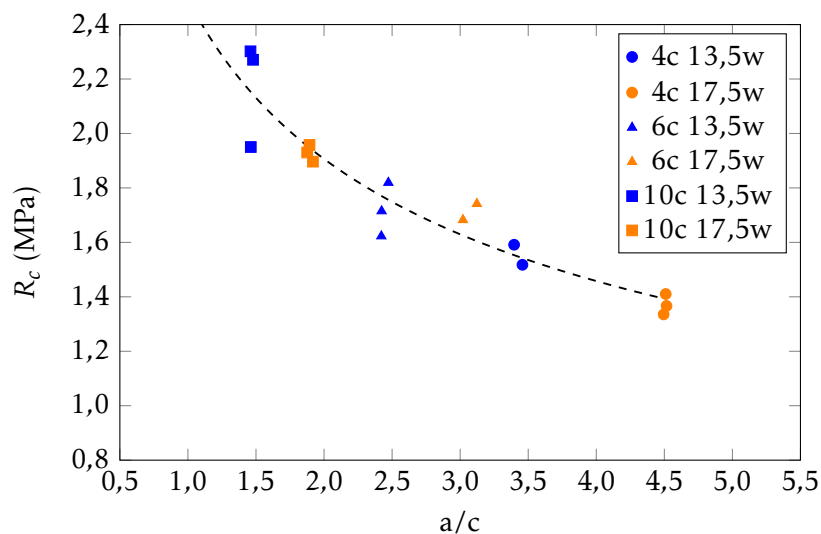


Figura 4.8: Resistência à compressão uniaxial/ a/c

Desta forma, conclui-se que existe uma relação entre a razão a/c e a resistência à compressão simples para os provetes com as características do presente trabalho, onde se variou o teor em água.

Na figura 4.9, apresenta-se um gráfico que relaciona o módulo de elasticidade com a razão a/c . Da observação do gráfico percebe-se que com o aumento da razão a/c o módulo da elasticidade diminui.

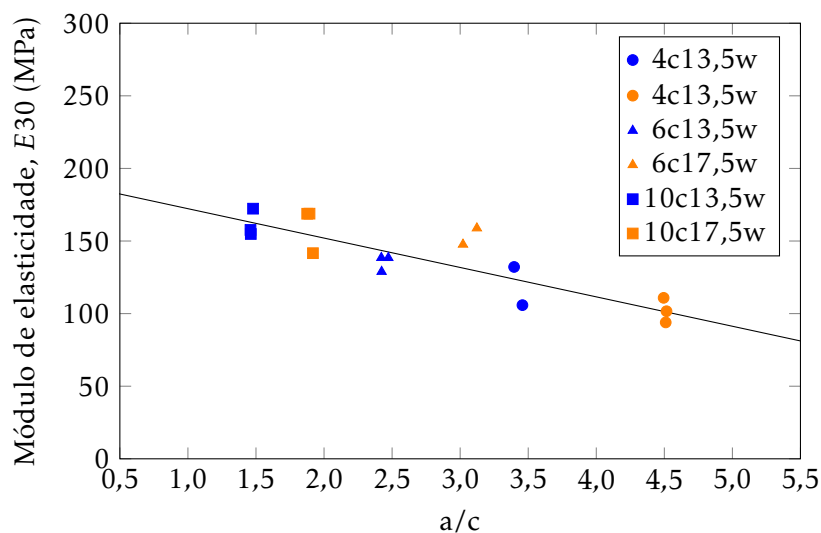


Figura 4.9: Módulo de elasticidade/ a/c

Comparando os mesmos valores com os de Matos (2017) e Gonçalves (2016), visto que os autores usaram o mesmo solo, mas outras energias de compactação, foram colocados os três conjuntos de pontos no gráfico da figura 4.10.

Nos trabalhos em questão, os pontos foram moldados com o mesmo teor em água, e diferentes pesos volúmicos secos, pelo que os seus pontos se encontram todos alinhados verticalmente, para cada teor em cimento estudado, diferente do que se observa nos pontos do presente trabalho. No entanto, é possível perceber que existe uma zona de tendência, representa a cinza na figura. Apesar disso, esta zona de tendência é ampla, o que dificulta aquando da avaliação deste tipo de misturas.

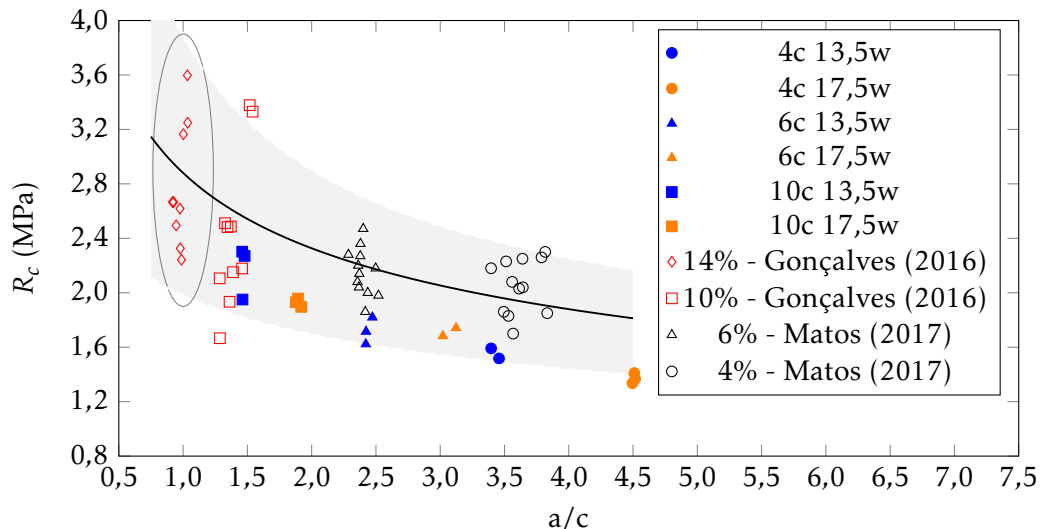


Figura 4.10: Resistência à compressão uniaxial/ a/c , Matos (2017), Gonçalves (2016) e presente trabalho

4.3.4 Volume de Vazios/Volume de cimento, V_v/V_{ci}

Como anteriormente referido, esta relação propõe-se correlacionar a resistência à compressão uniaxial com a razão entre os volumes de vazios e os volumes de cimento destes, V_v/V_c .

Esta razão é facilmente calculada recorrendo à expressão II.6 em Anexo I, os resultados da razão entre o volume de vazios e o volume de cimento para as misturas deste trabalho são apresentados nas tabelas A.26, A.27 e A.28 em Apêndice A.

Neste contexto, foi construído o gráfico da figura 4.11, que relaciona a resistência à compressão com a razão V_v/V_c obtida para cada mistura. As curvas de aproximação foram traçadas de forma a ajustar os pontos com o mesmo teor em água, 13,5% e 17,5%.

Da análise da figura anterior, retira-se que a curva correspondente ao menor teor em água é a que apresenta maiores valores de resistência como já referido.

Dado que os provetes foram moldados com o mesmo peso volúmico, isto implica que o volume de vazios é, praticamente o mesmo, como referido para a porosidade. Mas, neste caso, como se divide pelo volume de cimento, a razão V_v/V_c varia, podendo obter-se curvas de correlação para cada teor em água estudado.

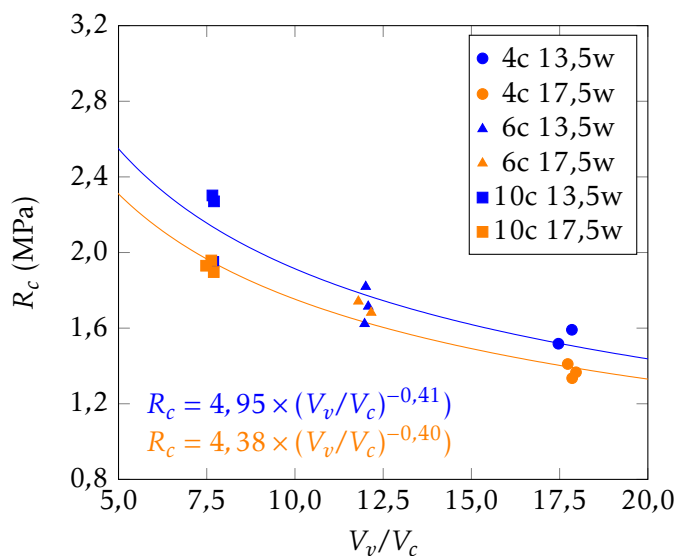


Figura 4.11: Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c

Novamente foram adicionados os valores de Matos (2017) e Gonçalves (2016) aos do presente estudo, tendo sido traçadas três curvas de ajuste, recorrendo ao software Matlab, uma que ajusta os pontos dos outros autores, a traço cheio, uma que ajusta os pontos dos três trabalhos, curva a traço interrompido e uma que ajusta apenas os pontos do presente trabalho, curva a traço-ponto, figura 4.12.

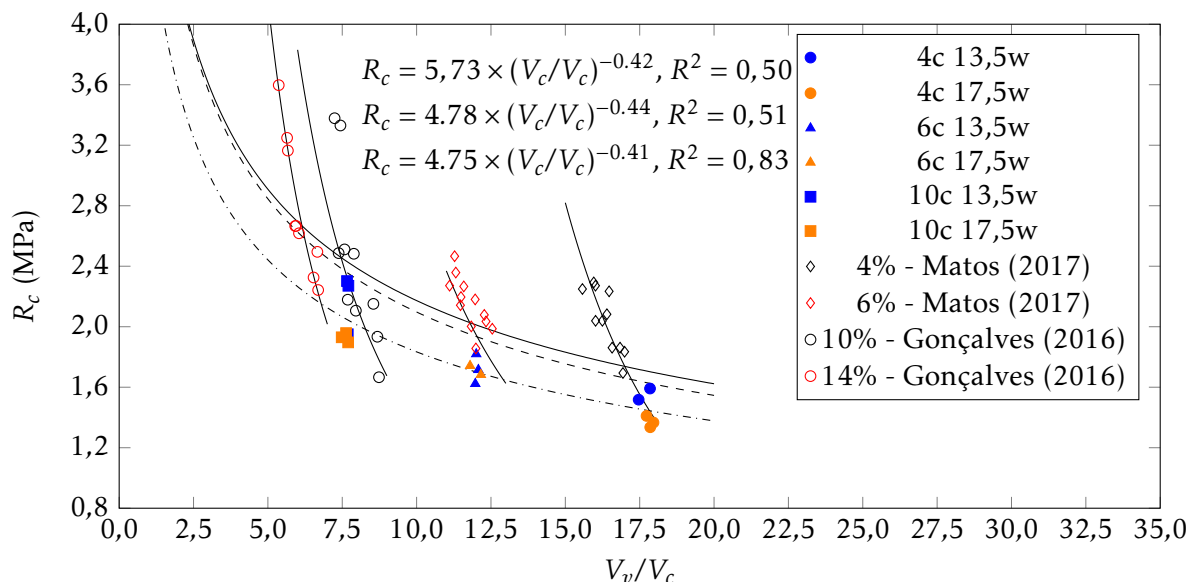


Figura 4.12: Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c , Matos (2017), Gonçalves (2016) e presente trabalho

Para a análise da figura é preciso notar que os provetes dos autores mencionados foram moldados segundo uma linha vertical, enquanto que os do presente trabalho foram

moldados segundo uma linha horizontal. Como tal, ao investigar a junção dos três conjuntos de pontos percebe-se que a curva resultante está mais próxima da curva de tendência dos pontos moldados na linha vertical do que da linha horizontal.

A figura 4.13 representa a figura 2.16 tendo sido acrescentada a curva de tendência do presente estudo. Os valores estudados situam-se numa faixa estreita de V_v/V_c , não se conseguindo tirar conclusões em comparação à grande amostragem dos outros trabalhos.

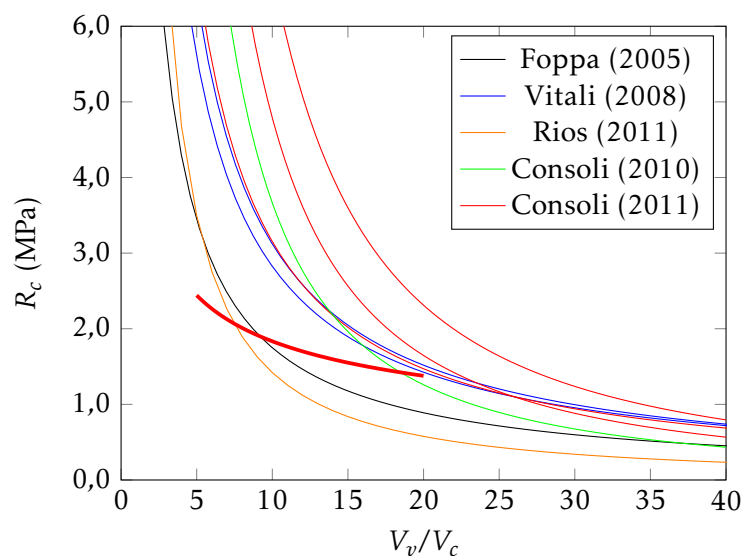


Figura 4.13: Resistência à compressão uniaxial/ V_v/V_c , comparação

4.3.5 Índice Volumétrico de Cimento

Este parâmetro de avaliação baseia-se na razão V_v/V_c , à qual se divide o numerador e o denominador pelo volume total do provete, resultando no coeficiente entre a porosidade, n , e o volume de cimento enquanto percentagem do volume total, Civ .

Os valores de n e Civ foram calculados para cada provete testado e encontram-se nas tabelas A.26, A.27 e A.28 apresentadas em Apêndice A. Para obter uma curva do tipo das obtidas por outros autores: $R_c = A(n/Civ^p)^B$. O expoente p , com o auxílio do software Matlab, que deve ser calculado de forma a que o coeficiente de determinação da reta de ajuste dos pontos n/Civ^p seja máximo. A curva que melhor ajusta o conjunto dos pontos é dada pela equação $R_c = 4,756 \times x^{-0,413}$, como representado na figura 2.16 com um coeficiente de determinação de 0,83. O valor de p que leva à melhor curva de tendência é 1.

Comparando mais uma vez com os estudos elaborados no departamento de engenharia civil da FCT/UNL foi determinada uma única curva para o solo em estudo. Juntando os pontos de Matos (2017), Gonçalves (2016) e os do presente trabalho. Para os três trabalhos foi calculado um valor de p de 0,18, diferindo dos valores assumidos por Matos (2017) de, 0,16 e por Gonçalves (2016) de, 0,21. A figura 4.15 contém todos os pontos mencionados anteriormente, assim como a recta de ajuste, para a qual se obteve $R^2 = 0,69$.

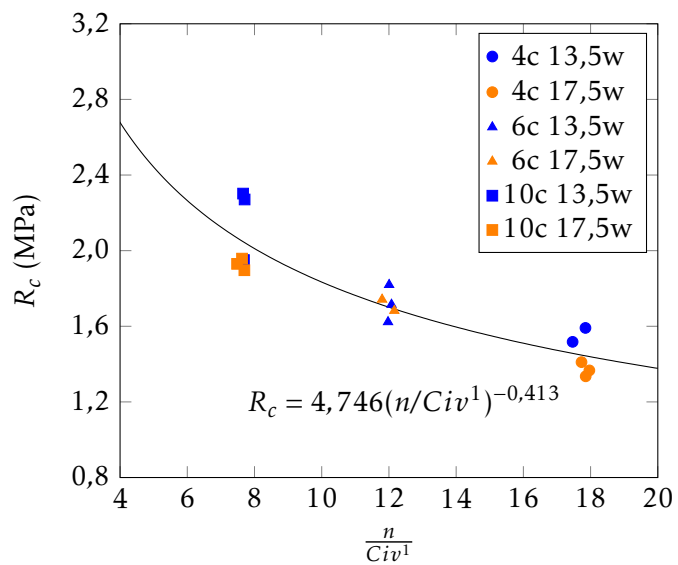


Figura 4.14: Resistência à compressão uniaxial/ $\frac{n}{Civ^1}$

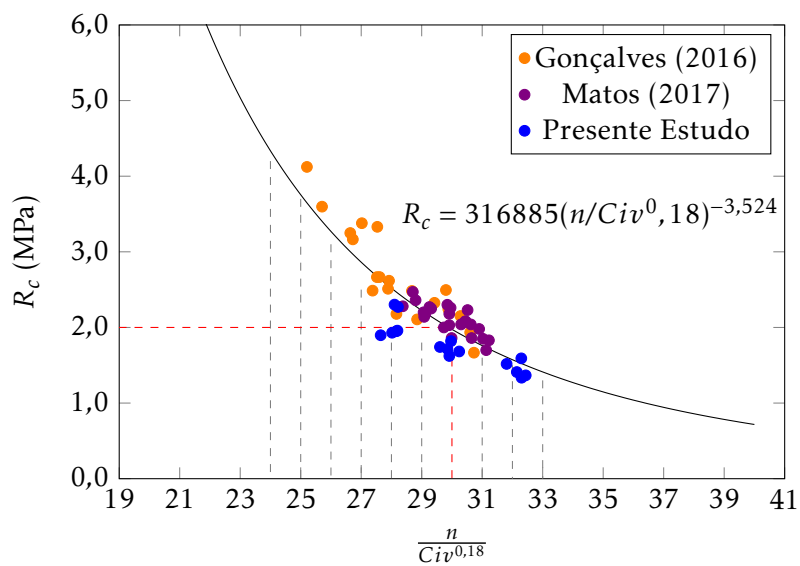


Figura 4.15: Resistência à compressão uniaxial/ $\frac{n}{Civ^{0,18}}$

A observação desta figura permite constatar a utilidade da curva traçada, dado que apresenta um valor de coeficiente de determinação mais elevado comparando com a curva resultante da razão V_v/V_c .

4.4 Estabelecimento de Dosagens

Para o estabelecimento das dosagens dos componentes de misturas de solo ligado com cimento, recorre-se à avaliação da resistência à compressão uniaxial, tendo em conta a obra e correspondentes características mecânicas exigidas do material em questão. A análise relativa ao teor em água de compactação da mistura revela a importância de se compactar do lado seco ou lado húmido, obtendo-se neste último caso, menores resistências e maiores deformabilidades.

Relativamente à relação a/c , os resultados obtidos para o solo estudado mostram que é possível utilizar a figura 4.8 para prever que é possível a resistência à compressão de misturas com diferentes teores em água dos teores analisados e diferentes teores em cimento, tendo apenas em conta o ponto anterior, isto é, que características de resistência e de deformabilidade se pretendem.

Os resultados deste trabalho em função de V_v/V_c não permitem a utilização deste parâmetro só por si para o estabelecimento de dosagens. De facto, pode ser utilizada a figura 4.11, mas em conjunto com o conhecimento do teor em água, dado que este teor é independente do volume de vazios.

Esta limitação é reforçada com a análise da figura 4.12, em que os resultados de Gonçalves (2016) e Matos (2017), por se terem mantidos teores em água constantes, obtêm diferentes valores de resistência à compressão uniaxial para a mesma percentagem de cimento e V_v/V_c idêntico.

O indicador n/Civ^p permite igualmente, a determinação de dosagens embora de forma não imediata. Assim é sugerido o ábaco apresentado na figura 4.16.

À imagem do que foi descrito no subcapítulo 2.6.2, foram calculados os valores de $n/Civ^{0,18}$ entre 24 e 33. Com base na curva determinada anteriormente, 4.15 e na equação,

$$\frac{n}{Civ^{0,18}} = \frac{\frac{G_m \times \gamma_w - \gamma_d}{G_m \times \gamma_w} \times 100}{\left(\frac{\gamma_d \times \%c_i \times 100}{3150 \times (1 + \%c_i)} \right)^{0,18}} \quad (4.2)$$

obtiveram-se diferentes combinações de peso volúmico seco e percentagens de cimento, obtendo-se o gráfico da figura 4.16.

O método de dosagem proposto consiste na utilização combinada entre o indicador n/Civ^p da figura 4.15 e a figura 4.16. Deste modo, o procedimento seria recorrer ao gráfico da figura 4.15 e escolher a resistência à compressão desejada para a obra em causa e ver qual o valor de n/Civ^p a que corresponde. Tendo esse valor utiliza-se o ábaco da figura 4.16 para a obtenção da energia de compactação necessária (peso volúmico

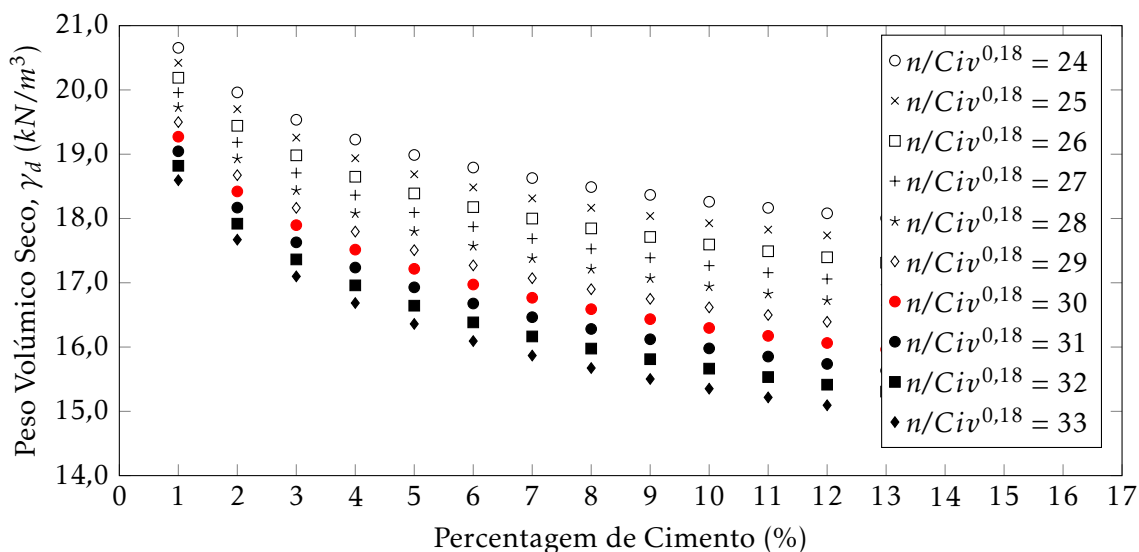


Figura 4.16: Estabelecimento de dosagens

seco) para qualquer percentagem de cimento de modo a obter o valor de resistência à compressão uniaxial pretendido.

Se por exemplo se pretender uma resistência à compressão uniaxial de 2MPa, o valor de $n/Civ^{0,18}$ correspondente é de 30 (figura 4.15). Utilizando a figura 4.16 para o valor de 30 existem várias combinações de peso volúmico seco e percentagens de cimento que se enquadram no requisito.

Por exemplo adaptando as dosagens do presente trabalho, tem-se que para obter 2MPa de resistência à compressão teriam que ser utilizadas energias de compactação correspondentes a $\gamma_d = 17,8kN/m^3$ para 4%, $\gamma_d = 17kN/m^3$ para 6% e $\gamma_d = 16,5kN/m^3$ para 10%.

No entanto, como ficou comprovado neste trabalho, os valores de resistência à compressão são diferentes para um mesmo peso volúmico seco, consoante o teor em água de compactação. Pelo que os teores em água das misturas não podem ser ignorados.

Nota-se ainda que do gráfico da figura 4.16 não resultam valores de peso volúmico seco, percentagem de cimento e resistência à compressão idênticos aos obtidos no presente trabalho, visto que ele foi construído com um índice $Civ^{0,18}$ conjunto dos três trabalhos realizados no DEC.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo determinar de que forma a variação do teor em água em misturas de solo ligado com cimento influencia as suas propriedades mecânicas.

Para o efeito, deu-se continuidade aos trabalhos anteriormente realizados com o mesmo solo, utilizando ainda percentagens de cimento idênticas 4%, 6% e 10% de cimento, determinadas a partir da massa do solo seco. Enquanto nos trabalhos anteriores os provetes foram todos moldados com o mesmo teor em água, situando-se os pontos de moldagem numa linha vertical no gráfico, os provetes estudados neste trabalho foram moldados tendo em conta uma linha horizontal do gráfico peso volúmico seco/teor em água, significando que o peso volúmico seco se manteve. Os teores em água escolhidos foram de 13,5% e 17,5%, um ponto do lado seco e outro do lado húmido para um peso volúmico de $17kN/m^3$.

Relativamente aos trabalhos anteriores realizados no DEC foi realizada uma nova calibração do compactador Marshall, tendo-se concluído que compactando os provetes com o compactador Marshall, os resultados obtidos estão muito mais próximos de compactação pesada do que da compactação leve (para molde Proctor pequeno).

Para os provetes compactados do lado seco foram registados maiores valores de resistência à compressão uniaxial em comparação com os do lado húmido, para as percentagens de cimento mais baixas. Existe uma discrepância nos valores de 6% de cimento. Quando analisado o módulo de elasticidade, o valor obtido para 6% e teor em água igual a 17,5% é o que apresenta discrepância. Valores de resistência mais elevados do lado seco são característicos dos solo compactados, por isso, acontecem neste trabalho para baixas percentagens de cimento.

Relativamente ao módulo de elasticidade é constatado que para percentagens baixas

de cimento existe maior rigidez no caso dos provetes compactados do lado seco. Este comportamento é também verificado nos solos compactados.

Os trabalhos publicados na bibliografia sobre a variação do teor em água, estes referem por vezes um pico de resistência para determinado valor de teor em água um pouco depois do teor ótimo, decrescendo a seguir. Neste trabalho, não foi possível determinar nenhum pico de resistência à compressão com a variação do teor em água, dado a terem-se estudado apenas um ponto do lado seco e um do lado húmido.

A análise da porosidade mostrou não ser conclusiva, uma vez que os provetes estudados foram compactados com o mesmo peso volúmico seco.

Em relação à influência da razão água/cimento nas características mecânicas, conclui-se que existe um aumento da resistência à compressão uniaxial com a diminuição da razão água cimento, tendo-se obtido mesmo uma curva de tendência. Para o módulo de elasticidade, observa-se uma variação linear.

Do estudo da razão entre o volume de vazios e o volume de cimento, conclui-se mais uma vez que valores de resistência à compressão são mais baixos quando o teor em água de compactação se encontra do lado seco.

O estudo da viabilidade do índice volumétrico de cimento proposto por outros autores, foi analisado neste trabalho tendo-se obtido o valor de $p = 1$ para o expoente do índice volumétrico de cimento. No entanto, estes diferentes índices p obtidos pelos diferentes autores, faz depender os resultados obtidos do tipo de solo utilizado, não sendo aplicável qualquer extrapolação de resultados.

Finalmente foram analisados e sugeridos métodos de dosagens, tendo em conta os resultados obtidos neste trabalho. É ainda sugerido um gráfico que complementa a forma de dosagem utilizando n/Civ de modo a facilitar a leitura e determinação das quantidades de cimento necessárias.

É possível constatar através dos resultados de resistência e deformabilidade obtidos que é possível propor um método de dosagem do cimento a utilizar no campo, sendo apenas necessário fazer-se ensaios de compactação do solo a tratar.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

De seguida apresentam-se os desenvolvimentos futuros sugeridos no âmbito sequencial do presente estudo.

Seria de todo o interesse fazer um estudo idêntico ao aqui apresentado mas para outros teores em água para que se reunissem todos os pontos considerados e fosse possível ter uma melhor visão da influência do teor em água.

Em primeiro lugar propõe-se o estudo do mesmo solo utilizado submetido à mesma bateria de ensaios realizados na presente investigação, onde variariam os tempos de cura, por exemplo 7 dias e 28 dias com o objetivo de perceber a evolução das propriedades dos provetes, uma vez que o cimento utilizado ao fim dos 28 dias regista maiores valores de resistência à compressão.

Outra sugestão é a realização de um estudo com substituição de finos, onde se substitua o solo pelo cimento ao invés da adição, para evitar afetar a curva granulométrica e poder comparar com outros trabalhos onde é realizada esta substituição.

Recomenda-se também o desenvolvimento do complemento ao estabelecimento de dosagens sugerido na presente dissertação, partindo do mesmo de forma a chegar às resistências do solo trabalhado no presente estudo.

Por fim, também é relevante perceber qual a importância das propriedades do solo neste tipo de estudo alargando-se a análise a outros tipos de solo.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO M145-42 (1991). “Standard specification for classification of soils and soil - aggregate mixtures for highway construction purposes”. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- Al-Homidy, A. A., M. H. Dahim e A. K. Abd El Aal (2017). “Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust”. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9.4, pp. 749–760. ISSN: 16747755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.012.
- Amir-Faryar, B., K. E. Suter e R. E. Finnen (2017). “Strength of Cement Treated Piedmont Residual Silty Soils”. *Geotechnical and Geological Engineering* 35.4, pp. 1819–1830. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-017-0211-2.
- Asgari, M. R., A. Baghebanzadeh Dezfouli e M. Bayat (2013). “Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime”. *Arabian Journal of Geosciences* 8.3, pp. 1439–1452. ISSN: 1866-7511, 1866-7538. DOI: 10.1007/s12517-013-1173-1.
- ATIC (1993). “Associação Técnica da Indústria do Cimento”.
- Bahar, R., M. Benazzoug e S. Kenai (2004). “Performance of compacted cement-stabilised soil”. *Cement and Concrete Composites* 26.7, pp. 811–820. ISSN: 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
- Bitir, A.-C. e N. Bo (2016). “Influence of the water cement ratio on the unconfined compressive strength of a romanian silt treated with Portland cement”. 62, p. 11.
- Cancian, M. A., V. A. Cancian, R. S. Teixeira, H. B. Fontenele e C. J. M. Da costa Branco (2017). “Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação da mistura solo-cimento em pavimento rodoviário”. *TRANSPORTES* 25.1, p. 41. ISSN: 2237-1346. DOI: 10.14295/transportes.v25i1.1126.
- CEN (2003a). “EN 13286-43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures”.
- (2003b). “NP EN 1008: Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para fabrico de betão”.
- (2011). “NP EN 13286-41: Método de ensaio para a determinação da resistência à compressão para misturas tratadas com ligantes hidráulicos”.

- CEN (2012a). “NP EN 13286-50: Método de fabrico de provetes de misturas tratadas com ligantes hidráulicos por compactação com um equipamento Proctor ou com uma mesa vibratória”.
- (2012b). “NP EN 197-1: Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”.
- (2013). “NP EN 14227-10: Solo tratado com cimento”.
- Consoli, N. C., D. Foppa, L. Festugato e K. S. Heineck (2007). “Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133.2, pp. 197–205. ISSN: 1090-0241, 1943-5606. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197).
- Consoli, N. C., R. C. Cruz, M. F. Floss e L. Festugato (2009). “Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136.5, pp. 759–763.
- (mai. de 2010). “Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand”. en. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136.5, pp. 759–763. ISSN: 1090-0241, 1943-5606. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278. URL: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000278> (acedido em 11/05/2018).
- Consoli, N. C., D. A. Rosa, R. C. Cruz e A. D. Rosa (2011). “Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil”. *Engineering Geology* 122.3-4, pp. 328–333. ISSN: 00137952. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.017.
- Consoli, N. C., R. C. Cruz, A. V. da Fonseca e M. R. Coop (2012). “Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sand”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138.1, pp. 100–109. ISSN: 1090-0241, 1943-5606. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000565.
- Consoli, N. C., P. M. Vaz Ferreira, C.-S. Tang, S. F. Veloso Marques, L. Festugato e M. B. Corte (2016). “A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes”. *Soils and Foundations* 56.6, pp. 1082–1088. ISSN: 00380806. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.11.011.
- Consoli, N. C., R. A. Quiñónez, L. E. González e R. A. López (2017). “Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils”. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29.5, p. 04016277. ISSN: 0899-1561, 1943-5533. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819.
- Cruz, M. (2004). “Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento”. PhD Thesis. Universidade do Minho.
- Cunha, R. A.F. d. (2014). “Contribuição para a Metodologia de Estudo de Melhoria de um Solo com Cimento no Âmbito de uma Obra Rodoviária”. Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Fernando Pessoa.

- Dias, J. J.d.F. M. (2012). “Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas”. Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.
- Estradas de Portugal, S.A. (2009). “Caderno de Encargos Tipo Obra”.
- Felt, E. J (1955). “Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mistures”. *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Bulletin D5. Authorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board*, p. 138.
- Foppa, D. (2005). “Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados”. PhD Thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 144.
- Forcelini, M., G. R. Garbin, V. P. Faro e N. C. Consoli (2016). “Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand”. *Procedia Engineering* 143, pp. 75–81. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.010.
- Gonçalves, J. C.P.d. S. (2016). “Estudo do teor em água e porosidade como parâmetros de controlo da resistência de misturas solo cimento”. Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.
- Goodarzi, A., H. Akbari e M. Salimi (2016). “Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume”. *Applied Clay Science* 132-133, pp. 675–684. ISSN: 01691317. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.023.
- Ho, L. S., K. Nakarai, Y. Ogawa, T. Sasaki e M. Morioka (2017). “Strength development of cement-treated soils: Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition”. *Construction and Building Materials* 134, pp. 703–712. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.065.
- Ikhlef, N.-S., M. S. Ghembaza e M. Dadouch (2015). “Effect of Treatment with Cement on the Mechanical Characteristics of Silt from Telagh Region of Sidi Belabes, Algeria”. *Geotechnical and Geological Engineering* 33.4, pp. 1067–1079. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-015-9888-2.
- Jia, J., M. Lino, F. Jin e C. Zheng (2016). “The Cemented Material Dam: A New, Environmentally Friendly Type of Dam”. *Engineering* 2.4, pp. 490–497. ISSN: 20958099. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.003.
- Jongpradist, P., S. Youwai e C. Jaturapitakkul (2011). “Effective Void Ratio for Assessing the Mechanical Properties of Cement-Clay Admixtures at High Water Content”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137.6, pp. 621–627. ISSN: 1090-0241, 1943-5606. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000462.
- Kaniraj, S. R. e V. G. Havanagi (1999). “Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures”. *Cement and Concrete Research* 29.5, pp. 673–677.
- Kenai, S., R. Bahar e M. Benazzoug (2006). “Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil”. *Journal of Materials Science* 41.21, pp. 6956–6964. ISSN: 0022-2461, 1573-4803. DOI: 10.1007/s10853-006-0226-1.

- Larnach, W. K. (1960). "Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures". *Civil Engineering and Public Works Review* 55.648, pp. 903–905.
- LNEC E 196-1966 (1966). "Solos - Análise Granulométrica". Lisboa: Especificação LNEC.
- LNEC E 197-1966 (1966). "Solos - Ensaio de compactação". Lisboa: Especificação LNEC.
- LNEC E 264-1972 (1972). "Solos cimento - Ensaio de compressão". Lisboa: Especificação LNEC.
- Lopez-Querol, S., J. Arias-Trujillo, M. GM-Elife, A. Matias-Sanchez e B. Cantero (2017). "Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand". *Construction and Building Materials* 153, pp. 374–384. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.124.
- Matos, T. (2017). "Estudo da influência do peso volúmico seco nas propriedades mecânicas de misturas de solo cimento compactadas com o mesmo teor em água". Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.
- Mohamedzein, Y. E.-A. e A. A. Al-Rawas (2011). "Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman". *Geotechnical and Geological Engineering* 29.6, pp. 999–1008. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-011-9432-y.
- Mokwa, R. L. e S. Fridleifsson (2007). "Earthwork compaction evaluation using soil air voids". *Canadian Geotechnical Journal* 44.2, pp. 151–159. ISSN: 0008-3674, 1208-6010. DOI: 10.1139/t06-113.
- Niroshan, N., N. Sivakugan e R. L. Veenstra (2017). "Laboratory Study on Strength Development in Cemented Paste Backfills". *Journal of Materials in Civil Engineering* 29.7, p. 04017027. ISSN: 0899-1561, 1943-5533. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001848.
- NP-143 (1969). "Solos - Determinação dos limites de consistência". Lisboa: Norma Portuguesa Definitiva.
- NP-84 (1965). "Solos - Determinação do teor em água natural".
- Nusit, K., P. Jitsangiam, J. Kodikara, H. H. Bui e G. L. M. Leung (2017). "Advanced Characteristics of Cement-Treated Materials with respect to Strength Performance and Damage Evolution". *Journal of Materials in Civil Engineering* 29.4, p. 04016255. ISSN: 0899-1561, 1943-5533. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001772.
- Pakbaz, M. S. e R. Alipour (2012). "Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay". *Applied Clay Science* 67-68, pp. 1–4. ISSN: 01691317. DOI: 10.1016/j.clay.2012.07.006.
- Pandey, A. e A. Rabbani (2017). "Soil Stabilisation using cement". *International Journal of Civil Engineering and Technology* 8.6, pp. 316–322. ISSN: 0976-6308.
- PCA (2003). "Properties and Uses of Cement-Modified Soil".
- PCA (2011). "Soil-Cement".
- Pereira, A. C.M. R. (2009). "Índice volumétrico "vazios-cimento" para avaliação de resistência e rigidez em areia grossa uniforme - generalização a outros solos", p. 100.

- Pereira, M. d.M. L. (2010). “Índice volumétrico “vazios-cimento” para avaliação de propriedades de deformabilidade e resistência em age para infra-estruturas de transporte”, p. 184.
- Pisarczyk, S (2005). *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Ribeiro, D., R. Néri e R. Cardoso (2016). “Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages”. *Procedia Engineering* 143, pp. 59–66. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.008.
- Rios, S., A. Viana da Fonseca, N. C. Consoli, M. Floss e N. Cristelo (2013). “Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio”. *Géotechnique Letters* 3.3, pp. 130–136. ISSN: 2045-2543. DOI: 10.1680/geolett.13.00003.
- Rios, S. (2011). “A general framework for the geomechanical characterisation of artificially cemented soil”. PhD Thesis. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.
- Rios, S., A. Viana da Fonseca e B. A. Baudet (2012). “Effect of the Porosity/Cement Ratio on the Compression of Cemented Soil”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138.11, pp. 1422–1426. ISSN: 1090-0241, 1943-5606. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000698.
- Sanbonsuge, K., K. Vasconcelos, L. Bernucci e E. De Moura (2017). “Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento”. *TRANSPORTES* 25.4, p. 68. ISSN: 2237-1346. DOI: 10.14295/transportes.v25i4.1257.
- Sariosseiri, F. e B. Muhunthan (fev. de 2009). “Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils”. en. *Engineering Geology* 104.1-2, pp. 119–125. ISSN: 00137952. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.09.003. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795208002329> (acedido em 11/05/2018).
- Sharma, L., N. Sirdesai, K. Sharma e T. Singh (2018). “Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study”. *Applied Clay Science* 152, pp. 183–195. ISSN: 01691317. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.012.
- Sharma, R. K. (2017). “Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber”. *Geotechnical and Geological Engineering* 35.5, pp. 2291–2302. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-017-0245-5.
- Silva, M. F. d. (2010). “Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal”. Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.
- Suksun, H. (2000). “Assessment of Strength development in cement-admixed high water content clays with abram’s law as a basis”.
- Sunitsakul, J., A. Sawatparnich e A. Sawangsuriya (2012). “Prediction of Unconfined Compressive Strength of Soil–Cement at 7 Days”. *Geotechnical and Geological Engineering* 30.1, pp. 263–268. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. DOI: 10.1007/s10706-011-9460-7.

BIBLIOGRAFIA

- Tsuchida, T. e Y. X. Tang (2015). “Estimation of compressive strength of cement-treated marine clays with different initial water contents”. *Soils and Foundations* 55.2, pp. 359–374. ISSN: 00380806. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.011.
- Vitali, O. P. M. (2008). “Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência”. Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, p. 152.
- Zhao, Y., Y. Gao, Y. Zhang e Y. Wang (2016). “Effect of fines on the mechanical properties of composite soil stabilizer-stabilized gravel soil”. *Construction and Building Materials* 126, pp. 701–710. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.082.



TABELAS

Tabela A.1: Análise Granulométrica

Peneiro	dimensões (mm)	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Percentagem Material Passado (%)
4	4,75	0	500	100,00
10	2	191,61	308,39	61,68
16	1,19	88,93	219,46	43,89
20	0,85	28,92	190,54	38,11
40	0,425	64,46	126,08	25,22
60	0,25	20,08	106,00	21,20
80	0,18	16,66	89,34	17,87
120	0,125	14,81	74,53	14,91
140	0,106	12,30	62,26	12,45
200	0,075	38,58	26,65	4,73
	Refugo	22,50	1,15	0,23
Total		498,85		

Tabela A.2: Proctor Leve - 1

	P1		P2		P3	
Água Adicionada (g)	179,51		236,43		290,65	
Volume do Molde (cm^3)			956,04			
Massa do Molde (g)	3040		3040		3040	
Massa do Molde + Solo Húmido (g)	4620		4880		4880	
Solo Húmido (g)	1580		1840		1840	
γ (g/cm^3)	1,65		1,93		1,93	
γ (kN/m^3)	16,53		19,25		19,25	
Cápsula nº	2	4	14	9	6	8
Cápsula + Solo Húmido (g)	52,59	50,14	60,11	67,49	55,53	55,32
Cápsula + Solo Seco (g)	49,39	46,94	52,37	58,85	48,81	48,42
Peso da Cápsula (g)	18,49	15,74	18,43	18,59	15,66	15,64
Peso da Água (g)	3,20	3,20	7,74	8,64	6,72	6,90
Solo Seco (g)	30,90	31,20	33,94	40,26	33,15	32,78
Teor em Água (%)	10,36	10,26	22,80	21,46	20,27	21,05
Teor em Água Médio (%)	10,31		22,13		20,66	
γ_d (kN/m^3)	14,98		15,76		15,95	

Tabela A.3: Proctor Leve - 2

	P4		P5	
Água Adicionada (g)	343,93		200,81	
Volume do Molde (cm^3)			956,04	
Massa do Molde (g)	3040		3040	
Massa do Molde + Solo Húmido (g)	4780		4810	
Solo Húmido (g)	1740		1770	
γ (g/cm^3)	1,82		1,85	
γ (kN/m^3)	18,20		18,52	
Cápsula nº	3	5	4	2
Cápsula + Solo Húmido (g)	60,98	63,12	58,72	60,47
Cápsula + Solo Seco (g)	51,03	53,20		
Peso da Cápsula (g)	15,91	18,57	14,73	18,48
Peso da Água (g)	9,95	9,92		
Solo Seco (g)	35,12	34,63		
Teor em Água (%)	28,33	28,65		
Teor em Água Médio (%)	28,49			
γ_d (kN/m^3)	14,16			

Tabela A.4: Proctor Pesado 4% - 1

	P1		P2		P3	
Cimento Adicionado (g)			78,05			
Água Adicionada (g)	180,14		199,79		220,37	
Volume do Molde (cm^3)			956,04			
Massa do Molde (g)	3040		3390		3390	
Massa do Molde + Solo Húmido (g)	4870		5250		5270	
Solo Húmido (g)	1830		1860		1880	
γ (g/cm^3)	1,91		1,95		1,97	
γ (kN/m^3)	19,14		19,46		19,66	
Cápsula nº	1	2	3	4	5	6
Cápsula + Solo Húmido (g)	67,29	66,02	64,97	62,17	90,40	84,48
Cápsula + Solo Seco (g)	62,06	61,14	59,61	57,49	82,13	76,30
Peso da Cápsula (g)	16,02	18,48	15,90	15,73	18,55	15,66
Peso da Água (g)	5,23	4,88	5,36	4,68	8,27	8,18
Solo Seco (g)	46,04	42,66	43,71	41,76	63,58	60,64
Teor em Água (%)	11,36	11,44	12,26	11,21	13,01	13,49
Teor em Água Médio (%)	11,40		11,73		13,25	
γ_d (kN/m^3)	17,18		17,41		17,36	

Tabela A.5: Proctor Pesado 4% - 2

	P4		P5	
Cimento Adicionado (g)			78,05	
Água Adicionada (g)	250,37		312,12	
Volume do Molde (cm^3)			956,04	
Massa do Molde (g)	3040		3040	
Massa do Molde + Solo Húmido (g)	4965		4975	
Solo Húmido (g)	1925		1935	
γ (g/cm^3)	2,01		2,02	
γ (kN/m^3)	20,14		20,24	
Cápsula nº	7	8	2	14
Cápsula + Solo Húmido (g)	78,13	78,79	49,49	57,33
Cápsula + Solo Seco (g)	70,53	70,78	45,12	51,69
Peso da Cápsula (g)	18,62	15,64	18,48	18,43
Peso da Água (g)	7,60	8,01	4,37	5,64
Solo Seco (g)	51,91	55,14	26,64	33,26
Teor em Água (%)	14,64	14,53	16,40	16,96
Teor em Água Médio (%)	14,58		16,96	
γ_d (kN/m^3)	17,57		16,68	

Tabela A.6: Proctor Pesado 6% - 1

	P1		P2		P3	
Cimento Adicionado (g)			117,07			
Água Adicionada (g)	199,80		220,74		240,00	
Volume do Molde (cm^3)			956,04			
Massa do Molde (cm^3)	3390		3040		3390	
Massa do Molde (g)	5225		4905		5275	
Solo Húmido (g)	1835		1865		1885	
γ (g/cm^3)	1,92		1,95		1,97	
γ (kN/m^3)	19,19		19,51		19,72	
Cápsula nº	9	10	11	12	13	14
Cápsula + Solo Húmido (g)	69,18	76,47	62,77	69,53	68,14	78,25
Cápsula + Solo Seco (g)	63,69	69,62	57,56	63,69	61,64	70,71
Peso da Cápsula (g)	18,58	15,84	17,20	18,44	15,93	18,43
Peso da Água (g)	5,49	6,85	5,21	5,84	6,50	7,54
Solo Seco (g)	45,11	53,78	40,36	45,25	45,71	52,28
Teor em Água (%)	12,17	12,74	12,91	12,91	14,22	14,425
Teor em Água Médio (%)	12,45		12,91		14,32	
γ_d (kN/m^3)	17,07		17,28		17,25	

Tabela A.7: Proctor Pesado 6% - 2

	P4		P5		P6	
Cimento Adicionado (g)			117,07			
Água Adicionada (g)	259,55		310,27		365,95	
Volume do Molde (cm^3)			956,04			
Massa do Molde (cm^3)	3040		3040		3040	
Massa do Molde (g)	4945		4975		4850	
Solo Húmido (g)	1905		1935		1810	
γ (g/cm^3)	1,99		2,02		1,89	
γ (kN/m^3)	19,93		20,24		18,93	
Cápsula nº	15	16	15	4	9	14
Cápsula + Solo Húmido (g)	69,16	72,02	57,63	52,20	66,68	68,64
Cápsula + Solo Seco (g)	61,05	64,95	51,62	46,96	56,95	58,25
Peso da Cápsula (g)	15,94	15,89	15,93	15,73	18,59	18,43
Peso da Água (g)	7,11	7,07	6,01	5,24	9,73	10,39
Solo Seco (g)	45,11	49,06	35,69	31,23	38,36	39,82
Teor em Água (%)	15,76	14,41	16,84	16,78	25,37	26,09
Teor em Água Médio (%)	15,08		16,81		25,73	
γ_d (kN/m^3)	17,31		17,33		15,06	

Tabela A.8: Proctor Pesado 10% - 1

	P1		P2		P3	
Cimento Adicionado			196,46			
Água adicionada	235,55		275,33		319,99	
Volume do Molde			956,04			
Peso do Molde	3415		3330		3330	
Molde + Solo húmido	5285		5240		5260	
Solo Húmido	1870		1910		1930	
γ	1,96		2,00		2,02	
γ	19,56		19,98		20,19	
Cápsula nº	30	28	25	8	16	27
Cápsulo + Solo Húmido	63,79	62,49	69,95	65,52	69,9	75,61
Cápsula + Solo Seco	58,69	57,17	63,58	58,8	61,96	67,23
Massa da Cápsula	18,6	15,72	18,43	15,64	15,88	15,81
Massa da Água	5,1	5,32	6,37	6,72	7,94	8,38
Solo Seco	40,09	41,45	45,15	43,16	46,08	51,42
Teor em Água	12,72	12,83	14,11	15,57	17,23	16,30
Teor em Água Médio	12,78		14,84		16,76	
γ_d	17,34		17,40		17,29	

Tabela A.9: Proctor Pesado 10% - 2

	P4		P5	
Cimento Adicionado			196,46	
Água adicionada	365,13		410,12	
Volume do Molde			956,04	
Massa do Molde	3415		3415	
Molde + Solo húmido	5350		5220	
Solo Húmido	1935		1805	
γ	2,02		1,89	
γ	20,24		18,88	
Cápsula nº	21	12	34	15
Cápsulo + Solo Húmido	86,54	84,48	66,34	58,47
Cápsula + Solo Seco	76,26	74	61,39	54,01
Peso da Cápsula	21,55	18,45	18,57	15,95
Peso da Água	10,28	10,48	4,95	4,46
Solo Seco	54,71	55,55	42,82	38,06
Teor em Água	18,79	18,87	11,56	11,72
Teor em Água Médio	18,83		11,64	
γ_d	17,03		16,91	

Tabela A.10: Medições dos provetes com 0% de cimento

		0c 13,5w			0c 17,5w		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
Altura (mm)	1	117,70	117,50	117,58	116,88	117,88	117,93
	2	117,73	117,68	117,55	116,64	117,74	117,78
	3	117,92	117,64	117,69	117,11	117,88	117,92
	4	117,85	117,56	117,58	117,03	118,02	118,12
	5	117,81	117,66	117,51	116,87	117,88	117,90
	6	117,76	117,65	117,60	116,53	117,93	117,81
$h_{média}$ (mm)		117,80	117,62	117,59	116,84	117,89	117,91
Diâmetro (mm)	1	101,57	101,61	101,56	101,45	101,43	101,36
	2	101,56	101,47	101,49	101,38	101,55	101,39
	3	101,66	101,56	101,55	101,53	101,45	101,49
	4	101,44	101,66	101,45	101,35	101,61	101,55
	5	101,60	101,46	101,53	101,46	101,59	101,36
	6	101,40	101,63	101,55	101,53	101,46	101,29
D_{medio} (mm)		101,54	101,57	101,52	101,45	101,52	101,41

Tabela A.11: Medições dos provetes com 4% de cimento

		4c 13,5w			4c 17,5w		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
Altura (mm)	1	118,33	117,14	116,79	117,54	117,58	117,55
	2	118,64	117,33	116,90	117,84	117,38	117,52
	3	118,36	117,77	117,00	117,54	117,73	117,60
	4	119,15	116,96	116,94	117,34	117,33	118,06
	5	118,65	117,63	116,74	117,52	117,84	118,04
	6	119,37	116,93	116,76	118,35	117,59	117,95
$h_{média}$ (mm)		118,75	117,29	116,86	117,69	117,58	117,79
Diâmetro (mm)	1	102,54	101,73	101,73	102,17	101,71	101,65
	2	101,79	101,49	101,80	102,08	101,70	101,58
	3	101,91	102,21	101,70	101,57	101,56	101,51
	4	102,26	102,49	101,81	101,69	101,43	101,85
	5	101,83	101,65	101,56	101,79	101,55	101,76
	6	102,19	102,15	101,65	101,48	101,61	101,44
D_{medio} (mm)		102,09	101,95	101,71	101,80	101,59	101,63

Tabela A.12: Medições dos provetes com 6% de cimento

		6c 13,5w			6c 17,5w		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
Altura (mm)	1	116,61	116,86	116,82	117,23	117,74	117,29
	2	116,85	117,43	117,02	117,59	117,57	117,50
	3	116,87	117,37	116,86	117,05	117,59	117,59
	4	116,92	117,02	116,90	117,55	117,66	117,20
	5	116,86	117,00	116,80	117,30	117,68	117,95
	6	116,86	116,93	116,92	117,24	117,70	117,22
$h_{média}$ (mm)		116,83	117,10	116,89	117,33	117,66	117,46
Diâmetro (mm)	1	101,84	101,64	101,68	101,71	101,63	101,63
	2	101,37	101,71	101,78	101,66	101,72	101,65
	3	101,68	101,56	101,96	101,77	101,90	101,61
	4	101,63	101,64	101,76	101,76	101,85	101,57
	5	101,42	101,61	101,83	101,74	101,76	101,75
	6	101,71	101,68	101,78	101,78	101,69	101,59
$D_{média}$ (mm)		101,61	101,64	101,80	101,74	101,76	101,63

Tabela A.13: Medições dos provetes com 10% de cimento

		10c 13,5w			10c 17,5w		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
Altura (mm)	1	118,14	118,02	118,77	118,25	118,00	117,87
	2	118,01	118,08	118,66	118,49	118,18	118,09
	3	118,40	118,67	118,75	118,41	117,70	117,98
	4	118,35	118,17	118,64	118,19	117,83	117,88
	5	118,18	118,05	118,73	118,25	118,43	117,96
	6	117,96	118,19	118,76	118,41	118,43	117,99
$h_{média}$ (mm)		118,17	118,20	118,72	118,33	118,10	117,96
Diâmetro (mm)	1	101,96	101,69	101,72	101,73	101,80	101,63
	2	101,15	101,41	101,74	101,88	101,56	101,58
	3	101,82	101,72	101,85	101,75	101,50	101,63
	4	101,91	101,69	101,81	101,75	101,81	101,59
	5	101,71	101,47	101,78	101,69	101,74	101,65
	6	101,89	101,90	101,76	101,76	101,66	101,64
$D_{média}$ (mm)		101,74	101,65	101,78	101,76	101,68	101,62

Tabela A.14: Peso, diâmetro médio e altura média dos provetes depois da cura

$\%_c$	Provete	W (g)	$D_{médio}$ (mm)	$h_{média}$ (mm)
0	P1 - 0c 13,5w	1830,6	117,8	101,5
	P2 - 0c 13,5w	1827,6	117,6	101,6
	P3 - 0c 13,5w	1830,0	117,6	101,5
	P1 - 0c 17,5w	1897,4	116,8	101,5
	P2 - 0c 17,5w	1892,6	117,9	101,5
	P3 - 0c 17,5w	1900,5	117,9	101,4
4	P1 - 4c 13,5w	1810,4	118,8	102,1
	P2 - 4c 13,5w	1827,4	117,3	102,0
	P3 - 4c 13,5w	1830,0	116,9	101,7
	P1 - 4c 17,5w	1899,0	117,7	101,8
	P2 - 4c 17,5w	1896,0	117,6	101,6
	P3 - 4c 17,5w	1898,2	117,8	101,6
6	P1 - 6c 13,5w	1831,0	116,8	101,6
	P2 - 6c 13,5w	1833,9	117,1	101,6
	P3 - 6c 13,5w	1833,2	116,9	101,8
	P1 - 6c 17,5w	1887,7	117,3	101,7
	P2 - 6c 17,5w	1877,9	117,7	101,8
	P3 - 6c 17,5w	1916,4	117,5	101,6
10	P1 - 10c 13,5w	1837,2	118,2	101,7
	P2 - 10c 13,5w	1838,3	118,2	101,6
	P3 - 10c 13,5w	1839,7	118,7	101,8
	P1 - 10c 17,5w	1907,4	118,3	101,8
	P2 - 10c 17,5w	1910,3	118,1	101,7
	P3 - 10c 17,5w	1910,2	118,0	101,6

Tabela A.15: Características dos provetes 0c13,5w

	P1 - 0c 13,5w		P2 - 0c 13,5w		P3 - 0c 13,5w	
Provete (g)	1830,62		1827,63		1830	
Volume do provete (m^3)	0,000954		0,000953		0,000952	
n° cap	10	7	1	4	23	13
Cápsula (g)	15,86	18,64	16,03	15,74	18,64	15,92
Cap + solo humido (g)	97,8	103,26	102,97	93,9	102,95	103,44
Solo humido (g)	81,94	84,62	86,94	78,16	84,31	87,52
Cap + solo seco (g)	88,05	93,4	92,39	84,82	93,04	93,24
Solo seco (g)	72,19	74,76	76,36	69,08	74,4	77,32
Teor em água (%)	13,5%	13,2%	13,9%	13,1%	13,3%	13,2%
Teor em água médio (%)	13,3%		13,5%		13,3%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,19		19,18		19,23	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,93		16,90		16,98	

Tabela A.16: Características dos provetes 0c17,5w

	P1 - 0c 17,5w		P2 - 0c 17,5w		P3 - 0c 17,5w	
Provete (g)	1897,44		1892,56		1900,5	
Volume do provete (m^3)	0,000944		0,000954		0,000952	
n° cap	11	20	2	5	12	16
Cápsula (g)	17,21	18,3	18,49	18,58	18,44	15,9
Cap + solo humido (g)	97,41	99,35	102,76	98,11	99,71	106,13
Solo humido (g)	80,2	81,05	84,27	79,53	81,27	90,23
Cap + solo seco (g)	85,5	87,44	90,27	86,44	87,55	92,77
Solo seco (g)	68,29	69,14	71,78	67,86	69,11	76,87
Teor em água (%)	17,4%	17,2%	17,4%	17,2%	17,6%	17,4%
Teor em água médio (%)	17,3%		17,3%		17,5%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	20,09		19,83		19,96	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	17,12		16,91		16,99	

Tabela A.17: Características dos provetes 4c13,5w

	P1 - 4c 13,5w		P2 - 4c 13,5w		P3 - 4c 13,5w	
Provete (g)	1810,41		1827,4		1830,02	
Volume do provete (m^3)	0,000972		0,000958		0,000949	
n° cap	15	4	12	6	11	8
Cápsula (g)	15,95	15,74	18,43	15,67	17,24	15,66
Cap + solo humido (g)	88,84	86,55	72,21	83,98	79,27	84,05
Solo humido (g)	72,89	70,81	53,78	68,31	62,03	68,39
Cap + solo seco (g)	81,23	79,25	66,05	76,02	72,01	76
Solo seco (g)	65,28	63,51	47,62	60,35	54,77	60,34
Teor em água (%)	11,7%	11,5%	12,9%	13,2%	13,3%	13,3%
Teor em água médio (%)	11,6%		13,1%		13,3%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	18,63		19,08		19,28	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,69		16,88		17,01	

Tabela A.18: Características dos provetes 4c17,5w

	P1 - 4c 17,5w		P2 - 4c 17,5w		P3 - 4c 17,5w	
Provete (g)	1898,96		1895,95		1898,17	
Volume do provete (mm^3)	0,000958		0,000953		0,000956	
n° cap	31	6	32	33	15	34
Cápsula (g)	16,04	15,68	21,95	15,78	15,96	18,57
Cap + solo humido (g)	76,78	88,20	99,38	80,05	93,55	95,92
Solo humido (g)	60,74	72,52	77,43	64,27	77,59	77,35
Cap + solo seco (g)	67,56	77,77	87,70	70,80	82,01	84,53
Solo seco (g)	51,52	62,09	65,75	55,02	66,05	65,96
Teor em água (%)	17,9%	16,8%	17,8%	16,8%	17,5%	17,3%
Teor em água médio (%)	17,3%		17,3%		17,4%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,86		19,79		19,76	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,92		16,88		16,84	

Tabela A.19: Características dos provetes 6c13,5w

	P1 - 6c 13,5w		P2 - 6c 13,5w		P3 - 6c 13,5w	
Provete (g)	1830,97		1833,85		1833,16	
Volume do provete (mm^3)	0,000947		0,000950		0,000951	
n° cap	15	10	4	2	12	8
Cápsula (g)	15,95	15,85	15,76	18,49	18,44	15,64
Cap + solo humido (g)	94,12	92,03	98,76	102,47	92,39	92,28
Solo humido (g)	78,17	76,18	83	83,98	73,95	76,64
Cap + solo seco (g)	84,77	82,78	88,59	92,14	83,41	83,1
Solo seco (g)	68,82	66,93	72,83	73,65	64,97	67,46
Teor em água (%)	13,6%	13,8%	14,0%	14,0%	13,8%	13,6%
Teor em água médio (%)	13,7%		14,0%		13,7%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,33		19,30		19,27	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	17,00		16,93		16,95	

Tabela A.20: Características dos provetes 6c17,5w

	P1 - 6c 17,5w		P2 - 6c 17,5w		P3 - 6c 17,5w	
Provete (g)	1887,67		1887,67		1887,67	
Volume do provete (mm^3)	0,000954		0,000957		0,000953	
n° cap	2	10	12	4	8	15
Cápsula (g)	18,49	15,85	18,45	15,74	15,64	15,94
Cap + solo humido (g)	92,05	86,4	107,73	103,79	113,99	101,71
Solo humido (g)	73,56	70,55	89,28	88,05	98,35	85,77
Cap + solo seco (g)	81,39	76,02	94,95	91,21	99,27	88,78
Solo seco (g)	62,9	60,17	76,5	75,47	83,63	72,84
Teor em água (%)	16,9%	17,3%	16,7%	16,7%	17,6%	17,8%
Teor em água médio (%)	17,1%		16,7%		17,7%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,79		19,63		20,11	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,90		16,82		17,09	

Tabela A.21: Características dos provetes 10c13,5w

	P1 - 10c 13,5w		P2 - 10c 13,5w		P3 - 10c 13,5w	
Provete (g)	1837,21		1838,31		1839,71	
Volume do provete (mm^3)	0,000961		0,000959		0,000966	
n° cap	25	8	30	28	27	16
Cápsula (g)	18,41	15,65	18,6	15,73	15,81	15,91
Cap + solo humido (g)	95,27	96,24	98,22	93,79	92,76	95,04
Solo humido (g)	76,86	80,59	79,62	78,06	76,95	79,13
Cap + solo seco (g)	86,07	86,79	89,02	84,52	83,74	85,75
Solo seco (g)	67,66	71,14	70,42	68,79	67,93	69,84
Teor em água (%)	13,6%	13,3%	13,1%	13,5%	13,3%	13,3%
Teor em água médio (%)	13,4%		13,3%		13,3%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,14		19,15		19,13	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,87		16,91		16,89	

Tabela A.22: Características dos provetes 10c17,5w

	P1 - 10c 17,5w		P2 - 10c 17,5w		P3 - 10c 17,5w	
Provete (g)	1907,4		1910,31		1910,15	
Volume do provete (mm^3)	0,000962		0,000959		0,000957	
n° cap	12	21	7	4	20	23
Cápsula (g)	18,45	21,55	18,63	15,75	18,29	18,65
Cap + solo humido (g)	100,99	91,72	98,04	90,38	92,59	88,85
Solo humido (g)	82,54	70,17	79,41	74,63	74,3	70,2
Cap + solo seco (g)	88,72	81,31	86,39	79,41	82,27	78,15
Solo seco (g)	70,27	59,76	67,76	63,66	63,98	59,5
Teor em água (%)	17,5%	17,4%	17,2%	17,2%	16,1%	18,0%
Teor em água médio (%)	17,4%		17,2%		17,1%	
Peso Volúmico (kN/m^3)	19,82		19,85		19,97	
Peso Volúmico seco (kN/m^3)	16,88		16,93		17,06	

Tabela A.23: Propriedades dos provetes depois da cura

$\%_c$	Provete	$W_{pós cura}$	$V_{pós cura}$	$\gamma_{pós cura}$	$\omega_{pós cura}$	$\gamma_d pós cura$
0	P1 - 0c 13,5w	1830,6	0,000954	19,19	13,3%	16,93
	P2 - 0c 13,5w	1827,6	0,000953	19,18	13,5%	16,90
	P3 - 0c 13,5w	1830,0	0,000952	19,23	13,3%	16,98
	P1 - 0c 17,5w	1897,4	0,000944	20,09	17,3%	17,12
	P2 - 0c 17,5w	1892,6	0,000954	19,83	17,3%	16,91
	P3 - 0c 17,5w	1900,5	0,000952	19,96	17,5%	16,99
4	P1 - 4c 13,5w	1810,4	0,000972	18,63	11,6%	16,69
	P2 - 4c 13,5w	1827,4	0,000958	19,08	13,1%	16,88
	P3 - 4c 13,5w	1830,0	0,000949	19,28	13,3%	17,01
	P1 - 4c 17,5w	1899,0	0,000958	19,86	17,3%	16,92
	P2 - 4c 17,5w	1896,0	0,000953	19,79	17,3%	16,88
	P3 - 4c 17,5w	1898,2	0,000956	19,76	17,4%	16,84
6	P1 - 6c 13,5w	1831,0	0,000947	19,33	13,7%	17,00
	P2 - 6c 13,5w	1833,9	0,000950	19,30	14,0%	16,93
	P3 - 6c 13,5w	1833,2	0,000951	19,27	13,7%	16,95
	P1 - 6c 17,5w	1887,7	0,000954	19,79	17,1%	16,90
	P2 - 6c 17,5w	1877,9	0,000957	19,63	16,7%	16,82
	P3 - 6c 17,5w	1916,4	0,000953	20,11	17,7%	17,09
10	P1 - 10c 13,5w	1837,2	0,000961	19,14	13,4%	16,87
	P2 - 10c 13,5w	1838,3	0,000959	19,15	13,3%	16,91
	P3 - 10c 13,5w	1839,7	0,000966	19,13	13,3%	16,89
	P1 - 10c 17,5w	1907,4	0,000962	19,82	17,4%	16,88
	P2 - 10c 17,5w	1910,3	0,000959	19,85	17,2%	16,93
	P3 - 10c 17,5w	1910,2	0,000957	19,97	17,1%	17,06

Tabela A.24: Porosidade alvo

$\%_c$	γ_w	γ_d	G_m	n (%)
4			2,67	36,3
6	10,0	17,0	2,68	36,6
10			2,70	37,0

Tabela A.25: Valores da porosidade dos provetes

$\%c$	Provete	γ_w (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	G_m	n
4	P2 - 4c 13,5w	10	16,87	2,67	0,368
	P3 - 4c 13,5w		17,01		0,363
	P1 - 4c 17,5w		16,92		0,366
	P2 - 4c 17,5w		16,87		0,368
	P3 - 4c 17,5w		16,83		0,369
	<hr/>				
6	P1 - 6c 13,5w	10	16,99	2,68	0,366
	P2 - 6c 13,5w		16,93		0,368
	P3 - 6c 13,5w		16,94		0,368
	P1 - 6c 17,5w		16,90		0,369
	P3 - 6c 17,5w		17,09		0,362
	<hr/>				
10	P1 - 10c 13,5w	10	16,87	2,70	0,375
	P2 - 10c 13,5w		16,90		0,374
	P3 - 10c 13,5w		16,88		0,375
	P1 - 10c 17,5w		16,87		0,375
	P2 - 10c 17,5w		16,93		0,373
	P3 - 10c 17,5w		17,05		0,368

 Tabela A.26: Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^p dos provetes com 4% de cimento

Provetes	4c 13,5w		4c 17,5w		
	P2	P3	P1	P2	P3
$q_u(MPa)$	1,59	1,52	1,41	1,34	1,37
$\gamma_d(kN/m^3)$	16,88	17,01	16,92	16,88	16,84
$\gamma_d(kg/m^3)$	1687,9	1701,3	1692,0	1687,7	1683,9
$\omega(\%)$	13,1%	13,3%	17,3%	17,3%	17,4%
Volume (mm^3)	0,000958	0,000949	0,000958	0,000953	0,000956
n	36,8%	36,3%	36,6%	36,8%	36,9%
$V_v(cm^3)$	352,22	344,45	350,85	350,66	352,91
$W_{solo}(kg)$	1,554	1,553	1,558	1,547	1,547
$W_{cimento}(kg)$	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
$W_{água}(kg)$	0,211	0,215	0,281	0,278	0,279
a/c	3,40	3,46	4,51	4,50	4,52
$V_c(cm^3)$	19,73	19,72	19,79	19,64	19,65
V_v/V_c	17,85	17,47	17,73	17,85	17,96
Civ	2,06	2,08	2,07	2,06	2,06
n/Civ^1	17,85	17,47	17,73	17,85	17,96

Tabela A.27: Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^p dos provetes com 6% de cimento

Provetes	6c w13,5			6c w17,5	
	P1	P2	P3	P1	P3
$q_u(MPa)$	1,62	1,82	1,71	1,68	1,74
$\gamma_d(kN/m^3)$	17,00	16,93	16,95	16,90	17,09
$\gamma_d(kg/m^3)$	1699,9	1693,2	1694,5	1690,2	1709,1
$\omega(\%)$	13,7%	14,0%	13,7%	17,1%	17,7%
Volume (mm^3)	0,000947	0,000950	0,000951	0,000954	0,000953
n	36,6%	36,8%	36,8%	36,9%	36,2%
$V_v(cm^3)$	346,46	349,86	349,82	352,26	345,23
$W_{solo}(kg)$	1,519	1,518	1,521	1,521	1,536
$W_{cimento}(kg)$	0,091	0,091	0,091	0,091	0,092
$W_{\acute{a}gua}(kg)$	0,221	0,225	0,221	0,276	0,288
a/c	2,42	2,47	2,42	3,02	3,12
$V_c(cm^3)$	28,94	28,91	28,97	28,97	29,26
V_v/V_c	11,97	12,10	12,08	12,16	11,80
Civ	3,05	3,04	3,04	3,04	3,07
n/Civ^1	11,97	12,10	12,08	12,16	11,80

Tabela A.28: Características dos parâmetros necessários para o cálculo do indicador n/Civ^p dos provetes com 10% de cimento

Provetes	10c 13,5w			10c 17,5w		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
$q_u(MPa)$	2,27	2,30	1,95	1,90	1,96	1,93
$\gamma_d(kN/m^3)$	16,87	16,91	16,89	16,88	16,93	17,06
$\gamma_d(kg/m^3)$	1687,0	1690,7	1688,7	1687,6	1693,4	1705,6
$\omega(\%)$	13,4%	13,3%	13,3%	17,4%	17,2%	17,1%
Volume (mm^3)	0,000961	0,000959	0,000966	0,000962	0,000959	0,000957
n	37,5%	37,4%	37,5%	37,5%	37,3%	36,8%
$V_v(cm^3)$	360,44	358,53	361,76	360,86	357,51	352,35
$W_{solo}(kg)$	1,473	1,474	1,483	1,476	1,476	1,483
$W_{cimento}(kg)$	0,147	0,147	0,148	0,148	0,148	0,148
$W_{\acute{a}gua}(kg)$	0,218	0,215	0,217	0,283	0,279	0,278
a/c	1,48	1,46	1,46	1,92	1,89	1,88
$V_c(cm^3)$	46,77	46,80	47,07	46,87	46,86	47,09
V_v/V_c	7,71	7,66	7,69	7,70	7,63	7,48
Civ	4,87	4,88	4,87	4,87	4,89	4,92
n/Civ^1	7,71	7,66	7,69	7,70	7,63	7,48

GRÁFICOS

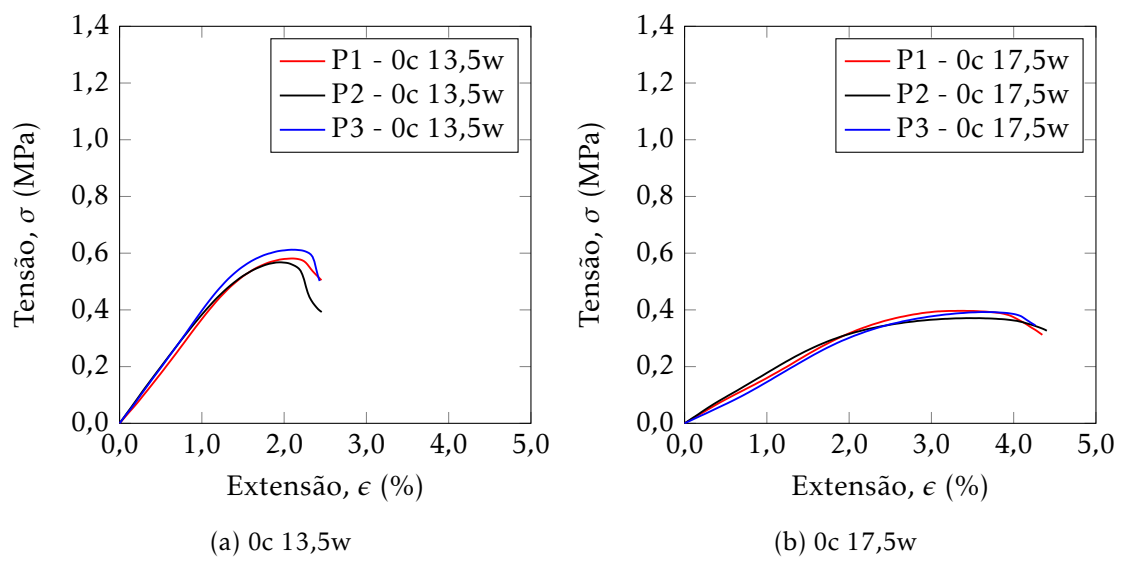


Figura B.1: Tensão/extensão dos provetes com 0% de cimento

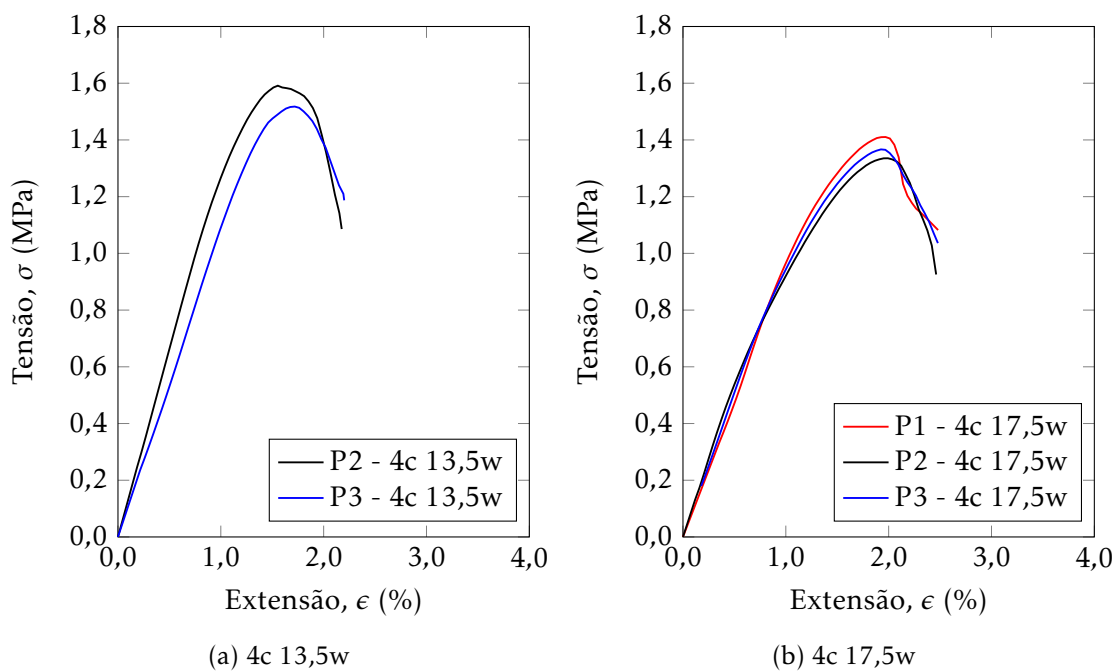


Figura B.2: Tensão/extensão dos provetes com 4% de cimento

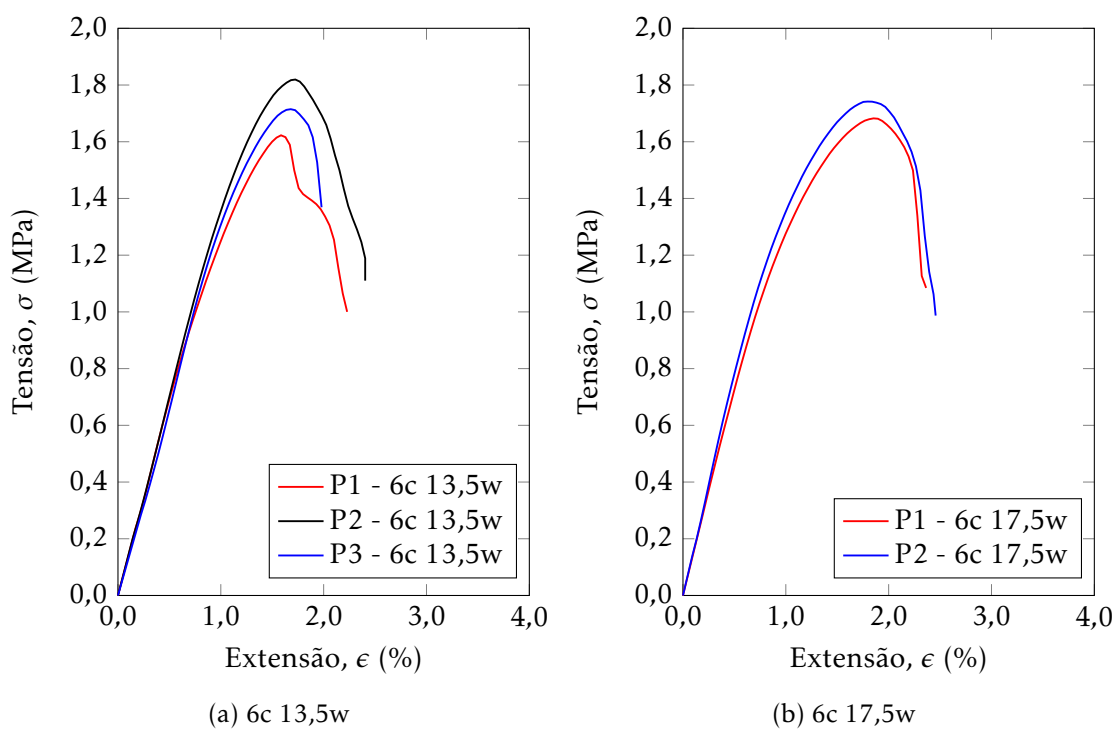


Figura B.3: Tensão/extensão dos provetes com 6% de cimento

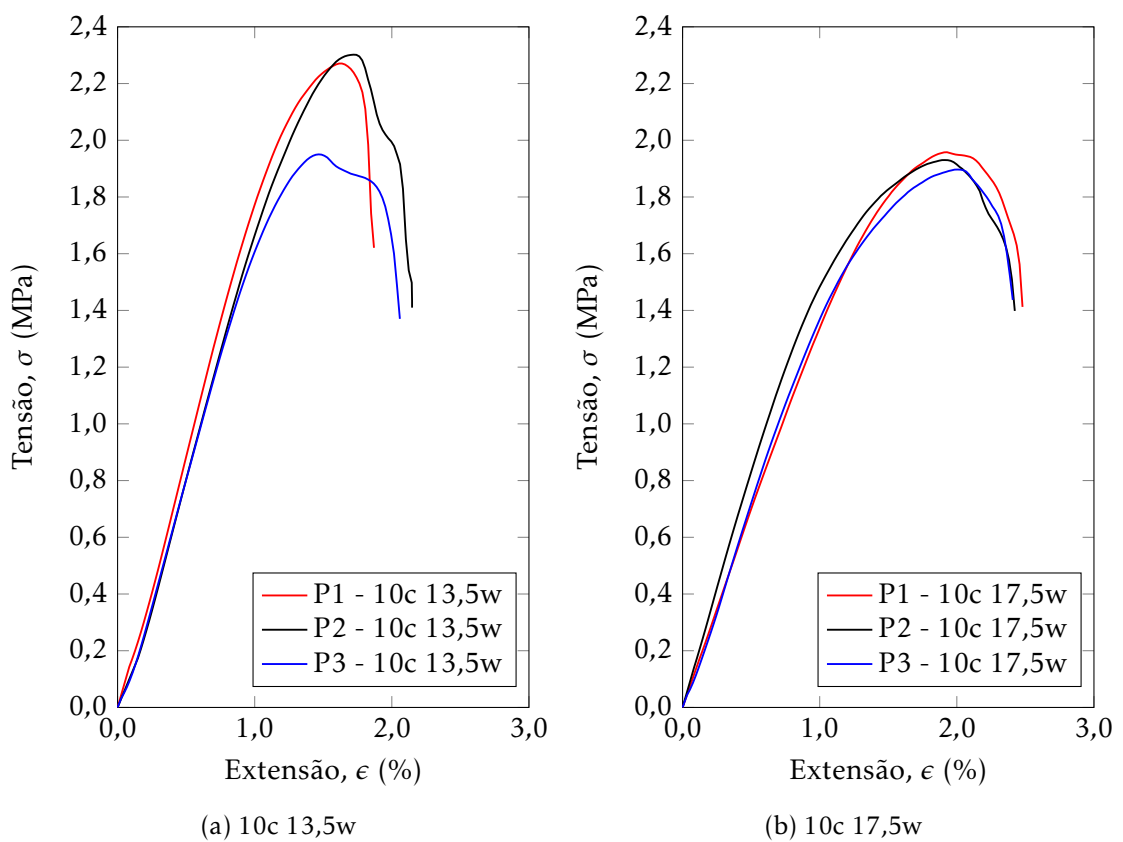


Figura B.4: Tensão/extensão dos provetes com 10% de cimento

A N E X O 

FÓRMULAS

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{I.1})$$

$$W_{Total} = W_{sólido} + W_{água} \quad (\text{I.2})$$

$$W_{sólido} = W_{ci} + W_{solo} \quad (\text{I.3})$$

$$W_{ci} = \%_{ci} \times W_{solo} \quad (\text{I.4})$$

$$\gamma_d = \frac{W_{sólido}}{V} \quad (\text{I.5})$$

$$\omega = \frac{W_{água}}{W_{sólido}} \quad (\text{I.6})$$

$$\gamma_d = \frac{G \times \gamma_w}{1 + e} \quad (\text{I.7})$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (\text{I.8})$$



DEDUÇÕES

$$\begin{aligned}
 \gamma_d &= \frac{W_{sólido}}{V} \longrightarrow \gamma_d \times V = W_{sólido} \\
 \gamma_d \times V &= W_{ci} + W_{solo} \\
 \gamma_d \times V &= \%_{ci} \times W_{solo} + W_{solo} \\
 \gamma_d \times V &= W_{solo} \times (1 + \%_{ci}) \\
 W_{solo} &= \frac{\gamma_d \times V}{1 + \%_{ci}} \tag{II.1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{W_{água}}{W_{sólido}} \longrightarrow W_{água} = \omega \times W_{sólido} \\
 W_{água} &= \omega \times \gamma_d \times V \tag{II.2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{Total} &= W_{sólido} + W_{água} \longrightarrow W_{Total} = \gamma_d \times V + \omega \times \gamma_d \times V \\
 W_{Total} &= \gamma_d \times V \times (1 + \omega) \tag{II.3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_d &= \frac{G \times \gamma_w}{1 + e} \longrightarrow 1 + e = \frac{G \times \gamma_w}{\gamma_d} \\
 e &= \frac{G \times \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \\
 e &= \frac{G \times \gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_d}{\gamma_d} \\
 e &= \frac{G \times \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d} \tag{II.4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n = \frac{e}{1+e} &\longrightarrow n = \frac{\frac{G \times \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}}{1 + \frac{G \times \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}} \\
 &n = \frac{\frac{G \times \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}}{\frac{\gamma_d + G \times \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}} \\
 &n = \frac{G \times \gamma_w - \gamma_d}{G \times \gamma_w} \tag{II.5}
 \end{aligned}$$

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{n \times V}{\frac{W_c}{3150}} = \frac{n \times V}{\frac{\%_c \times W_s}{3150}} = \frac{n \times V}{\frac{\%_c \times V \times \gamma_d}{3150 \times (1 + \%_c)}} = \frac{3150 \times n \times (1 + \%_c)}{\%_c \times \gamma_d} \tag{II.6}$$