



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento
no tratamento de solos**

Nuno Miguel Silva Azevedo Pinto



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos

Nuno Miguel Silva Azevedo Pinto

Nº 1021085

Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Eng.º Jorge Ribeiro Santos, Eng.º Coordenador do Laboratório Central da Mota-Engil Engenharia e Construção, S.A., e do Professor Doutor José Augusto Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Jorge Filipe Ribeiro dos Santos
Coordenador do Laboratório Central da Mota-Engil Engenharia e Construção, S.A.

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José António Ganilho Lopes Velho
Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro

Dedico esta tese aos meus Pais e à Teresa por todo o apoio, dedicação, compreensão, carinho, ajuda e estímulo ao longo deste trabalho. Muito obrigado por tudo...

Agradecimentos

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que contribuíram, de variadas formas, para a realização deste projecto, em especial:

- Aos meus orientadores, Eng.º Jorge Ribeiro Santos e Doutor José Augusto Fernandes pela orientação, interesse, apoio e disponibilidade sempre manifestada;
- À empresa Mota-Engil Engenharia e Construção, S.A., em especial ao Eng.º Carlos Mota Santos, ao Eng.º Pedro Januário e ao Eng.º Jorge Ribeiro Santos por terem facultado todas as condições necessárias à execução deste trabalho;
- À Eng.ª Carla Sousa e toda a equipa de colaboradores do Laboratório Central que directa e indirectamente participaram na realização deste projecto, em especial ao Sr. Alfredo Cunha que acompanhou os trabalhos desde o início, colaborando na execução dos ensaios e ajudando a ultrapassar todos os problemas encontrados ao longo do mesmo;
- Ao Eng.º Nuno Oliveira e ao Sr. Vasco Eloy pela disponibilidade em ceder os materiais para a realização dos ensaios;
- Ao Doutor Mário Marques e ao Eng.º José Cruz da Lusical, S.A. e à Eng.ª Catarina Coelho da Cimpor – Cimentos de Portugal SGPS, S.A. pela disponibilidade demonstrada na troca de ideias com o intuito de enriquecer os conhecimentos para a execução deste trabalho;
- A todos os docentes do Instituto Superior de Engenharia do Porto que contribuíram para a minha formação;
- A toda a minha família, em especial aos meus Pais, à minha Avó e à Teresa por toda a compreensão, ajuda e apoio demonstrado no decorrer deste trabalho;
- Aos meus amigos e colegas de curso que sempre me motivaram a chegar até aqui.

A todos o meu muito obrigado!

Palavras-chave

Solo, Cimento, Cal, Tensões, Deformabilidade.

Resumo

Este trabalho aborda os aspectos relacionados com o tratamento de solos recorrendo a ligantes hidráulicos, tais como cimento e cal. O objectivo principal é descrever a metodologia dos estudos de formulação em ambiente laboratorial, com a finalidade de obter um ponto de equilíbrio técnico-financeiro na optimização da percentagem destes ligantes no tratamento de solos. Para tal serão avaliados os parâmetros geotécnicos como, por exemplo, os teores de água, as baridades máximas, as tensões de rotura, a análise granulométrica, os limites de consistência, o equivalente de areia, o azul-de-metileno, a compactação proctor e CBR.

A interação ocorrida nas misturas, entre os ligantes hidráulicos e o solo, realiza-se através de reacções físico-químicas cuja finalidade é o melhoramento das características geotécnicas do próprio solo. Incide-se nas variações da resistência e deformabilidade com a finalidade de utilizar a menor quantidade possível de ligante hidráulico.

É também objectivo deste trabalho, abordar a substituição de ligantes hidráulicos financeiramente mais dispendiosos, como o cimento, por ligantes mais económicos, como é o caso da cal viva, sem no entanto, se perderem as características evidenciadas pelos parâmetros referentes à resistência e deformabilidade das misturas.

No contexto do estudo laboratorial, foram efectuados ensaios em dois tipos de solo, provenientes de obras pertencentes à empresa Mota Engil Engenharia e Construção, S.A. Estes foram recolhidos nas obras do Adutor de Pedrógão e Subconcessão do Douro Interior – Lote 6, classificados de argila magra arenosa - CL e areia bem graduada com silte - SW-SM, respectivamente, segundo a classificação Unificada.

Keywords

Soil, Cement, Lime, Stress, Deformability.

Abstract

This work discusses aspects of soil treatment using hydraulic binders such as cement and lime. It aims at describing the formulation methodology, in a laboratory environment, in order to achieve a technical and financial balance on the optimization of the percentage of these hydraulic binders in the treatment of soils.

The interaction occurred in the mixture between the hydraulic binder and the ground is achieved by means of physico-chemical reactions whose purpose is to improve the geotechnical characteristics of the soil itself. The focus is on the variations of strength and deformability, in order to use the smaller amount of hydraulic binder as possible.

It is also an objective of this study, to address the replacement of hydraulic binders financially more expensive, such as cement, by cheaper ones, such as lime, without losing the characteristics showed by the strength and deformability mixtures parameters.

In the context of the laboratory study, two soil types were tested, from works belonging to the Mota Engil Engineering and Construction S.A. company, which were collected in the works of Pedrógão Pipeline (sandy lean clay (CL)) and Sublicensing Douro Interior - Lot 6 (well-graded sand with silt (SW-SM)).

Índice

1. Introdução.....	2
1.1 Enquadramento geral	2
1.2 Objectivos do trabalho.....	3
1.3 Estrutura do relatório	3
2. Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas	6
2.1 Sociedade, tecnologia e ambiente: um trinómio para o desenvolvimento sustentável.....	6
2.2 Enquadramento Legislativo da Valorização de Resíduos.....	9
2.3 Valorização dos Resíduos de Construção e Demolição em Obras Geotécnicas.....	14
3. Materiais constituintes de uma mistura de solo tratada com ligantes hidráulicos	20
3.1 Solo	20
3.1.1 Tipos de Solo	20
3.1.2 Características Geotécnicas	28
3.2 Cimento.....	29
3.2.1 História e Processo de Fabrico.....	29
3.2.2 Tipos de Cimento	29
3.2.3 Marcação CE Cimento (Normalização)	32
3.3 Cal	32
3.3.1 História e Processo de Fabrico.....	32
3.3.2 Tipos de Cal	44
3.3.3 Marcação CE Cal.....	45
3.4 Água	46
3.4.1 Abordagem à normalização da água para misturas hidráulicas	46
4. Misturas de Solo-Cimento e Solo-Cal.....	52
4.1 Solo-Cimento	52
4.1.1 Técnicas de execução do tratamento	52
4.1.2 Melhoria dos parâmetros geotécnicos após tratamento	56
4.2 Solo-Cal	57
4.2.1 Técnicas de execução do tratamento	57
4.2.2 Melhoria dos parâmetros geotécnicos após tratamento	62
4.3 Controlo da qualidade	65
4.4 Patologias.....	67
5. Experiências em Portugal e na Europa	74
5.1 Solo-Cimento	74
5.2 Solo-Cal	75
5.3 Considerações Económicas	76
6. Estudo Experimental	80
6.1 Estudo de formulação de uma mistura de solo-cimento / solo-cal	80

6.2	Metodologia de ensaios	80
7.	Análise de Resultados	88
7.1	Solo plástico	88
7.2	Solo não plástico	100
7.3	Cal	112
7.4	Cimento	112
8.	Conclusões	116
	Referências Bibliográficas	120
	ANEXO I – Fluxogramas com o Plano de Trabalhos	I
	ANEXO II – Boletins de Ensaio	III

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema da evolução das tecnologias ambientais.	7
Figura 2 – Esquema de operacionalização do desenvolvimento sustentável.	8
Figura 3 - Indicadores de sustentabilidade em obras geotécnicas.....	9
Figura 4 - Composição dos RCD.	15
Figura 5 - Composição dos reciclados de RCD.	15
Figura 6 - Reciclagem de RCD em % da quantidade produzida.	15
Figura 7 - Diagrama Indicativo dos nomes a atribuir aos solos de acordo com a respectiva curva granulométrica.	24
Figura 8 - Classificação de Solos Unificada (ASTM 2487-85).	26
Figura 9 - Classificação de Solos Unificada (ASTM 2487-85) (continuação).	27
Figura 10 - Classificação de Solos AASHTO.	28
Figura 11 - Pirâmides de Quéops e Quéfren (2600 – 2550 A.C.).	33
Figura 12 - Grande Muralha da China (700 - 500 A.C.).	33
Figura 13 - Via Ápia (350 A.C.).	34
Figura 14 - Pont du Gard (20 A.C.).	34
Figura 15 - Coliseu de Roma (70-80 D.C).	34
Figura 16 - Panteão de Roma (118 - 125 D.C.).....	34
Figura 17 - Evolução do consumo da cal aérea em Espanha para tratamento de solos.	36
Figura 18 - Pedra calcária.	37
Figura 19- Forno de campanha para cal.	38
Figura 20 - Forno intermitente.	38
Figura 21 - Forno contínuo vertical a carvão.	39
Figura 22 - influência da temperatura de calcinação.	40
Figura 23 – Tipos de cal.	44
Figura 24 - Exemplo de etiqueta da Marcação CE da cal.....	46
Figura 25 - Exemplo de um crivo.	52
Figura 26 - Espalhamento de solos.....	53
Figura 27 - Misturadora pulverizadora.	54
Figura 28 - Compactação em fase inicial e de acabamento.	55
Figura 29 - Rega de cura e respectivo equipamento.	55
Figura 30 - Execução da estabilização por via seca.	57
Figura 31 - Execução da estabilização por via húmida.	58
Figura 32 - Equipamento "pulvimixer".	59
Figura 33 - Aplicação da cal viva com meios mecânicos.	59
Figura 34 - Aplicação da cal viva manualmente.	60
Figura 35 - Modificação da reologia dos solos argilosos devida à adição de cal.	63
Figura 36 - Curvas de compactação antes e após o tratamento com cal.	64

Figura 37 - Variação da resistência à compressão simples em função do teor em cal e do tempo.....	65
Figura 38 - Fenda Isolada	68
Figura 39 - Fendas interligadas do tipo "pele de crocodilo"	68
Figura 40 - Fendas interligadas em bloco.....	68
Figura 41- Ondulações ou corrugações.....	69
Figura 42 - Escorregamento de massa.....	70
Figura 43 – Exsudação.....	70
Figura 44 – Desgaste.....	70
Figura 45 - Placa rompida.....	71
Figura 46 – Remendo.....	71
Figura 47 - Flecha na faixa de roda.....	71
Figura 48 - Exemplos de alguns ensaios de caracterização do solo (azul-de metileno, equivalente de areia e CBR, respectivamente).....	81
Figura 49 – Etapas do processo de aplicação da cal e do cimento para o tratamento do solo	81
Figura 50 - Exemplo de provetes para o ensaio de resistência à compressão simples e diametral.	82
Figura 51 - Exemplo dos provetes a ensaiar na prensa de compressão diametral - PCDIAM.....	83
Figura 52 - Gráfico indicativo da evolução dos teores em água.	91
Figura 53 - Evolução dos teores em água antes e após cura.	91
Figura 54 - Evolução da baridade máxima antes e após a cura.	93
Figura 55 - Variação das tensões de rotura aos 7 e 28 dias.	94
Figura 56 - Variação das tensões de rotura aos 7 e 28 dias.	95
Figura 57 - Tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.	96
Figura 58 - Resistência à tracção, aos 7 e 28 dias.	96
Figura 59 - Módulo secante, aos 7 e 28 dias.....	96
Figura 60 - Análise granulométrica do solo com e sem mistura de cimento e cal.....	98
Figura 61 - Variação do equivalente de areia consoante as combinações dos ligantes hidráulicos.....	98
Figura 62 - Variação do valor de azul-de-metileno com as diferentes combinações de ligantes hidráulicos..	99
Figura 63 - Evolução do PH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo plástico).....	99
Figura 64 - Evolução dos teores em água antes da cura.....	103
Figura 65 – Evolução do teor em água antes e após a cura.....	103
Figura 66 - Evolução das baridades máximas antes e após cura.	105
Figura 67 - Evolução da tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.....	106
Figura 68 - Evolução da tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.....	107
Figura 69 - Tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.	108
Figura 70 - Resistência à tracção, aos 7 e 28 dias.	108
Figura 71 - Módulo secante, aos 7 e 28 dias.....	108
Figura 72 - Análise granulométrica do solo com e sem mistura de cimento e cal.....	110
Figura 73 - Variação do equivalente de areia consoante o acréscimo dos ligantes hidráulicos	110

Figura 74 - Variação do valor de azul-de-metileno com o acréscimo de ligantes hidráulicos.....	110
Figura 75 - Evolução do pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo não plástico)	111

Índice de Quadros

Quadro 1 - Utilização de RCD em obras geotécnicas (Fortunato et al., 2009).	17
Quadro 2 - Índice de compactação (Fernandes, 1994).	24
Quadro 3 - Índice de consistência (Fernandes, 1994).	25
Quadro 4 - Diferentes Tipos de Cimento (Santos, 2008).	30
Quadro 5 - Requisitos mecânicos e físicos como valores característicos especificados (Santos, 2008).	30
Quadro 6 - Principais constituintes do cimento e sua simbologia (Santos, 2008).	31
Quadro 7 - Características médias dos cimentos (Santos, 2008).	31
Quadro 8 - Classificação de calcários de acordo com o teor de carbonato de calcário (Sequeira et al., 2007).	37
Quadro 9 - Classificação dos vários tipos de cal (Cristelo, 2001).	42
Quadro 10 - Diferentes tipos de cal e suas definições (adaptado de Coelho et al., 2009).	44
Quadro 11 - Frequência de amostragem e ensaio para centros de distribuição (Coelho et al., 2009).	46
Quadro 12 - Requisitos e procedimentos de ensaio para a inspeção preliminar da água de amassadura (NP EN 1008 (2003)).	47
Quadro 13 - Máxima concentração de cloretos na água de amassadura (NP EN 1008 (2003)).	48
Quadro 14 - Requisitos para substâncias prejudiciais ao betão (NP EN 1008 (2003)).	48
Quadro 15 - Frequência de ensaios na água (NP EN 1008 (2003)).	49
Quadro 16 - Frequência de ensaios para solos a estabilizar.	66
Quadro 17 - Frequência de ensaios da mistura de solo-cimento.	66
Quadro 18 - Exemplos de obras com aplicação de solo-cimento.	74
Quadro 19 - Exemplos de obras de tratamento de solos com cal.	75
Quadro 20 - Custos de construção de um aterro com solo plástico tratado, num exemplo de obra.	77
Quadro 21 - Custos de construção de um aterro com solo não plástico tratado, num exemplo de obra.	77
Quadro 22 - Características do solo plástico.	88
Quadro 23 - Diferentes teores de água do solo tratado com ligantes hidráulicos.	89
Quadro 24 - Evolução dos teores de água, antes e após a cura.	90
Quadro 25 - Baridade máxima antes e após a cura.	92
Quadro 26 - Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias.	93
Quadro 27 - Resistência à compressão diametral aos 7 e 28 dias.	94
Quadro 28 - Valores da tensão de rotura, resistência à tracção e módulo secante.	95
Quadro 29 - Caracterização do solo após mistura com os ligantes hidráulicos.	97
Quadro 30 - Resultados de ensaio ao pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo plástico).	99
Quadro 31 - Características do solo não plástico.	100
Quadro 32 - Teores em água do solo tratado com ligantes hidráulicos.	101
Quadro 33 - Evolução dos teores em água, antes e após a cura.	102
Quadro 34 - Baridade máxima antes e após a cura.	104
Quadro 35 - Resistência à compressão simples, aos 7 dias e 28 dias.	105

Quadro 36 - Resistência à compressão diametral, aos 7 dias e 28 dias.....	106
Quadro 37- Valores da tensão de rotura, resistência à tracção e módulo secante.....	107
Quadro 38 - Caracterização do solo após mistura com os ligantes hidráulicos.....	109
Quadro 39 - Resultados de ensaio ao pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo não plástico).....	111
Quadro 40 – Caracterização da cal viva.....	112
Quadro 41 – Caracterização do cimento.....	113

1. Introdução

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

A aplicação dos ligantes hidráulicos, cimento e cal, como produto de tratamento das propriedades dos solos é uma das técnicas mais antigas ao nível rodoviário e de construção.

O termo tratamento, quando utilizado no âmbito da estabilização de solos, refere-se ao processo de modificação das propriedades iniciais de um solo natural afim de o poder reutilizar com um determinado objectivo previamente definido. Os ligantes hidráulicos, em estudo neste trabalho, têm como objectivo a respectiva aplicação em técnicas de melhoria e estabilização, cuja definição se apresenta em seguida:

- Melhoria - acção com resultados quase instantâneos, que consiste em melhorar as propriedades geotécnicas do solo. Esta operação permite a utilização de equipamento convencional de terraplanagens. No entanto, este tratamento não garante a durabilidade ao gelo-degelo, permite apenas assegurar temporariamente as condições de traficabilidade dos materiais.
- Estabilização - técnica utilizada para alterar significativamente, a médio e a longo prazo, as características dos solos, predominantemente argilosos. Traduz-se por um endurecimento gradual da mistura ao longo das semanas e meses seguintes à compactação. Estes efeitos poderão ser tidos em conta no dimensionamento da obra (Cruz, 2008).

O tratamento de solos, com cimento e cal, é uma técnica em crescimento em Portugal, nomeadamente na construção rodoviária por parte de um grupo de projectistas e empreiteiros, e resulta das obrigações económicas associadas a uma preocupação ambiental crescente. O desenvolvimento desta técnica construtiva está associado à evolução tecnológica verificada nos últimos anos, permitindo actualmente uma boa qualidade e rendimentos interessantes na execução das camadas.

Estes tipos de tratamentos concedem uma melhoria no comportamento dos solos sob acções mecânicas, dinâmicas e estáticas, garantindo a estabilidade e a durabilidade da mistura, nomeadamente o efeito da erosão e de origem química.

Os principais benefícios conseguidos com a estabilização consistem na redução do teor em água do solo e do índice de plasticidade, bem como o aumento da trabalhabilidade, da consistência imediata e da resistência a médio/longo prazo. É ainda de salientar neste processo a alteração da granulometria dos solos e a alteração das características de compactação (Castelló, 2007).

1.2 Objectivos do trabalho

O presente trabalho tem como objectivo o estudo da estabilização de solos com diferentes combinações de cimento e cal. Combinações essas que para o solo plástico são: 3% cimento e 0% cal; 2% cimento e 1% cal; 1,5% cimento e 1,5% cal; 1% cimento e 2% cal; e 0% cimento e 3% cal. Para o solo não plástico, temos combinações de: 4% cimento e 0% cal; 3% cimento e 1% cal; 2% cimento e 2% cal; 1% cimento e 3% cal; e 0% cimento e 4% cal. Estas combinações têm como objectivo averiguar a viabilidade da parte técnica, económica e ambiental, assim como, a reutilização de solos locais e o melhoramento das suas características geotécnicas.

O tratamento de solos tem como base três elementos essenciais: protecção do ambiente, economia de energia e vantagens técnicas.

A protecção do ambiente provém da reutilização de solos locais, conduzindo a uma economia de materiais mais nobres, evitando assim a degradação do ambiente, à custa de se evitar o recurso de manchas de empréstimo e à colocação de materiais a depósito.

A economia de energia deve-se à redução dos meios e distâncias de transporte de onde resulta também a redução dos custos e inconvenientes.

As vantagens técnicas do tratamento são uma mais-valia permitindo uma redução na espessura das camadas com o aumento da resistência mecânica do solo devido ao melhoramento da granulometria que lhe confere maior atrito entre as partículas, assim como a diminuição do teor em água.

1.3 Estrutura do relatório

O restante relatório está organizado do seguinte modo:

- No capítulo 2, é abordado o importante tema da valorização dos resíduos de construção e demolição em obras geotécnicas, onde a legislação de diversos países tem evoluído no sentido de melhoramento das condições para os re-utilizadores deste tipo de resíduos, penalizando os que continuam a depositar os resíduos em aterro.
- No capítulo 3 são descritas as características, história e processo de fabrico dos constituintes de uma mistura de solo tratado com ligantes hidráulicos. Mais concretamente, é caracterizado o solo, o cimento e a cal.
- O capítulo 4 começa com a apresentação das técnicas de execução e a melhoria dos parâmetros geotécnicos após o tratamento para misturas de solo-cimento e solo-cal. Em seguida, é descrito o controlo de qualidade do processo de mistura. O capítulo termina com a descrição das patologias associadas a pavimentos semi-rígidos.

- Exemplos da aplicação de tratamentos com solo-cimento e solo-cal, em Portugal e na Europa, são apresentados no capítulo 5, onde são também tecidas algumas considerações económicas numa simulação de um pequeno trecho de uma estrada.
- No capítulo 6 é apresentado o estudo experimental efectuado. É descrito o estudo de formulação de uma mistura de solo-cimento e de solo-cal, e apresentadas as metodologias de ensaios.
- A análise de resultados para solo plástico e não plástico são apresentados no capítulo 7.
- Finalmente, no capítulo 8 são efectuadas considerações finais e apresentadas algumas sugestões para trabalhos de investigação futura.

2. Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas

2. Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas

2.1 Sociedade, tecnologia e ambiente: um trinómio para o desenvolvimento sustentável

Com o aparecimento da civilização humana e a constante necessidade de satisfazer as populações, notou-se um grande impacto no ambiente. Na pré-história, a estrutura social não era bem definida, resumindo-se as carências humanas à necessidade de alimentos, vestuário e segurança contra predadores. Como a densidade populacional era baixa e estavam constantemente à procura de alimentos de um lado para o outro, a deterioração do ambiente era reduzida e com o auxílio dos mecanismos naturais de auto-regulação permitia a sua completa recuperação. Na Idade da Pedra, o Homem tinha características de nómada, caçador e recolector, usando e abandonando a natureza de forma passiva (Borrego *et al.*, 2009).

Uma constante evolução da humanidade e das sociedades foi trazendo mais consequências para o ambiente. Particularmente, quando acerca de 300 mil anos, com a descoberta do fogo, a maneira como se consumiam os alimentos mudou, assim como a protecção contra animais e a capacidade de sobrevivência aumentaram, criando assim conflitos entre povos, com o seu aumento de população e consequentes migrações em busca de melhores zonas de predadores e áreas com maior número de recursos naturais.

No período Neolítico, dá-se a Revolução Agrícola, levando à fixação das populações e o aparecimento de povoações (sedentarização), que levam a um crescimento da população com consequências ambientais negativas.

Segundo (Borrego *et al.*, 2009), com o aparecimento da escrita por volta de 4000 A.C., na passagem da Pré-História para a História, foi descoberto o uso de minérios tais como o cobre, o bronze e o ferro. Com esta descoberta, as aldeias foram evoluindo até centros urbanos e pequenos reinos onde o poder era centralizado. Novas e poderosas armas foram desenvolvidas, permitindo a criação de impérios. Estas civilizações desenvolviam-se junto de locais com água, para aproveitar as técnicas de drenagem e irrigação para a agricultura.

Com a Revolução Industrial, dispararam as actividades económicas, a extracção em massa das matérias-primas e as descargas poluentes para o ar, água e solo. A invenção da máquina a vapor leva a sociedade a utilizar a energia térmica para produção de trabalho.

No século XX, houve um grande desenvolvimento científico e tecnológico. Este foi devido ao crescimento exponencial da população, que se concentrou em grandes centros urbanos (megacidades), aumentando assim as preocupações ambientais e de recursos naturais devido à procura de melhores condições de vida do Homem.

Nos últimos anos a poluição ambiental é de tal ordem que ultrapassa fronteiras, atingindo também o Espaço, como o comprovam as chuvas ácidas, a redução da espessura da camada de ozono e as alterações climáticas.

A partir dos anos 80, o Homem começa a tentar remediar a protecção do ambiente com medidas tais como a redução de emissões para a atmosfera, o elevado custo das tecnologias em fim-de-linha, a legislação em vários países aplicando o princípio do poluidor-pagador e do utilizador-pagador e a necessidade de um desenvolvimento sustentável garantindo assim um bom futuro das próximas gerações.

A ciência e a comunidade científica são os grandes responsáveis pelo esclarecimento dos cidadãos e pelas pressões existentes, havendo assim atitudes e mentalidades diferentes. Uma das contribuições mais importantes é dada pela engenharia, que procura encontrar a solução técnica para corrigir os problemas essencialmente de poluição. Nas tecnologias de fim-de-linha e nas tecnologias mais limpas para precaver o aumento da poluição, é a engenharia que tem um protagonismo maior. Na figura 1 é esquematizada a evolução das tecnologias ambientais.

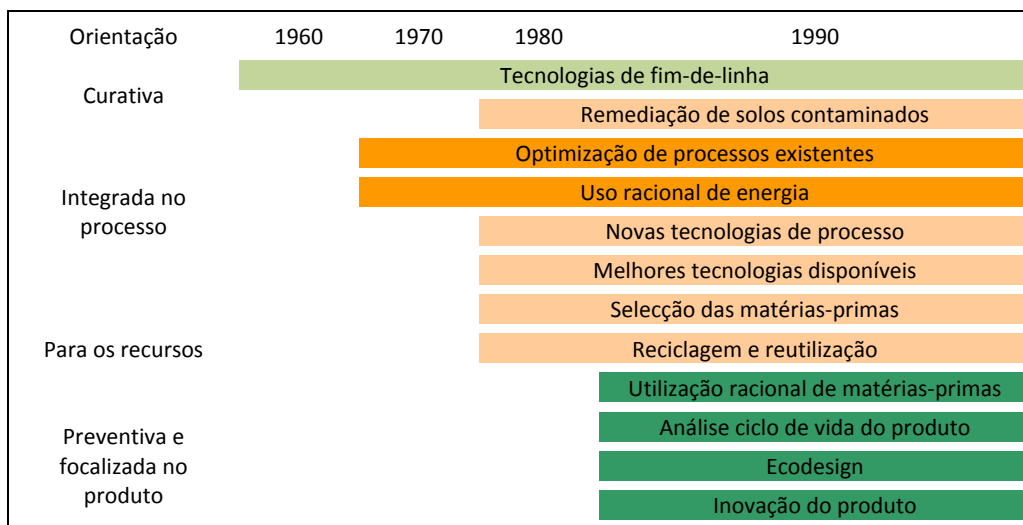


Figura 1 - Esquema da evolução das tecnologias ambientais (adaptado de Borrego *et al.*, 2009).

A definição da política ambiental é essencial para a gestão dos recursos naturais e para prevenção da poluição. A regulamentação ambiental, que implicará custos a curto prazo para as empresas, pode trazer inovação tecnológica às mesmas, contribuindo assim para a competitividade a longo prazo.

Em 1987, foi publicado o documento *Our Common Future*, que define desenvolvimento sustentável como, a longo prazo, a protecção ambiental e o crescimento económico são complementares. Isto é, para resolver os problemas ambientais são necessários recursos disponibilizados pelo crescimento económico, assim como o crescimento económico só é conseguido se a saúde humana e os recursos naturais não forem afectados pela deterioração

ambiental. A figura 2 apresenta um esquema do modo como funciona o conceito de desenvolvimento sustentável, estando suportado por três ideais: ambiente, economia e sociedade.

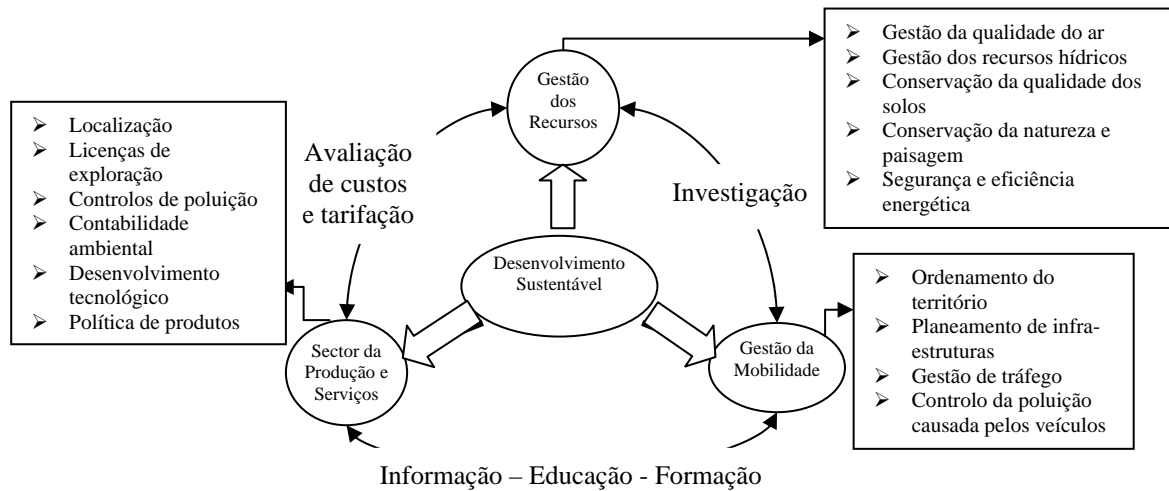


Figura 2 – Esquema de operacionalização do desenvolvimento sustentável (Borrego *et al.*, 2009).

Acompanhando o desenvolvimento tecnológico e as necessidades crescentes das populações, surgiram as primeiras obras geotécnicas, a exploração de recursos minerais e o estabelecimento dos primeiros centros urbanos. Mais tarde estas dariam origem ao aprovisionamento e distribuição de recursos naturais como a água. Um dos grandes incitadores destas obras foi a aparição da engenharia militar e mais tarde da engenharia civil.

O principal objectivo das obras geotécnicas é impulsionar o desenvolvimento económico e a qualidade de vida das populações, onde os hábitos consumistas são cada vez mais impertinentes. Este tipo de obras está presente na extracção de minérios para produção de bens de consumo (pedreiras e minas), na construção de infra-estruturas de mobilidade (estradas, túneis, viadutos) e urbanas (parques estacionamento e grandes construções verticais), na retenção e aproveitamento de recursos (barragens, furos) ou com a finalidade do tratamento de fim-de-linha de resíduos urbanos (aterros sanitários). Mas nem tudo é bom nas obras geotécnicas, pois o consumo energético da maquinaria mais pesada aliado à criação de resíduos sólidos e efluentes líquidos e gasosos que necessitam de tratamento, criam um grande impacte ambiental e muitas vezes irreversível (outros exemplos são a alteração da paisagem, o ruído, a destruição dos ecossistemas, a perda da biodiversidade e até as doenças humanas, como é o caso da silicose).

Podemos então ter quatro grandes indicadores de sustentabilidade em obras geotécnicas: Recursos, Ambiente, Economia e Sociedade (figura 3).

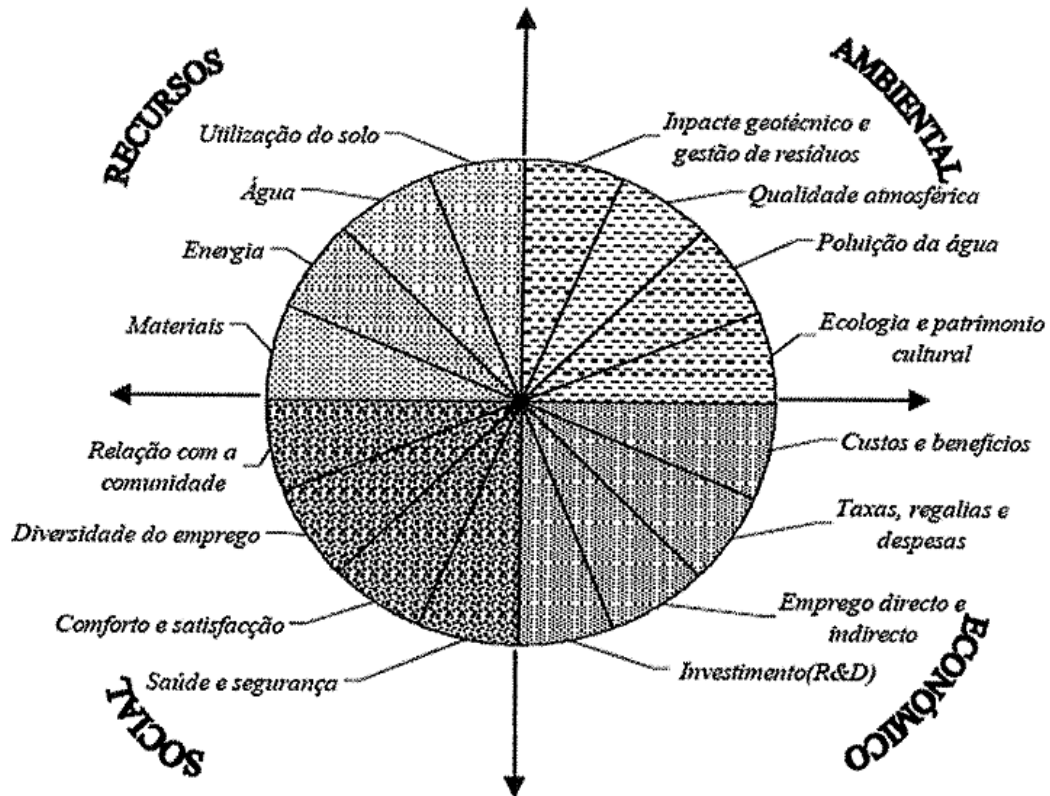


Figura 3 - Indicadores de sustentabilidade em obras geotécnicas (Navarro e Gama, 2006).

Os indicadores de sustentabilidade, aplicados a grandes obras são uma ferramenta importante para atingir o equilíbrio entre o desenvolvimento, a qualidade de vida e os recursos naturais (Borrego *et al.*, 2009).

2.2 Enquadramento Legislativo da Valorização de Resíduos

O Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) actualmente estabelecido, foi aceite devido à publicação do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, transpondo para o ordenamento jurídico interno a Directiva nº 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril (versão codificada).

Esta Directiva confirma no ordenamento jurídico nacional um conjunto de princípios de grande importância na gestão de resíduos, mais concretamente o predomínio da valorização de resíduos ao invés da sua eliminação, a noção de auto-suficiência, os princípios da prevenção e redução, da responsabilidade pela gestão, da responsabilidade do cidadão e da regulação.

Com a criação da Comissão de Acompanhamento de Gestão dos Resíduos (CAGER) e a introdução de um procedimento económico e financeiro da gestão de resíduos, foram também criados planos que visam simplificações administrativas como é exemplo o procedimento simplificado de licenciamento de operações de gestão de resíduos (Simão e Borges, 2009).

Atendendo à política de gestão de resíduos, é objectivo principal evitar e reduzir a sua produção assim como o seu carácter nocivo (cfr. Art.º 6º). De acordo com o Art.º 7º do RGGR, nos casos em que não é possível evitar a sua produção, a valorização será a opção mais viável para a gestão do resíduo, tendo em consideração o uso sustentável dos recursos.

A recente publicação da nova Directiva Quadro dos Resíduos (DQR), Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, clarifica a definição de resíduo, valorização e eliminação, assim como reforça as medidas para precaver os resíduos, introduzindo uma abordagem que englobe todo o ciclo de vida dos produtos e materiais ao invés de apenas a fase do resíduo. Esta publicação também reforça a redução dos impactes ambientais da criação e gestão de resíduos, aumentando assim o seu valor económico, e estimulando a valorização dos resíduos e a utilização dos materiais resultantes desta, de modo a proteger os recursos naturais.

É neste contexto que surgem alterações para assegurar alguns aspectos, tais como:

- A clarificação de conceitos relevantes no domínio da gestão de resíduos, mediante a inclusão das definições de prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem;
- A alteração das definições de valorização e eliminação, a fim de garantir uma distinção clara entre os dois conceitos, com base numa diferença efectiva em termos de impacte ambiental;
- A clarificação para saber quais os casos em que as substâncias ou objectos resultantes de um processo produtivo, cujo principal objectivo não passe pela sua própria produção, são considerados subprodutos e não resíduos, sendo que a nível nacional se encontra já em implementação um projecto concebido com esse desígnio, o Projecto Resíduo/Subproduto;
- A distinção dos casos em que determinados resíduos deixam de ser considerados como tal, atingindo o fim do estatuto de resíduo mediante a definição de critérios de estabelecimento dessa desclassificação, que ofereçam uma grande protecção ambiental, assim como benefícios ambientais e económicos;
- A definição dos termos em que deverá ser feita a apreciação do estatuto de resíduo dos solos escavados não contaminados e de outros materiais naturais utilizados em locais diferentes do local em que foram escavados;
- A introdução da responsabilidade alargada do produtor é considerada como um dos meios para apoiar a concepção e produção de bens em moldes que tenham plenamente em conta e facilitem a utilização eficiente dos recursos durante todo o seu ciclo de vida;

- A promoção do apoio à utilização de materiais reciclados (por exemplo o papel reciclado), em consonância com a hierarquia dos resíduos e no intuito de criar uma sociedade da reciclagem, não apoiando, na medida do possível, a deposição em aterros, nem a incineração desses materiais reciclados;
- As isenções de registo para os sistemas de recolha de resíduos que não sejam operados a título profissional, uma vez que apresentam um grau de risco mais baixo e que contribuem para a recolha selectiva de resíduos (por exemplo a recolha de resíduos de medicamentos pelas farmácias, os sistemas de retoma de bens de consumo nas lojas e os sistemas colectivos de recolha nas escolas);
- A necessidade de estabelecer de forma mais pormenorizada o âmbito e o teor da obrigação de planeamento da gestão de resíduos, e integrar no processo de desenvolvimento ou revisão dos planos de gestão de resíduos a necessidade de tomar em consideração os impactes ambientais da produção e da gestão de resíduos;
- A elaboração de programas de prevenção de resíduos que incidam nos principais impactes ambientais e tenham em conta todo o ciclo de vida dos produtos e materiais. Essas medidas deverão prosseguir o objectivo de dissociar o crescimento económico dos impactes ambientais relacionados com a produção de resíduos com vista a reforçar as disposições em matéria de prevenção de resíduos,
- A regulamentação da gestão de óleos usados que se fazia ao abrigo da Directiva 75/439/CEE do Conselho, de 16 de Junho de 1975, foi integrada na nova directiva. Uma das principais alterações previstas assenta em que, pese embora a ordem de prioridades da hierarquia dos resíduos, deverá dar-se prioridade às soluções que produzam o melhor resultado global em termos ambientais;
- A clarificação das condições em que a incineração de resíduos urbanos é eficiente do ponto de vista energético podendo, deste modo, ser classificada como uma operação de valorização;
- A promoção da recolha selectiva dos bio-resíduos e o seu tratamento adequado a fim de produzir composto e outros materiais ambientalmente seguros, em conformidade com a hierarquia dos resíduos e para efeitos de redução das emissões de gases com efeito de estufa provenientes da eliminação de resíduos em aterros;
- A necessidade de serem estabelecidos objectivos para a preparação, reutilização e reciclagem de resíduos, a caminho de uma sociedade europeia da reciclagem com um elevado nível de eficiência de recursos.

De acordo com a legislação comunitária ou por iniciativa nacional, é definida legislação específica em matéria de resíduos – resíduos de construção e demolição – onde o principal propósito é dar resposta às especificações ligadas a alguns fluxos de resíduos como por exemplo as embalagens, óleos usados, pilhas, etc.

Segundo Simão e Borges (2009), o ramo da construção civil é o grande responsável pelo total de resíduos produzidos tanto a nível nacional como na União Europeia, onde são apresentados resíduos de constituição diversa, com diferentes níveis de perigo apresentado pelos seus fragmentos. As dificuldades mais comuns para o referido sector são a difícil quantificação, a deposição não controlada e o recurso a sistemas de tratamento em fim-de-linha. Tudo isto leva a situações ambientais indesejáveis e incompatíveis com os objectivos nacionais e comunitários, originando a criação da legislação para o fluxo dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

Estes resíduos têm um grande potencial de valorização, devido à grande percentagem de material que pode ser reutilizável e reciclável, ultrapassando uma valorização, em alguns Estados-Membros, de 80%. Na sequência desta valorização houve necessidade de criar um regime jurídico específico para a gestão dos RCD, de acordo com os princípios e ideias da legislação comunitária e nacional no que diz respeito à matéria de resíduos, criando-se assim o Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de Março.

Com este diploma, criaram-se condições legais para uma optimização da gestão dos RCD, dando natural destaque à prevenção da produção e perigosidade, à triagem na origem, à reciclagem e a outras formas de valorização, baixando a utilização de recursos naturais e minimizando o recurso à deposição em aterro, aumentando assim o tempo de vida útil dos mesmos.

Este Decreto-Lei tem interligação com outras legislações, tais como o RGGR (cfr. Artº 22º) e a legislação aplicável aos fluxos específicos de resíduos frequentemente contidos nos RCD (cfr. Artº 14º).

A interligação legislativa está também contemplada no Código dos Contratos Públicos (CCP) e no Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação (RJUE) para cumprimento do regime de gestão dos RCD.

A publicação do Decreto-Lei nº 46/2008 registou algumas alterações, tais como:

- A possibilidade de reutilização de solos e rochas não contendo substâncias perigosas nos termos da lei, mas preferencialmente na obra de origem;
- É estabelecida uma hierarquia de gestão em obra que privilegia a reutilização em obra, seguida de triagem na obra de origem dos RCD, onde a produção não se pode evitar. Caso a triagem no local de produção dos resíduos se demonstre inviável, esta poderá realizar-se em local afecto à obra, sendo que o transporte dos RCD para operadores licenciados para o efeito se encontra na base desta hierarquia de gestão;

- A criação de mecanismos inovadores ao nível do planeamento (elaboração e execução do Plano de Prevenção e Gestão de RCD no âmbito das obras públicas) e do Registo de Dados de RCD (obras particulares) que aliados às disposições emanadas do CCP e do RJUE, permitem condicionar os actos administrativos associados ao início e conclusão das obras à prova de uma adequada gestão destes resíduos;
- É estabelecida a obrigação de triagem prévia à deposição dos RCD em aterro;
- A introdução de uma taxa de gestão de resíduos específica para a deposição de inertes de RCD, de valor inferior ao previsto no Decreto-Lei nº 178/2006, de forma a ajustar o referido instrumento tributário às condicionantes criadas pela concorrência dos agregados resultantes da actividade extractiva;
- A responsabilidade pela gestão dos RCD dos vários intervenientes no seu ciclo de vida, na medida da sua intervenção e nos termos do diploma (donos de obra, empreiteiros, câmaras municipais).

Embora seja uma excelente ajuda a implementação da legislação recente, existem problemas associados à mesma. É o caso do escoamento dos inertes reciclados perante os preços concorrentes apresentados pelos inertes naturais com origem numa unidade extractiva com alguma dimensão, obrigando a uma política de promoção do consumo dos materiais reciclados, que passariam por criar medidas legais ou normativas que obrigassem à inclusão de uma percentagem mínima de substituição de agregados naturais por agregados reciclados ou incentivos da Administração Pública com a diminuição de prazos de licenciamento ou das taxas correspondentes.

O ciclo de vida de qualquer bem inicia-se no fabrico do produto e termina na gestão do resíduo. Sendo o produtor/fabricante o responsável pelo início desse ciclo, é este que tem maior responsabilidade em toda a vida do produto, sendo-lhe atribuída responsabilidade da gestão do resíduo no âmbito da implementação do Princípio da Responsabilidade Alargada do Produtor (PRAP), sem prejuízo da co-responsabilização com os restantes intervenientes, na respectiva intervenção e responsabilidade.

No nosso país, o PRAP já se integrou na política de gestão de fluxos específicos de resíduos como, por exemplo, as embalagens, as pilhas, os pneus, os equipamentos eléctricos/electrónicos, os veículos e os óleos lubrificantes.

A aplicação do PRAP obedece a um procedimento que implica a selecção do quadro de referência, onde é recomendada a criação de sistemas integrados e individuais por parte do bem (produtor) e os modelos da criação das entidades gestoras que se propõem a gerir os sistemas integrados e os termos do processo de licenciamento que lhes está associado. Cabe então à Administração

Pública, integrar o princípio do contexto do planeamento estratégico sectorial, estabelecer o enquadramento legal, impulsionar a constituição de entidades gestoras e proceder ao seu licenciamento, proceder ao acompanhamento e monitorização da actividade desenvolvida pelos sistemas e reforçar as parcerias institucionais.

Na valorização de resíduos devemos procurar evitar a produção de resíduos e utilizá-los como recursos, numa mentalidade de sociedade da reciclagem (Simão e Borges, 2009).

2.3 Valorização dos Resíduos de Construção e Demolição em Obras Geotécnicas

O consumo de minerais e minérios na Europa disparou abruptamente nos últimos anos, com um consumo de 15 toneladas/ano por cada habitante. Esse material é extraído da Crosta Terrestre e utilizado, em 50% do seu total, na construção civil.

A reciclagem dos materiais de construção já era aplicada na era do povo Egípcio, Grego e Romano, enquanto na época moderna, começou a ganhar admiradores na Europa depois da 2ª grande guerra, quando se utilizaram agregados britados para reconstruir edifícios.

RCD deverá ser qualquer resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição, e da derrocada de edifícios. Estão incluídos nestes resíduos os solos, as rochas, a vegetação proveniente dos movimentos de terra e fundações, e os materiais resultantes da manutenção das vias de comunicação.

Na União Europeia (UE) produzem-se cerca de 850 milhões de toneladas anuais de RCD, representando 31% do total de resíduos produzidos em toda a UE. A distribuição dos diferentes RCD varia consoante o país, devido às necessidades de cada um, ao tipo de edifícios utilizados e ao tipo de obras de engenharia, como podemos verificar na figura 4.

Em 2008 a UE definiu o objectivo de chegar aos 70% dos RCD em 2020, mesmo com um valor a rondar os 6% em 2005. Nos presentes dias, o uso mais comum neste tipo de resíduos são o betão, os tijolos, as telhas e o asfalto, não esquecendo também a quantidade significativa que representam os solos, como se pode verificar na figura 5.

De todos os países da UE onde é possível obter dados de reciclagem de RCD, pode-se verificar que existem países onde a percentagem de reciclados ultrapassa os 60%, como se pode verificar na figura 6.

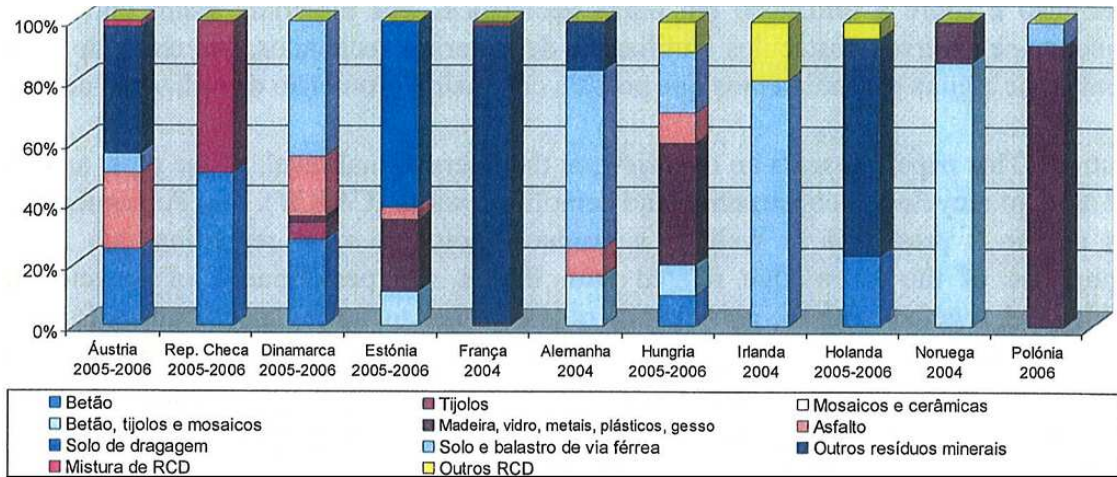


Figura 4 - Composição dos RCD (Fortunato *et al.*, 2009).

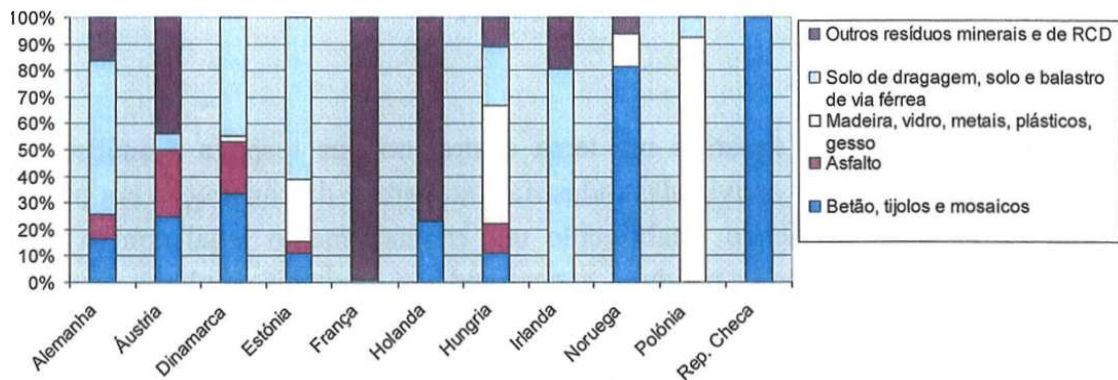


Figura 5 - Composição dos reciclados de RCD (Fortunato *et al.*, 2009).

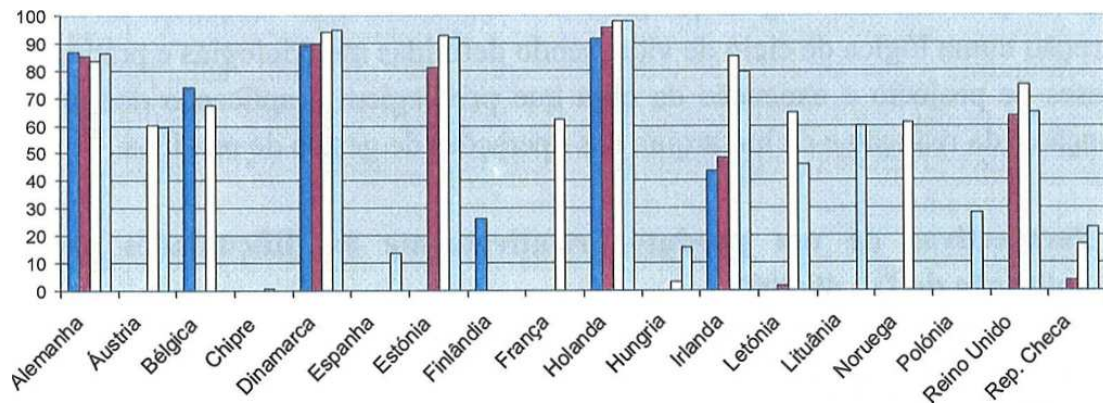


Figura 6 - Reciclagem de RCD em % da quantidade produzida (Fortunato *et al.*, 2009).

A Holanda é um dos países mais dinâmicos na reciclagem dos resíduos, nomeadamente, para uso desses materiais na construção rodoviária. O próprio governo incentiva a investigação, os projectos de demonstração e o desenvolvimento de especificações e orientações para a utilização dos materiais reciclados. As políticas de utilização de solos e restrições à extracção de materiais naturais, o estabelecimento de taxas exorbitantes sobre a deposição em aterro, a proibição de depositar os RCD em aterro e a exigência para que os produtores utilizem a reciclagem em vez de

serem penalizados com a eliminação, são algumas das medidas que o governo holandês tomou para protecção ambiental.

Em Portugal, o enquadramento legal foi criado a partir de 1985 (Decreto-Lei nº 488/85, de 25 de Novembro), sofrendo várias actualizações até à última revisão do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Novembro. Com a necessidade de regulamentar a gestão de fluxos específicos de resíduos, surgiu em 2008 o Decreto-Lei nº 46/2008, de 12 de Março, que regula os resíduos produzidos pelo sector da construção.

A reutilização de solos e rochas, obriga a empreitada a seguir um projecto de execução, que define as condições da realização e especificações dos materiais de incorporação. No entanto o empreiteiro não tem qualquer responsabilidade nesta aplicação do material reciclado, pois deverá estar a cargo do projectista, na fase de execução do projecto. A utilização dos RCD em obra (artigo 7º) depende do projecto em si, do dono de obra, do projectista, da fiscalização, etc., e é pouco utilizada a valorização pelos mercados de operadores, levando a que seja fraca a sua utilização. Pode-se apontar como causas a reduzida taxa para deposição de RCD em aterro sanitário comparativamente com a taxa de deposição de outros resíduos inertes (2€/ton para RCD e 5€/ton para os restantes), a dificuldade de colocação à venda a preços competitivos e a utilização destes materiais ainda levantar dúvidas relativamente à qualidade. Além destas há também a referir que os RCD não podem ser utilizados em obra se não se encontrarem regulamentados.

O Decreto-Lei nº 46/2008 obriga o produtor/empreiteiro a assegurar a manutenção dos RCD durante o mínimo tempo possível, dependendo da sua perigosidade, mas que não poderá exceder os 3 meses.

O transporte de RCD está regulamentado pelas portarias nº 335/97 e nº 417/2008, prevendo a utilização de guias de acompanhamento de acordo com o modelo previsto.

Devido ao fraco conhecimento das características dos materiais reciclados de construção e demolição, as instituições de Investigação e Desenvolvimento (I&D) terão de ter um papel importante na realização de especificações e na promoção da utilização destes resíduos. Nos últimos anos foram-se desenvolvendo alguns projectos de investigação, no âmbito da aplicação de materiais reciclados em obras de engenharia. O Comité Técnico 154 do CEN também tem desenvolvido algum trabalho no sentido de considerar os materiais reciclados dos RCD.

Em Portugal foram publicadas, em 2006, as Especificações Técnicas LNEC:

- E 471 – Guia para a Utilização de agregados Reciclados Grossos em Betões de Ligantes Hidráulicos;
- E 472 – Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central;

- E 473 - Guia para a utilização de Agregados Reciclados em Camadas Não Ligadas de Pavimentos;
- E 474 – Guia para utilização de resíduos de Construção e demolição em aterro e Camada de Leito de Infra-Estruturas de Transporte.

Com todas estas especificações, espera-se que não se comprometa a qualidade das obras, e que os materiais reciclados satisfaçam os requisitos. Em destaque está a E 474 que apresenta recomendações e requisitos para utilização de RCD em aterros e camadas de leito de infra-estruturas de transporte (rodoviárias, aeroportuárias e ferroviárias).

A qualidade e aplicabilidade dos RCD estão directamente relacionadas com os métodos empregues em obra para desmantelamento e demolição, exigindo-se assim que a demolição seja feita de forma selectiva, separando os materiais de acordo com as suas características.

Normalmente são utilizadas máquinas para executar a demolição, que através do próprio peso e/ou por impacto, provocam o desmoronamento. Há, também, trabalhos que requerem equipamento hidráulico.

Este tipo de equipamento é ambientalmente assertivo, uma vez que os níveis de vibração são baixos, tal como o ruído e a poluição atmosférica. Além da preocupação ambiental, estes equipamentos permitem também a separação de resíduos e redução das suas dimensões, que mais tarde se irão reflectir na redução de custos de transporte para uma unidade de reciclagem e valorização, associados a uma boa fragmentação (Fortunato *et al.*, 2009).

Em seguida, no quadro 1, apresenta-se alguns exemplos de obras geotécnicas onde se utilizou RCD.

Quadro 1 - Utilização de RCD em obras geotécnicas (Fortunato *et al.*, 2009).

ORIGEM	APLICAÇÃO	LOCAL	DATA	REFERÊNCIA
RCD – pavimento antigo	Camada de sub-base em agregados	Austria: A1 Viena-Salzburgo	1990	Sommer, 1994
Betão processado de RCD	Camada de base em agregados	França: RN 6	1982	SETRA, 1984
Fracção 0/20 obtida como sub-produto de britagem RCD	Aterro rodoviário (50000m ³)	Espanha: Barcelona	Vários anos	Fernández, 2002
RCD	Sub-base (80m)	Noruega: Auto—estrada E6	2003	Aurstad et al., 2009
RCD	Sub-base	Noruega: Aeroporto de Oslo	1999	Bragstad, 2005
RCD – pavimento antigo	Sub-base	Austrália: Auto-estrada	1998	PIARC, 2007
RCD – pavimento antigo	Base e Sub-base	Austrália: Estrada em Welshpool	2008	Leek, 2008
RCD – edifícios demolidos no local	Sub-base	Lisboa: ParqueExpo Arruamentos urbanos	1998	Silveira, 2002
RCD – edifícios demolidos no local	Aterros e coroamento	Barreiro: Fábrica de Adubos	2000	Costa, 2006

(continua)

Quadro 1 - Utilização de RCD em obras geotécnicas (Fortunato *et al.*, 2009) (continuação).

ORIGEM	APLICAÇÃO	LOCAL	DATA	REFERÊNCIA
RCD – edifícios demolidos no local	Aterro	Mourão: Fábrica da Portucel - Recicla	2002	Costa, 2006
RCD da demolição do Estádio das Antas	Aterro	Porto: Dolce Vita	2004	BCSD, 2006
Balastro antigo	Aterro	Reino Unido: Leeds	2003	WRAP, 2009
Balastro antigo	Reforço da via férrea	Via férrea Lisboa-Porto	2003	Fortunato, 2005
RCD	Aterro de fundação de obra marítima	Hong Kong	2002	Yeung et al., 2006
RCD	Aterro em obras de reparação de serviços	Brasil: Piracicaba	2006	Vedroni e carvalho, 2006
RCD	Sub-base	Reino Unido: Bracknell	1994	WRAP, 2009
RCD	Aterro, leito de pavimento, sub-base	Reino Unido: Londres	2003	WRAP, 2009
RCD	Aterro em obras de reparação de serviços	Itália: Roma	2000	D'Andrea e Rossi, 2005

3. Materiais constituintes de uma mistura de solo tratada com ligantes hidráulicos

3. Materiais constituintes de uma mistura de solo tratada com ligantes hidráulicos

3.1 Solo

O comportamento dos diferentes tipos de ligantes hidráulicos varia consoante as características do solo a tratar. Factores como a natureza dos solos, a granulometria, a constituição química e mineralógica, assim como as condições de trabalho (teores de humidade, meios de pulverização, homogeneização e compactação disponíveis) influenciam bastante os resultados obtidos.

A técnica de estabilização de solos com cimento e com cal tem por objectivo melhorar o comportamento dos solos sob acções mecânicas, estáticas e dinâmicas, garantindo-se a durabilidade e estabilidade da solução, nomeadamente aos efeitos da erosão e outros de origem química.

3.1.1 Tipos de Solo

O significado original de solo vem do latim da palavra "solum" que em português clássico significa chão.

O Vocabulário de Estradas e Aeródromos (LNEC, 1962) define solo como o “conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação na água; os vazios entre as partículas contêm água e ar, separada ou conjuntamente”. Outra definição de solo é dada por Mineiro (1978): “solo é toda a ocorrência natural de depósitos brandos moles, cobrindo um substrato rochoso e que é produzida por desintegração e decomposição física e química das rochas, podendo ou não conter matéria orgânica”.

Quando falamos em solos, dizemos que são materiais polifásicos, isto é, são constituídos em geral por três fases: as partículas sólidas, a água e o ar. A água e o ar preenchem os chamados vazios ou poros do solo. Quando os vazios estão totalmente preenchidos por água não existe, obviamente, fase gasosa e o solo diz-se saturado (Fernandes, 1994).

Os solos na sua maioria são resultantes da desintegração e decomposição das rochas constituintes da crosta terrestre, cujos agentes erosivos são: temperatura, pressão, alterações cristalinas, hidratação, agentes biofísicos – vegetação, agentes químicos – dissolução, oxidação, redução, hidrólise, lixiviação. As rochas podem resultar da cristalização de magma ejectado do interior da terra para a crosta terrestre ou, em alternativa, podem ter-se desenvolvido a partir da alteração de outras rochas em resultado de variações de pressão e temperatura (Fernandes, 1994).

Os principais tipos de solos existentes são:

- Solos Argilosos;
- Solos Siltosos;

- Solos Arenosos;
- Solos Cascalhentos;

Os solos argilosos têm a sua origem na desagregação de rochas, que normalmente contêm feldspato, originadas por ataques químicos (por exemplo, pelo ácido carbónico) ou físicos (erosão, vulcanismo), que produzem a fragmentação em partículas muito pequenas, com diâmetros próximos de 0,004 mm.

Normalmente as jazidas são formadas pelo processo de depósito aluvial, ou seja, as partículas menores são levadas por correntes de água e depositadas no lugar onde a força hidrodinâmica já não é suficiente para mantê-las em suspensão. Podendo ser encontradas próximo de rios, muitas vezes formando barrancos nas margens. Apresenta-se em branco e vermelho, sendo geralmente estáveis nas condições termodinâmicas e geoquímicas da superfície terrestre ou de crosta rasa.

Estes solos são menos arejados que os arenosos que os torna menos permeáveis, sendo o percurso de atravessamento da água lento e ficando armazenada, devido aos seus grãos serem menores e bem próximos uns dos outros, dificultando a passagem da água. A sua composição é rica em óxidos de alumínio e de ferro.

No solo, a fracção de argila, componente comum das lamas ou barro, como são conhecidos popularmente, é constituída de minerais desse grupo das argilas aos quais se agregam hidróxidos coloidais floculados e diversos outros componentes cristalinos ou amorfos.

Seguidamente descrevem-se alguns tipos de argilas:

- **Argila natural:** É uma argila que foi extraída e limpa, e que pode ser utilizada no seu estado natural sem a necessidade de adicionar outras substâncias.
- **Argila refractária:** Argila que adquire este nome em função de sua qualidade de resistência ao calor. As suas características físicas variam, umas são muito plásticas finas, outras não, apresentando geralmente alguma proporção de ferro e encontrando-se associadas a depósitos de carvão. São utilizadas nas massas cerâmicas dando maior plasticidade e resistência em altas temperaturas, assim como se usam na produção de placas refractárias que actuam como isolantes e revestimentos para fornos.
- **Argilas em bola (*Ball-Clay*):** São argilas secundárias muito plásticas, de cor azulada ou negra, apresenta alto grau de contracção tanto na secagem quanto na queima. Sua grande plasticidade impede que seja trabalhada sozinha, ficando pegajosa na adição com a água. Esta é adicionada em massas cerâmicas para proporcionar maior plasticidade e tenacidade à massa, vitrificando aos 1300°C.
- **Argilas para grés:** Argila de grão fino, plástica, sedimentária e refractária. Vittrifica a uma temperatura entre 1250°C e 1300°C, sendo os feldspatos responsáveis pela fundição do

material. Após a queima a sua coloração é variável, indo do vermelho escuro ao rosado e até mesmo acinzentado do claro ao escuro.

- **Argilas vermelhas:** Argilas plásticas com alto teor de ferro, resistindo a temperaturas até 1100°C, embora fundam a uma temperatura maior e podem ser utilizadas com vidrados para grés. A sua coloração é avermelhada escura e quando húmida pode chegar ao castanho.
- **Bentonite:** Argila vulcânica muito plástica, contém mais sílica do que alumínio, tendo a sua origem nas cinzas vulcânicas. Apresenta uma aparência e tacto gorduroso, podendo aumentar entre 10 e 15 vezes seu volume ao entrar em contacto com a água. É adicionada a argilas para aumentar sua plasticidade e funde ao 1200°C.
- **Argilas expandidas:** A argila expandida é produzida em grandes fornos rotativos, utilizando argilas especiais que se expandem a altas temperaturas, cerca de 1100°C, transformando-as num produto leve, de elevada resistência mecânica, ao fogo e aos principais ambientes ácidos e alcalinos, como os outros materiais cerâmicos. As suas principais características são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, além de excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico.

Os solos siltosos são constituídos pelo conjunto de fragmentos de minerais ou de rocha, menores do que areia fina e maior do que argila. Segundo a escala de Wentworth, de amplo uso em geologia, o seu diâmetro encontra-se compreendido entre 0,004 mm e 0,064 mm.

Este tipo de solo apresenta uma baixa plasticidade e resistência quando seco ao ar. As suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fracção silte.

Quando comparado a olho nu com solos argilosos, torna-se difícil de distinguir o silte das argilas, embora estas se distingam por poderem ser separadas devido à sua plasticidade, que no caso do silte é pouca ou nenhuma.

O silte é produzido pelo esmagamento mecânico das rochas, ao contrário da argila que resulta da erosão química. Este esmagamento mecânico pode dever-se à acção glaciária, pela abrasão, erosão eólica, bem como pela erosão devido às águas, como nos leitos dos cursos de água.

Também podemos designar silte por poeira de pedra, especialmente quando produzido pela acção glaciária, podendo ocorrer como um depósito ou material transportado por cursos de água ou por uma corrente de oceano ou mesmo pode ser carregado a longas distâncias pelo ar como poeira.

Os solos arenosos são aqueles constituídos na sua maioria de grãos com tamanhos compreendidos entre os 0,075 mm e 2 mm, sendo formados principalmente por cristais de quartzo e óxido de ferro, para o caso de solos de regiões tropicais. Os solos arenosos têm um teor

de areia superior a 70%, e devido à sua constituição contém um baixo teor de humidade. Também possuem argilas e outros compostos em menor percentagem, formando assim, um solo permeável devido aos seus poros de dimensões elevadas (macro poros) entre os grãos de areia pelos quais a água e o ar circulam com relativa facilidade. Por isso, nos solos arenosos geralmente o escoamento de água através dos poros costuma ser rápido e estes secam rapidamente após as chuvas. Nesse escoamento a água pode levar sais minerais de forma considerável, contribuindo para tornar o solo pobre nesses nutrientes.

Os solos cascalhentos são solos constituídos por elementos de rocha com uma certa variação de tamanho. Na geologia, é qualquer rocha com as dimensões compreendidas entre os 2 mm na sua menor dimensão e não mais do que 75 mm. Devido às suas dimensões os espaços entre as partículas deixam ser filtradas e assim torna-o um solo permeável.

Os solos granulares, compostos por pedras, pedregulhos, cascalhos e areias (partículas de dimensões maiores), podem ser designados por solos não coesivos. Estas misturas, compostas por muitas partículas, individualmente soltas, que no estado seco não aderem uma à outra, são altamente permeáveis. Isto deve-se ao facto de existirem, entre as partículas, espaços vazios relativamente grandes e interligados entre si.

Num solo não coesivo, em estado seco, é fácil de reconhecer, por simples observação, os tamanhos dos diferentes grãos. A capacidade deste tipo de solo para suportar cargas depende da resistência ao deslocamento e à movimentação, entre as partículas individuais. Ao compactar, e assim aumentar os pontos ou superfície de contacto, entre os grãos, individualmente, por meio da quantidade de grãos por unidade de volume, aumenta-se a resistência ao deslocamento entre as partículas e, simultaneamente, melhora-se a transmissão de força entre os mesmos.

Nos solos coesivos, os grãos destes são muito finos, quase farinhentos, e aderem firmemente uns aos outros e não podem ser reconhecidos a olho nu. Os espaços vazios entre as partículas são muito pequenos. Devido à sua estrutura estes solos apresentam resistência à penetração de água, absorvendo-a muito lentamente. Entretanto, uma vez que tenha conseguido penetrar no solo, a água também encontra dificuldade para ser extraída do interior do mesmo.

Ao receber água, tendem a tornar-se plásticos e apresentam maior grau de estabilidade quando secos.

É devido às forças adesivas naturais, coesão, existentes entre as pequenas partículas que compõem estes tipos de solo, que a compactação por vibração não é a ideal nesta situação. Estas partículas tendem a agrupar-se, dificultando uma redistribuição natural entre elas, individualmente.

A classificação dos solos é subdividida quanto ao tipo de dimensões, quanto à origem e relacionada com as aplicações dos solos como materiais de construção.

Para identificar um solo, devem ser realizados ensaios de granulometria e limites de consistência ou de Atterberg. A composição granulométrica não é mais do que a percentagem da distribuição das partículas, de acordo com as suas dimensões, podendo ser determinada por peneiração ou por sedimentação. Na figura 7 pode-se observar a designação de um solo consoante o resultado da sua curva granulométrica.

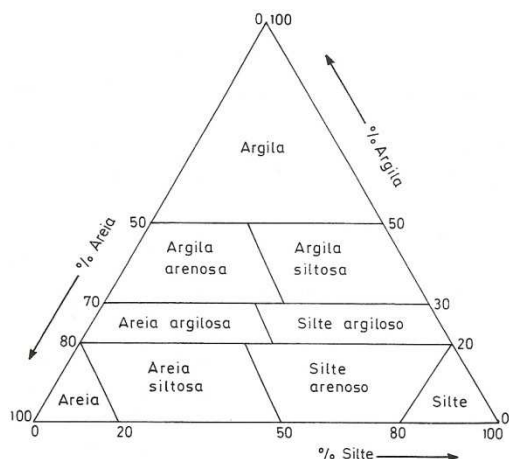


Figura 7 - Diagrama indicativo das designações a atribuir aos solos de acordo com a respectiva curva granulométrica (Fernandes, 1994).

Os solos granulares, essencialmente as areias e os cascalhos, no que diz respeito à compactidade, classificam-se como soltos, medianamente compactos e compactos ou densos, conforme descrito no quadro 2.

Quadro 2 - Índice de compactidade (Fernandes, 1994).

Areia	I_D (%)
Muito solta	0 – 15
Solta	15 – 35
Medianamente compacta	35 – 65
Compacta ou densa	65 – 85
Muito compacta ou muito densa	85 – 100

Os solos argilosos classificam-se quanto à consistência como muito moles, moles, médios, duros, muito duros e rijos (quadro 3), e também poderão designar-se como lodosos caso o teor em matéria orgânica seja elevado.

Quanto à origem, pode-se classificar os solos como residuais ou transportados. Os primeiros resultam da desintegração e/ou decomposição da rocha mãe, ocupando o mesmo espaço da rocha progenitora. Nos solos transportados ou sedimentares, a sua formação ocorre mais ou

menos distante da rocha que lhe dá origem, devido ao arrastamento pela água, vento, glaciares ou pela acção da gravidade.

Quadro 3 - Índice de consistência (Fernandes, 1994).

Argila	I_c
Muito mole	0,0 – 0,25
Mole	0,25 – 0,50
Média	0,50 – 0,75
Dura, Muito dura e Rija	> 0,75

Segundo a Classificação Unificada (figuras 8 e 9), destinada aos solos a serem utilizados como materiais de aterro (aterros para estradas, aeródromos, barragens de terra, etc.), a divisão é feita em 15 grupos, baseando-se na composição granulométrica e nos limites de consistência.

Esta classificação só foi possível realizar após experiência de muitas obras, associando os comportamentos para os diversos fins a cada um dos grupos de solos.

Existe também outra classificação de solos, a AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) com a finalidade de ser aplicada maioritariamente nas construções rodoviárias (figura 10).

Os solos utilizados neste trabalho foram concretamente um solo plástico e um solo não plástico:

- Solo Plástico - Define-se plasticidade como sendo a propriedade dos solos finos que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados sob certas condições de humidade. Segundo a NP 143 (1969), a plasticidade é a propriedade de solos finos, entre largos limites de humidade, que permite que se submetam a grandes deformações permanentes, sem sofrer ruptura, fissuramento ou variação de volume apreciável.
- Solo Não Plástico – São todos os solos em relação aos quais não é possível a determinação dos limites de Atterberg.

Critérios para designação dos símbolos e nome dos grupos utilizando ensaios de laboratórios (a)				Classificação do solo		
				Símbolo do grupo	Nome do grupo (b)	
SOLOS GROSSOS mais de 50% retido no peneiro n.º 200	Cascalho mais de 50% da fracção	Cascalhos limpos (c)	$C_{ij} \geq 4$ e $1 \leq C_C \leq 3$ (e)	GW	Cascalho bem granulados (f)	
		Menos de 5% finos	$C_{ij} < 4$ e/ou $1 > C_C > 3$ (e)	GP	Cascalho mal granulados (f)	
	grossa retirada no peneiro n.º 4	Cascalhos com finos (c) Mais de 12% de finos	Finos classificados como ML ou MH		GM	Cascalho siltoso (f), (g), (h)
			Finos classificados como CL ou CH		GC	Cascalho argiloso (f), (g), (h)
	Areias 50% ou mais da fracção grossa passa no peneiro n.º 4	Areias limpas (d)	$C_{ij} \geq 6$ e $1 \leq C_C \leq 3$ (e)	SW	Areia bem graduada (i)	
			$C_{ij} < 6$ e/ou $1 > C_C > 3$ (e)	SP	Areia mal graduada (i)	
		Areias com finos (d) Mais de 12% de finos	Finos classificados como ML ou MH	SM	Areia siltosa (g), (h), (i)	
			Finos classificados como CL ou CH	SC	Areia argilosa (g), (h), (i)	
	SOLOS FINOS 50% ou mais passado no peneiro n.º 200	Siltes e Argilas $W_L < 50\%$	Inorgânico	IP > 7 e situa-se na linha A ou acima desta (j)	CL	Argila magra (k), (l), (m)
				IP < 4 ou situa-se abaixo da linha A (j)	ML	Silte (k), (l), (m)
		Orgânico	$\frac{W_L(\text{seco em estufa})}{W_L(\text{sem secagem})} < 0,75$	OL	Argila orgânica (k), (l), (m), (n) Silte orgânico (k), (l), (m), (o)	
Siltes e Argilas $W_L \geq 50\%$		Inorgânico	IP situa-se na linha A ou acima desta	CH	Argila gorda (k), (l), (m)	
			IP situa-se abaixo da linha A	MH	Silte clássico (k), (l), (m)	
		Orgânico	$\frac{W_L - \text{seco em estufa}}{W_L - \text{sem secagem}} < 0,75$	OH	Argila orgânica (k), (l), (m), (p) Silte orgânico (k), (l), (m), (q)	
Solos altamente orgânicos, principalmente matéria orgânica, cor escura e odor orgânico				Pt	Turfa	

Figura 8 - Classificação de Solos Unificada (ASTM 2487-85) (Fernandes, 1994).

- (a) Baseado no material passado no peneiro 3" (75mm)
- (b) Se a amostra virgem tiver blocos e/ou calhaus junto "com blocos e/ou calhaus" ao nome do grupo
- (c) Cascalho com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos
 GW – GM Cascalho bem graduado com silte
 GW – GC Cascalho bem graduado com argila
 GP – GM Cascalho mal graduado com silte
 GP – GC Cascalho mal graduado com argila
- (d) Areia com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos
 SW – SM Areia bem graduado com silte
 SW – SC Areia bem graduado com argila
 SP – SM Areia mal graduado com silte
 SP – SC Areia mal graduado com argila
- (e) $C_{ij} = D_6 / D_{10}$ $C_C = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$
- (f) Se o solo contém $\geq 15\%$ de areia, junte "com areia" ao nome do grupo
- (g) Se os finos se classificam como CL-ML, use dois símbolos: GC-GM, SC-SM
- (h) Se os finos são orgânicos, junte "com finos orgânicos" ao nome do grupo
- (i) Se o solo contém $\geq 15\%$ de cascalho, junte "com cascalho" ao nome do grupo
- (j) Se os limites de Atterberg se situam na zona sombreada da carta de plasticidade, o solo é um CL-ML, argila siltosa
- (k) Se o solo contém 15 a 30% retido no peneiro n.º 200, junte "com areia" ou "com cascalho" conforme o predominante
- (l) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente arenoso, junte "arenoso" ao nome do grupo
- (m) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente cascalho, junte "cascalhento" ao nome do grupo
- (n) $I_p \geq 4$ e situa-se na linha A ou acima desta
- (o) $I_p < 4$ ou situa-se abaixo da linha A
- (p) I_p situa-se na linha A ou acima desta
- (q) I_p situa-se abaixo da linha A

CARTA DE PLASTICIDADE DE CASAGRANDE

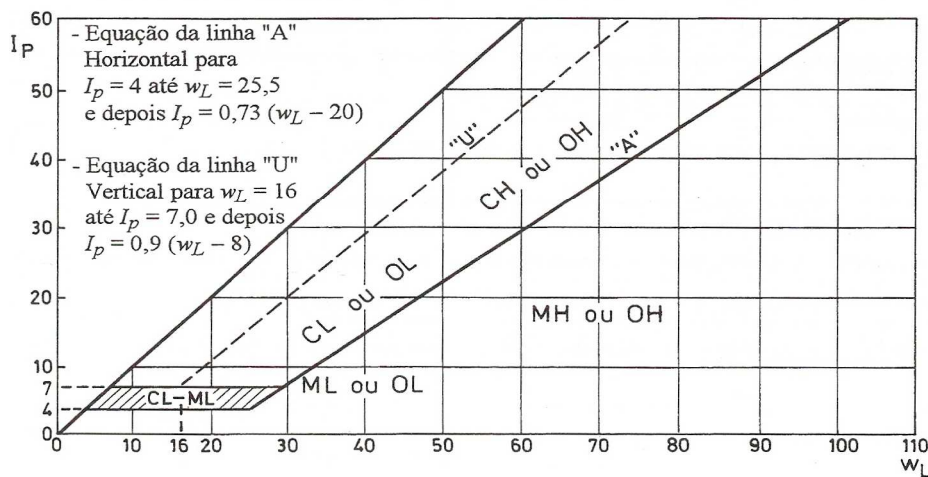


Figura 9 - Classificação de Solos Unificada (ASTM 2487-85) (continuação) (Fernandes, 1994).

Classificação de solos											
Tipo de solos	Materiais Granulares (35% ou menos passados no peneiro de 0,074 (n.º200) ASTM)							Materiais silto-argilosos (mais de 35% passados no peneiro de 0,074 (n.º200) ASTM)			
Grupos e Subgrupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-4
Granulometria - % passados nos peneiros ASTM: 2,00mm (n.º 10) 0,420mm (n.º40) 0,074mm(nº200)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 máx 10 máx	- - 35 máx	- - 35 máx	- - 35 máx	- - 35 máx	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min
Características da fracção passados no peneiro de 0,042 mm (n.º 40) ASTM: Limite de Liquidez Índice de plasticidade	-		-	40 máx	41 min	40 máx	40 min	40 máx	41 min	40 máx	40 min (1)
Índice de grupo (2)	0		0	0		4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais	Calhau, seixo e areia		Areia fina	Seixo e areia siltosos ou argilosos				Solo siltosos		Solo argilosos	
Comportamento na camada sob o pavimento	Excelente a bom					Regular a muito mau					

(1) O índice de plasticidade do subgrupo A-7-5 é igual ou menor que o limite de liquidez menor 30º.

O índice de plasticidade do subgrupo A-7-4 é maior que o limite de liquidez menor de 30.

(2) O índice de grupo indica-se entre parêntesis depois do símbolo do grupo ou subgrupo. Exemplos: A-3 (0); A-2-7 (3); A-7-5 (18)

Figura 10 - Classificação de Solos AASHTO (<http://www.dmc.furg.br/>, consultado em Maio de 2009).

3.1.2 Características Geotécnicas

As várias características que podem ser determinadas em cada tipo de solo, permitem conhecer geotecnicamente os solos. A análise granulométrica, os limites de consistência, o equivalente de areia, o azul-de-metileno, a baridade seca máxima, o teor em água óptimo, a expansibilidade e força de penetração em percentagem do solo, são todos elementos chave para este tipo de caracterização, podendo através dos mesmos conseguir apropriar um tipo de tratamento a aplicar a cada solo, dependendo essencialmente da sua plasticidade. Um solo plástico, mais argiloso, constituído por partículas mais lamelares, tem tendência para reagir com a adição de cal do que com cimento, originando assim uma melhoria significativa nas características geotécnicas, aumentando a resistência do comportamento do solo, assim como ocorre a diminuição do teor em água devido às reacções químicas. No solo não plástico, como já é um solo mais granular, a reacção com cimento é quase sempre a mais indicada, tendo em vista o melhoramento das características geotécnicas do solo.

3.2 Cimento

3.2.1 História e Processo de Fabrico

O cimento é um ligante hidráulico, ou seja, é um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reacções e processos de hidratação e que depois do seu endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água.

No cimento, designado por CEM de acordo com a norma NP EN 197-1 (2001), o endurecimento hidráulico ocorre devido à hidratação dos silicatos de cálcio, embora outros compostos químicos, tais como os aluminatos, possam também participar no processo de endurecimento.

A utilização do tratamento de solos com cimento iniciou-se em 1917 quando J.H. Amies apresentou uma patente no EUA de mistura de solo-cimento que designou por "Soilamines". Este método contribuiu para que no início do ano de 1953, nos EUA, existissem mais de 84000 m² de solo-cimento, compreendendo cerca de 7200 Km de estradas e 2240 Km de ruas em 300 cidades, e 19500000 m² em 143 aeroportos. O ritmo de construção em 1952, era de 8.8 milhões de metros quadrados por ano. Em outros países, como o Reino Unido, a técnica começou a ser aplicada em 1920 em experiências envolvendo a adição de cimento ao solo para construção de casas. A aplicação corrente começaria apenas alguns anos mais tarde, coincidindo com o início da 2ª guerra mundial, em 1939. Desenvolveu-se a um ritmo intenso, na Inglaterra, na Argentina e no Canadá, porém grande extensão foi executada na Alemanha, sobretudo durante a guerra.

Em Portugal, os estudos iniciaram-se em 1948, no Laboratório de Ensaios de Materiais e Mecânica dos Solos em Lourenço Marques. Em 1949 foram construídos, em Moçambique, os primeiros lanços experimentais, a que se seguiu quase imediatamente a construção em grande escala. A 31 de Dezembro de 1966, existiam em Moçambique 742 Km de estradas de solo-cimento, constituindo cerca de 50% dos pavimentos existentes em Portugal Continental o que traduz o atraso em relação a Moçambique na introdução desta técnica, cuja aplicação só se iniciou em 1961.

O que sobretudo caracterizou a actividade da construção em solo-cimento nos últimos anos foi a redução das percentagens de cimento nas misturas, a maior mecanização dos trabalhos devido à introdução generalizada de potentes máquinas de estabilização em uma só passagem e a redução dos custos de produção.

3.2.2 Tipos de Cimento

De acordo com a norma NP EN 197-1 (2001) qualquer tipo de cimento designa-se por CEM, sendo agrupados em cinco tipos principais, como indica o quadro 4.

Quadro 4 - Diferentes Tipos de Cimento (Santos, 2008).

Tipo de Cimento	Designação
CEM I	Cimento Portland
CEM II	Cimento Portland Composto
CEM III	Cimento de Alto Forno
CEM IV	Cimento Pozolânico
CEM V	Cimento Composto

Esta classificação resulta da natureza e quantidade dos constituintes do cimento, sendo que em Portugal são fabricados os seguintes tipos de cimentos:

- Cimento Portland CEM I 42.5 R;
- Cimento Portland CEM I 52.5 R;
- Cimento Portland de Calcário CEM II/B L 32.5N;
- Cimento Portland de Calcário CEM II/A L 42.5R; e
- Cimento Pozolânico CEM IV/A(V)32.5 R.

As classes de resistência do cimento mais usuais são a 32.5, a 42.5 e a 52.5. Estes valores de cada classe correspondem ao valor mínimo de resistência à compressão aos 28 dias.

Considera-se a resistência aos primeiros dias de um cimento, como sendo a resistência à compressão aos 2 ou 7 dias, determinada de acordo com a NP EN 196-1 (2006), e deverá estar de acordo com os valores apresentados no quadro 5.

Para cada classe de resistência de referência, consideram-se duas classes de resistência aos primeiros dias, uma classe normal, indicada por N, e uma classe com resistência elevada, indicada por R.

Quadro 5 - Requisitos mecânicos e físicos como valores característicos especificados (Santos, 2008).

Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)			Tempo de início de presa (min)	Expansibilidade (mm)
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência		
	2 dias	7 dias	28 dias		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	
52.5 R	≥ 30.0	-			

A partir da análise deste quadro pode-se concluir que a norma estabelece valores mínimos para resistência aos primeiros dias, valores mínimos e máximo de resistência aos 28 dias, tempo mínimo para início de presa e valor máximo para a expansibilidade.

Os constituintes principais dos cimentos CEM são os indicados no quadro 6 (sendo apresentada a sua designação e símbolo correspondente).

Quadro 6 - Principais constituintes do cimento e sua simbologia (Santos, 2008).

Constituinte do cimento	Símbolo
Clínquer do Cimento Portland	K
Escória granulada de Alto Forno	S
Materiais Pozolânicos	-
Pozolana Natural	P
Pozolana Natural Calcinada	Q
Cinzas Volantes	-
Cinza Volante Siliciosa	V
Cinza Volante Calcária	W
Xisto Cozido	T
Calcário	L, LL
Sílica de Fumo	D

Através do quadro 7 é possível avaliar as diferenças relativas entre as composições e características médias de cada cimento.

Quadro 7 - Características médias dos cimentos (Santos, 2008).

		CEM IV/A (V) 32.5N	CEM II/B-L 32.5N	CEM II/A-L 42.5R	CEM I 42.5R
Composição	Núcleo de Cimento (%)				
	clínquer portland	65-70	70-75	80-92	95-100
	filer calcário	-	25-30	8-20	0-5
	cinzas volantes	30-35	-	-	-
	Gesso (%)	5	5	5	5
Características Químicas (%)	Perda ao fogo	3.10	10.70	5.60	1.50
	Resíduo insolúvel	27.20	2.20	1.40	1.30
	SiO ₂	40.89	16.95	18.57	21.08
	Al ₂ O ₃	4.43	3.73	4.12	4.84
	Fe ₂ O ₃	3.28	2.68	3.02	3.12
	CÃO	41.6	58.90	61.33	62.08
	SO ₃	2.94	2.98	3.15	3.19
	MgO	2.42	2.74	2.88	3.41
	Cloretos	0.02	0.02	0.03	0.02
	Cal livre	1.21	1.23	1.49	1.67

(continua)

Quadro 7 - Características médias dos cimentos (Santos, 2008) (continuação).

		CEM IV/A (V) 32.5N	CEM II/B-L 32.5N	CEM II/A-L 42.5R	CEM I 42.5R
Características Físicas	Início presa (min)	134	129	123	104
	Fim de presa (min)	176	164	158	136
	Resíduo 45 micron (%)	3.4	12.7	7.2	4.4
	Blaine (cm ² /g)	4790	4617	4065	3848
	Expansibilidade (mm)	0.5	0.8	0.8	0.9
	Água de pasta normal (%)	32.3	26.1	27.6	28.7
Características Mecânicas	Resistência à flexão (MPa)				
	2 dias	4.4	3.9	5.3	6.1
	7 dias	6.0	5.6	7.2	8.0
	28 dias	7.9	6.9	8.5	9.2
	Resistência à compressão (MPa)				
	2 dias	20.7	20.2	28.9	33.4
	7 dias	31.7	30.0	42.2	46.3
	28 dias	43.8	39.2	53.0	58.0

No presente trabalho foi utilizado um Cimento Portland de Calcário CEM II/B L 32.5N, normalmente utilizado para a execução do tratamento de solos.

3.2.3 Marcação CE Cimento (Normalização)

A norma que tem por objectivo especificar a composição, os requisitos e os critérios de conformidade para os cimentos correntes é a NP EN 197-1 (2001), sendo que esta norma resulta da norma europeia EN 197-1 (2000), revogando assim a anterior norma portuguesa NP 2064 (1991) “Cimentos – Definições, composição, especificações e critérios de conformidade”.

3.3 Cal

3.3.1 História e Processo de Fabrico

A descoberta da cal pelo Homem, terá acontecido provavelmente no início da Idade da Pedra, no Período Paleolítico (Silva, 2006). Há também indícios da utilização da cal em zonas da actual Turquia, remontando ao período entre 12000 a 5000 A.C. (Miller, 1999. Elsen, 2006).

Foram encontradas ruínas, datadas de 5000 A.C., com solo argiloso estabilizado com cal na construção da Pirâmide de Shersi no Tibet.

Foram também encontrados vestígios de cal na análise dos materiais de revestimento das câmaras da Pirâmide de Quéops e das juntas dos blocos de calcário e granito da pirâmide de Quéfren (figura 11), (Cowan, 1977. Guimarães, 2002).



Figura 11 - Pirâmides de Quéops e Quéfren (2600 – 2550 A.C.) (<http://www.colegiosaofrancisco.com.br>, consultado em Maio de 2009).

Cerca de 1500 A.C. a erupção violenta do vulcão Thera, que destruiu parte da ilha Santorini foi responsável pelo aparecimento de vastas quantidades de cinzas, estimando-se em 60 km cúbicos. Esta matéria-prima foi utilizada pela Civilização Grega na confecção de argamassas, possuindo propriedades hidráulicas que se viriam a tornar essenciais no desenvolvimento da actividade portuária desta civilização.

Segundo o grego Teofrasto (Séc. III A.C.) “a cal é utilizada na construção, sendo espalhada pela pedra (...) os operários depois de a picarem e de lhe deitarem um pouco de água, remexem-na com paus, pois não podem faze-lo com as mãos por causa do calor” (Ribeiro e Lopes, 2007).

Os chineses também recorreram ao uso de argamassas de cal, na construção da Grande Muralha da China (figura 12), com 3640 km de extensão.



Figura 12 - Grande Muralha da China (700 - 500 A.C.) (www.pime.org.br, consultado em Maio de 2009).

Alguns autores fazem referência ao fabrico da cal na Civilização Romana, “este será o sinal que indica que a cal já está cozida: as pedras que estão por cima devem estar queimadas e as do fundo, já cozidas, começam a cair além disso o lume do fogo deitará menos fumo” (Ribeiro e Lopes, 2007). Estes autores referem recomendações da necessidade de intercalar pedra calcária e material combustível de modo a se conseguir uma cozedura mais homogénea.

Em 350 A.C., os Romanos desenvolveram as primeiras aplicações da cal em geotecnia com o objectivo de procederem à secagem dos terrenos e à aplicação de um ligante de fixação das lajes às plataformas, por onde passavam algumas das suas extraordinárias estradas, como por exemplo, a construção da Via Ápia (figura 13).

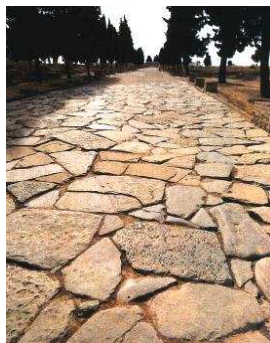


Figura 13 - Via Ápia (350 A.C.) (<http://marius.blogs.sapo.pt>, consultado em Maio de 2009).

Vitruvius refere que se obtêm argamassas resistentes e duráveis devido “a utilização de cerâmica cozida em forno, moída e passada em crivo” (Margalha, 2008).

Obras como o aqueduto *Pont du Gard* (figura 14), no Sul de França, o Coliseu (figura 15) ou o Panteão (figura 16), são bons exemplos de durabilidade das argamassas Romanas à base de cal e pozolanas provenientes da erupção violenta do vulcão Vesúvio de 79 D.C.



Figura 14 - *Pont du Gard* (20 A.C.) (<http://commons.wikimedia.org>, consultado em Maio de 2009).



Figura 15 - Coliseu de Roma (70-80 D.C.) (www.uniblog.com.br, consultado em Maio de 2009).



Figura 16 - Panteão de Roma (118 - 125 D.C.) (adaptado de: <http://br.olhares.com>, consultado em Maio de 2009).

No Séc. XVIII instauram-se os Califados árabes na Península Ibérica, cujas técnicas construtivas introduzem na Europa as argamassas à base de gesso (Alvarez *et al.*, 2005). A partir desta altura passam a utilizar-se argamassas à base de gesso e cal com aditivos variados onde se destacam as gorduras vegetais e animais. A utilização do gesso em conjunto com a cal permitia reduzir a retracção associada à cal e, por outro lado, aumentar o baixo tempo de presa que está associado ao gesso.

Segundo Cristelo (2001), em Portugal o mercado utilizador sofreu, nas décadas de oitenta e noventa, uma profunda evolução, tanto quantitativa como qualitativa. As aplicações de natureza industrial (siderurgia, minas, química, tratamento de águas, tratamento de efluentes líquidos e gasosos, papel, inertização de resíduos industriais, geotecnia, etc.) têm-se vindo a desenvolver, com requisitos de qualidade e consistência de características cada vez mais rigorosos. Do ponto de vista tecnológico, o sector teve uma evolução profunda na década de oitenta, com a instalação e entrada em funcionamento de algumas novas unidades de produção, equipadas com modernos fornos contínuos, tendência que se acentuou nos anos noventa (tecnologias suíça, italiana e francesa).

Até ao aparecimento do cimento *portland* no Séc. XX, a cal era muito utilizada na construção com o uso das argamassas. Com a entrada deste novo ligante, a cal começou a entrar em desuso porque este endurecia mais rapidamente e as suas características mecânicas eram muito superiores às da cal na formulação de argamassas.

Mais recentemente tem-se constatado que o uso de cimento *portland* não é a solução ideal para todas as aplicações uma vez que, por exemplo na reabilitação de edifícios, este ligante é quimicamente incompatível com as argamassas à base de cal, além de que é pouco permeável e o seu módulo de elasticidade é elevado.

Segundo a Norma NP EN 459-1 (2002), a cal define-se como sendo um material que abrange quaisquer formas física e química, sob as quais pode aparecer o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e/ou hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂). De acordo com a referida norma, existem diferentes tipos de cal de construção, onde se destacam a cal aérea e a cal hidráulica (Paulo, 2006).

A utilização da técnica de tratamento de solos com cal começou a ser utilizada na China e Índia para a construção de pontes e barragens e pelos romanos para a construção das suas famosas estradas. Uma das primeiras grandes aplicações da cal em geotecnia, a partir da aplicação da cal nos terrenos com o intuito de os secar e assim obter superfícies rígidas, torna-se ainda mais evidente com a invenção dos veículos com rodas.

No período entre os Romanos e até ao Séc. XVIII, ocorreu uma quebra na evolução das técnicas de tratamento de solos com cal. Este foi recomeçado no Séc. XVIII, no qual se assistiu a uma

abordagem científica e a uma exploração industrial da cal pelo químico inglês Joseph Black, que escreveu as reacções que ocorrem durante a fabricação da cal, concretamente na expulsão do dióxido de carbono. Foi concluído o seu trabalho por Vicat e Debray no século XIX, com a identificação de todas as suas propriedades físico-químicas, todos os seus tipos e finalidades. Estas descobertas levaram a um considerável desenvolvimento industrial que favorece a criação de vários centros de produção na Europa e nos Estados Unidos, no fim e início dos séculos XIX e XX, respectivamente.

Nos anos 80, na Bélgica, houve um interregno na utilização de materiais tratados, e no início da década de 90, a técnica reapareceu nos trabalhos de obras públicas com a chegada da alta velocidade ferroviária. Desde então, a cultura ambiental e a evolução da legislação favoreceram o desenvolvimento de novas aplicações a esta técnica, facultando o tratamento de solos com características desfavoráveis para a sua utilização, como solos finos, de alta plasticidade e húmidos.

Em Espanha, no final da década passada, o presente tratamento caiu em desuso, sendo recuperado de forma significativa (Figura 17) no final da década e registando-se em 2007 um consumo de cerca 200 000 toneladas de cal.

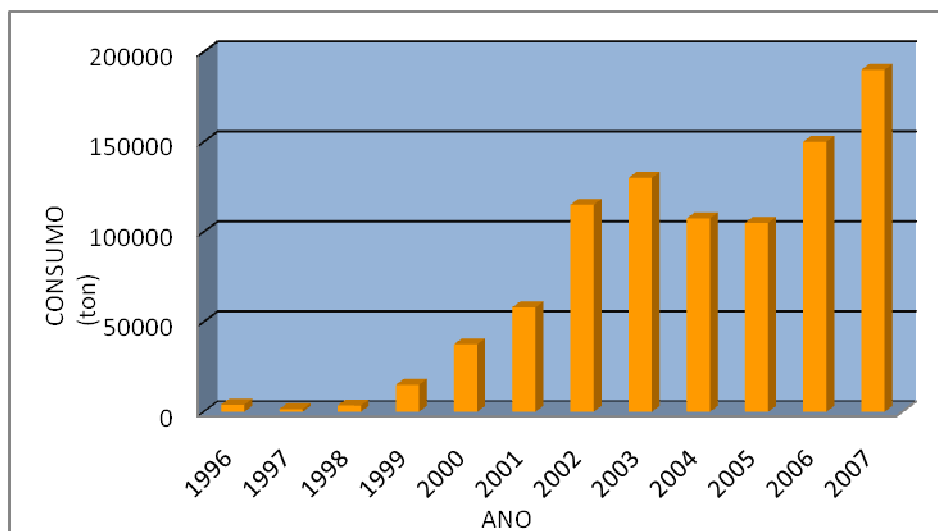


Figura 17 - Evolução do consumo da cal aérea em Espanha para tratamento de solos (adaptado de Cruz, 2008).

Em Portugal, ao contrário do que se passa em outros países, a utilização da técnica de tratamento de solos com ligantes é utilizada numa escala reduzida, embora existam bastantes fornos, não está ainda convenientemente industrializada nem normalizados os diversos tipos.

A cal hidráulica difere da cal aérea por ser obtida de calcários não puros, ou seja, com percentagens variáveis de argilas (quadro 8).

Quadro 8 - Classificação de calcários de acordo com o teor de carbonato de calcário (Sequeira *et al.*, 2007).

Tipo de Calcário	CaCO₃ (%)
Calcário Rico	96 a 100
Calcário Margoso	90 a 96
Marga Calcária	75 a 90
Marga	40 a 75
Marga Argilosa	10 a 40
Argila Margosa	4 a 10
Argila	0 a 4

A matéria-prima a partir da qual se obtêm os produtos à base de cal é a pedra calcária (Figura 18), composta quase exclusivamente por carbonato de cálcio (CaCO₃) e por um certo número de outros constituintes em quantidade mais ou menos variável. Para se produzir cal aérea de boa qualidade, é necessário que o calcário utilizado seja o mais puro possível, isto é, deve apresentar uma elevada percentagem de carbonato de cálcio. A sílica e os óxidos de ferro e de alumínio são as impurezas que acompanham os carbonatos, em maior ou menor grau, na constituição das rochas calcárias. Nestas rochas, o carbonato de cálcio é frequentemente substituído, em determinada proporção, pelo carbonato de magnésio que não constitui uma impureza propriamente dita (Coutinho, 2006).

Figura 18 - Pedra calcária (<http://flexiblelearning.auckland.ac.nz/geog105>, consultado em Maio de 2009).

Em Portugal, as reservas de pedra calcária localizam-se no Maciço Estremenho da Serra dos Candeeiros no concelho de Santarém, nos Maciços Calcários de Souselas e de Brasfemesa a cerca de 10 Km de Coimbra. Existe ainda a Pedreira de Calcário da região de S. Brás de Alportel, no Algarve, e outros afloramentos de menor expressão.

A calcinação da pedra calcária para produção da cal pode efectuar-se em instalações rudimentares ao ar livre. Na calcinação ao ar livre em fornos de campanha, faz-se a escavação de um poço no terreno e acumulam-se os fragmentos de calcário no seu interior, formando o volume de uma fornalha na sua parte interior. As pedras maiores são colocadas em forma de abóbada e o

restante é cheio com pedras de menor dimensão. O combustível normalmente utilizado é a madeira (Bauer, 1987).

Na calcinação ao ar livre por camadas, faz-se uma escavação de um metro no chão, em forma de tronco de cone invertido, de cerca de cinco metros de diâmetro na base superior e um metro na base inferior. Colocam-se camadas horizontais alternadas de carvão vegetal e pedras calcárias, para que o carvão vá diminuindo de espessura de baixo para cima, e a pedra calcária em ordem inversa (figura 19). Forma-se um volume de cerca de três metros de altura, em forma tronco-cônica, que é coberto por uma camada de barro, areia e palha, de cerca de 6 cm de espessura, de modo a evitar a perda de calor. Acende-se o fogo e a calcinação dura uma semana. Finalmente, depois de arrefecido, separa-se a cal viva das cinzas.

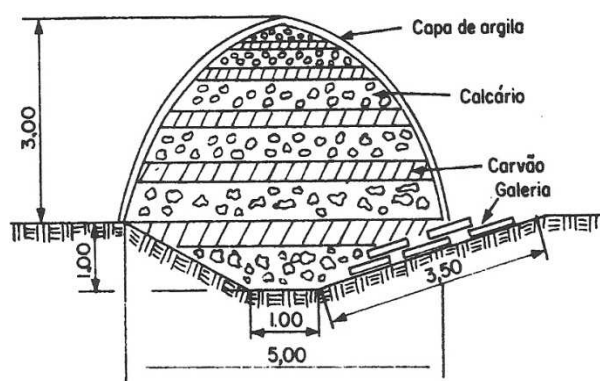


Figura 19- Forno de campanha para cal (Bauer, 1987).

A calcinação do calcário pode também ser feita com recurso a fornos intermitentes, normalmente com uma secção circular de 5 m de altura, em forma oval. A casa é formada por uma abóbada com as pedras mais grossas e o resto é cheio com pedra calcária esmagada. Utiliza-se quase sempre como combustível a madeira, e assim, o processo de calcinação rondará os três ou quatro dias de duração (figura 20).

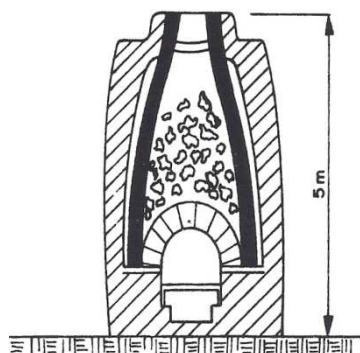


Figura 20 - Forno intermitente (Coelho *et al.*, 2009).

Este tipo de forno apresenta os mesmos inconvenientes que os fornos de campanha, especialmente no que se refere ao trabalho intermitente, que obriga a um maior consumo de combustível e mais mão-de-obra do que a necessária para a calcinação em fornos contínuos. A capacidade destes fornos varia entre um mínimo de 6 toneladas e atingindo um máximo superior a 50 toneladas.

A calcinação dos calcários pode ainda ser levada a cabo em fornos contínuos, sendo que estes podem ser verticais ou horizontais. Dentro dos primeiros existe ainda uma distinção, tendo em conta os diferentes tipos de combustíveis a utilizar. Assim, estes podem ser de chama curta, quando é utilizado por exemplo o carvão-coque, ou de chama longa quando utilizam lenha para realizar a calcinação (figura 21).

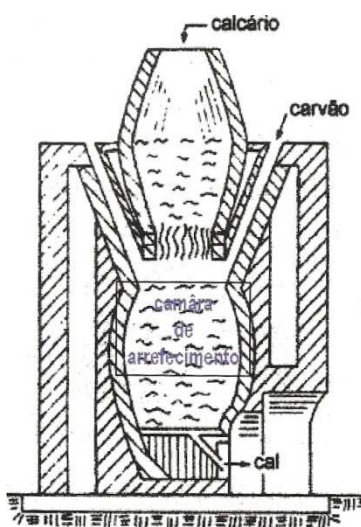


Figura 21 - Forno contínuo vertical a carvão (Coelho *et al.*, 2009).

Este tipo de forno consta de duas câmaras sobrepostas, sendo o calcário alimentado pela abertura junto à chaminé superior e o combustível introduzido no estrangulamento entre as duas câmaras, onde se processa a combustão. O material calcinado é extraído pela parte inferior da câmara de arrefecimento (Coutinho, 2006).

Os fornos rotativos constam de um cilindro metálico com material refractário e rodam lentamente sobre um eixo ligeiramente inclinado, recolhendo o calcário pela sua parte superior. Na parte inferior encontra-se um maçarico de aquecimento por onde é retirado o material calcinado. Estes fornos têm a desvantagem de exigir que a pedra calcária seja antecipadamente reduzida a grãos de pequena dimensão originando um produto pulverizado, de difícil colocação no mercado, e obrigando à continuação do processo industrial da hidratação da cal viva, transformando o produto final na variedade hidratada.

O processo de calcinação condiciona de forma determinante as propriedades da cal, podendo nos casos em que não haja um controlo rigoroso da temperatura resultar em cristais de cal insolúveis

(excesso de temperatura) ou em cristais com o seu interior carbonatado por falta de calor (figura 22).

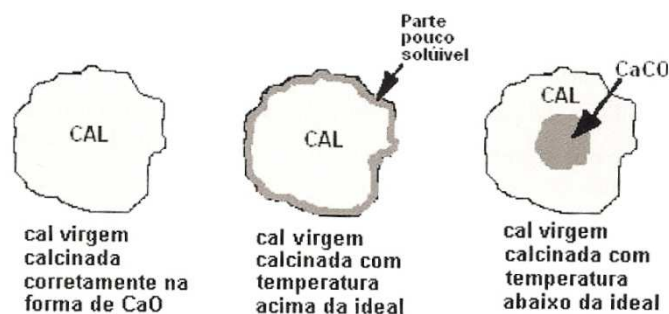


Figura 22 - influência da temperatura de calcinação – (Paiva *et al.*, 2007).

A cozedura do calcário puro a uma temperatura entre 800 e 900 °C origina o óxido de cálcio, também designada cal viva e que constitui a cal aérea.

A cal viva apresenta-se sob a forma de grãos de diferentes tamanhos, 15 ou 20 cm, de cor branca e amorfa, apresentando uma estrutura porosa e formas idênticas às dos grãos da rocha original. A cal viva é ávida de água e quando se mistura com ela, dá origem à cal apagada, libertando grande calor durante a reacção e provocando também um aumento de volume que chega a atingir 3 a 3,5 vezes o seu volume inicial. Se durante o processo de extinção for utilizada apenas a quantidade de água estritamente necessária, a cal apagada resultante aparece sob a forma de pó.

A operação de hidratação é denominada por extinção (ou apagamento) e o hidróxido resultante designa-se por cal extinta ou hidratada. Este fenómeno é exotérmico, isto é, há libertação de calor, o que torna o processo muito perigoso. A extinção pode ser executada através de qualquer um dos seguintes métodos:

- Extinção espontânea – conseguida pela captação apenas da humidade do ar, o que tem por inconvenientes ser um processo muito lento, não extinguir completamente a cal viva, além do risco de absorver o dióxido de carbono;
- Extinção por aspersão – rega-se com 25% a 50% de água, cobrindo-se a cal com areia, tendo contudo o inconveniente da extinção não ser completa;
- Extinção por imersão – fragmenta-se a cal viva em fragmentos de tamanho não superior a uma polegada, colocando-a em cestos e mergulha-se em água (este é um dos métodos mais usados em Portugal) até o material entrar em efervescência, nessa altura é colocada em barris tapados;
- Extinção por fusão – lançamento da cal viva em tanques onde era colocada uma determinada quantidade de água, calculada para não prejudicar a qualidade do produto final. A mistura é mexida para se obter homogeneidade e depois coada

para outro recipiente com o auxílio de uma grelha para retirar os fragmentos não extintos. A cal é depois deixada coberta de água num período nunca inferior a uma semana, ou 3 meses no caso de se tratar de cal para acabamentos. Em determinados casos esse período poderia chegar mesmo aos 5 anos (Santiago, 2000);

- Extinção em autoclaves – é um dos métodos que conduz a produtos de melhor qualidade (a extinção é completa) sendo muito utilizado nos E.U.A.

As cals extintas são cals aéreas constituídas, principalmente, por hidróxido de cálcio e, por vezes, contendo hidróxido de magnésio. Estas por sua vez, não apresentam uma reacção exotérmica quando em contacto com a água. São produtos que se apresentam sob a forma de pó seco ou em misturas aquosas (pasta de cal).

A cal hidráulica é fabricada por processos semelhantes aos do fabrico da cal comum. Obtém-se por cozedura de calcários margosos (8% a 20% de argilas), a temperaturas entre os 1000 °C e os 1500 °C, preferencialmente em fornos contínuos verticais de alvenaria e revestimento refractário. Deste processo, obtém-se óxido de cálcio, silicatos e aluminatos de cálcio, capazes de se hidratarem conferindo hidráulidade à cal.

Durante a cozedura do calcário, este passa por diferentes fases, onde se observa o seguinte: entre 500 °C e 700 °C ocorre a desidratação da argila, a cerca de 850 °C dá-se a calcinação do calcário libertando anidrido carbónico, e entre 1000 °C e 1500 °C a reacção da sílica e da alumina da argila, com óxido de cálcio, origina silicatos e aluminatos de cálcio.

Constata-se que, quanto maior for a temperatura, menor é a quantidade de óxido livre e maior é a quantidade de silicatos de aluminatos de cálcio, podendo obter-se um produto semelhante ao do fabrico de cálcio e do cimento.

Após a saída do forno, obtém-se uma mistura de silicatos, aluminatos e de cálcio livre (entre 3% a 10%) e um pó inerte constituído por silicato bicálcico, formado por pulverização, durante o arrefecimento. Este produto quando misturado com água, não aquece nem ganha presa (Coutinho, 2006).

Obtém-se também a cal viva que é necessário extinguir pelos inconvenientes da expansão, já referidos. A extinção é feita por aspersão, usando-se apenas a quantidade de água estritamente necessária para esta operação, uma vez que os silicatos e aluminatos também reagem com a água e o seu excesso pode provocar reacção, conferindo a presa. Esta é uma reacção bastante lenta e, no fim da extinção, é necessário ter a certeza de que apenas se ficou com aluminatos e silicatos de cálcio e cal apagada. Por estes motivos, esta operação deve ser feita em fábrica, o que permite

distinguir a cal hidráulica do cimento portland, uma vez que a finura da cal hidráulica é obtida por extinção da cal viva e não por moagem como no caso do cimento portland.

Terminada a operação de extinção, a cal hidráulica fica reduzida a pó, contudo, por vezes, aparecem pequenos nódulos escuros ricos em silicatos tricálcicos, designados por *grappier*. Estes são elementos sobreaquecidos que não se reduziram a pó, daí que, após a extinção, deve-se peneirar a cal hidráulica, através de dois peneiros circulares rotativos, constituídos por dois tambores perfurados, coaxiais, sendo os furos do peneiro interior mais largos, para permitir a passagem do *grappier*. Pelo tambor exterior passa a flor de cal, muito fina (cal hidráulica por excelência). Na parte anelar fica o *grappier*, que depois de moído, é incorporado na cal hidráulica, aumentando a sua hidraulicidade. Quando é vendido à parte designa-se por cimento *grappier*, uma vez que depois de moído tem propriedades muito semelhantes às do cimento. Por vezes pode ser conveniente juntar materiais pozolânicos (Aguiar, 2007). O quadro 9 sintetiza a classificação dos vários tipos de cal.

Quadro 9 - Classificação dos vários tipos de cal (Cristelo, 2001).

Modo de obtenção	Composição do calcário base		
	Quase puro	15 a 20% de argila	Presença de carbonato de magnésio
Calcinação	Cal aérea viva calcítica	Cal hidráulica	Cal aérea viva dolomítica
Calcinação + Hidratação	Cal aérea apagada	Cal hidráulica apagada	Cal dolomítica ou cal dolomítica hidratada sob pressão

A cal viva pode ser classificada em função da rapidez com que hidrata. Assim, de acordo com a norma americana ASTM C5 (2003), a classificação poderá ser:

- Rápida, no caso em que a hidratação começa em menos de 5 minutos após a adição da cal;
- Média, quando a hidratação ocorre entre 5 e 30 minutos;
- Lenta, quando a hidratação ocorre acima dos 30 minutos.

A cal poderá ser utilizada em diversas aplicações, tais como:

- Argamassas e Betões;
- Pinturas;
- Estabilização de Solos;
- Blocos de Terra para Alvenaria;
- Revestimentos Betuminosos.

A utilização mais frequente da cal passa pela confecção de argamassas para assentamento de alvenarias, execução de betonilhas para regularização de pavimentos e/ou para revestimentos de alvenarias interiores e exteriores.

No fabrico de blocos, abobadilhas e outros artefactos pré-fabricados à base de cimento como os lancis e pavês, a utilização de cal contribui para a redução do consumo do cimento.

A cal é também utilizada no fabrico de blocos silico-calcários, os quais se encontram regulados pela norma EN 771-2 (2003) e destinam-se à execução de alvenarias. Como estes blocos têm uma resistência mecânica elevada, a cal utilizada deverá conter uma elevada percentagem de CaO que se encontre no estado hidratado (Santos, 1985).

Outra das aplicações da cal no âmbito dos betões, é o fabrico de blocos e outras peças de betão celular autoclavado. Este tipo de material é obtido através da reacção química entre a cal, o cimento *portland*, a areia siliciosa e o pó de alumínio.

As pinturas de revestimentos de edifícios com recurso à cal compreendem basicamente as variantes de caiçã ou barramento (Veiga e Tavares, 2002).

O uso de cal, no tratamento de solos para construção de estradas, é uma das técnicas mais antigas de consolidação. Este processo já era utilizado há 2000 anos, contudo foram os Romanos que desenvolveram a sua aplicação em geotecnia, nomeadamente, na secagem de terrenos e na fixação das lajes de pedra de algumas das suas estradas às plataformas. Implementaram ainda o uso de pozolanas para melhorar a acção da cimentação da cal.

As primeiras experiências da utilização de cal na construção rodoviária surgiram nos Estados Unidos da América em 1924, e na Rússia em 1926. Alguns países tropicais, como o Zimbabwe, também aplicaram esta técnica de estabilização na construção de estradas a partir de 1950 (Cartmell, 1958).

Em Moçambique, por exemplo, a estabilização com cal era utilizada sobretudo nos casos específicos em que a utilização de solos com elementos grossos resistentes dependia apenas da correcção do seu índice de plasticidade, e naqueles em que só se dispunha de solos finos com elevado índice de plasticidade, os quais não permitiam uma boa homogeneização quando tratados com cimento ou betume (Luís, 1972).

O conceito de melhoramento ou estabilização dos solos através de reacções químicas entre as partículas de solo, a água dos vazios e os materiais adicionados é semelhante tanto para o cimento como para a cal, porém os efeitos de estabilização com cal são mais rápidos do que os da estabilização com cimento (Cristelo, 2001).

Ao misturar cal num solo húmido ocorrem várias reacções químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificação das suas características geotécnicas.

3.3.2 Tipos de Cal

Existem dois grandes tipos de ligantes:

- Os ligantes hidráulicos, que fazem presa quando em contacto com a água (por exemplo, a cal hidráulica e os cimentos);
- Os ligantes aéreos, que fazem presa em contacto com o ar (por exemplo, o hidróxido de cálcio resultado da reacção do óxido de cálcio com a água).

Na figura 23, pode-se observar um simples esquema dos diferentes tipos de cal existentes.

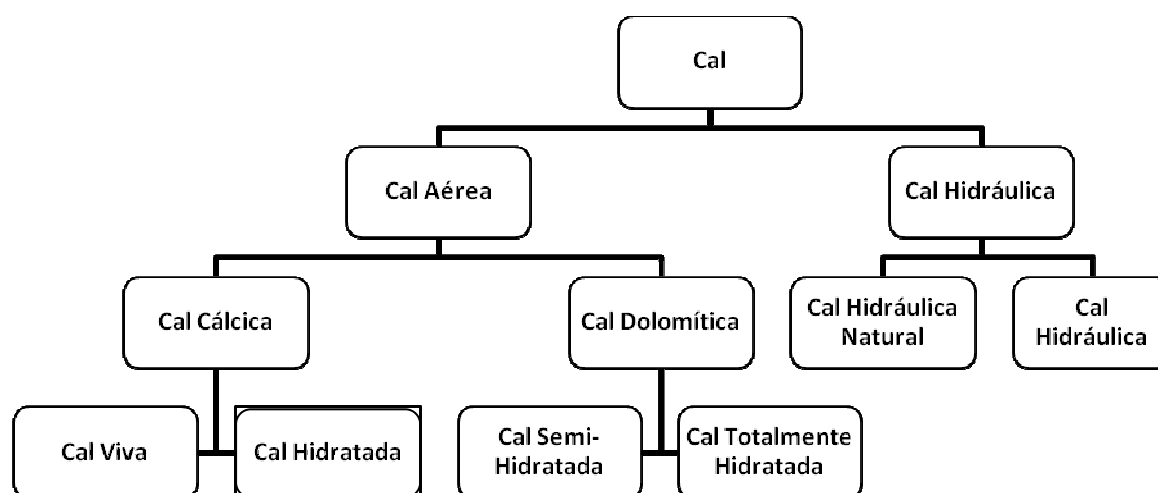


Figura 23 – Tipos de cal (adaptado de Coelho *et al.*, 2009).

De acordo com a figura 23, pode definir-se cada um dos tipos de cal conforme descrito no quadro 10.

Quadro 10 - Diferentes tipos de cal e suas definições (adaptado de Coelho *et al.*, 2009).

Tipos de cal	Definição
Cal Aérea	É a cal obtida a partir de calcários puros, ou seja, carbonato de cálcio (CaCO ₃), com teor de impurezas inferior a 5%, ou carbonato de cálcio e magnésio. A cal aérea, constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio, endurece lentamente ao ar por reacção com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa dentro da água, visto não ter propriedades hidráulicas. Apresenta-se na forma de cal viva ou de cal hidratada.
Cal Viva	Define-se como sendo cal aérea constituída, essencialmente, por óxido de cálcio (CaO) e por óxido de magnésio (MgO). A cal viva é produzida através da calcinação de rocha calcária e/ou dolomite e apresenta uma reacção exotérmica quando em contacto com a água. A cal viva pode encontrar-se sob a forma de cal cálctica ou de cal dolomítica.
Cal Hidratada	É cal aérea, cálctica ou dolomítica, provenientes da extinção de cais vivas. São produzidas sob a forma de pó seco, em pasta ou em calda (leite de cal).
Cal Cálctica	É um tipo de cal constituída, principalmente, por óxido de cálcio ou por hidróxido de cálcio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.

(continua)

Quadro 10 - Diferentes tipos de cal e suas definições (adaptado de Coelho *et al.*, 2009) (continuação).

Tipos de cal	Definição
Cal Dolomítica	É cal constituída, principalmente, por óxido de cálcio e por óxido de magnésio, ou por hidróxido de cálcio e por hidróxido de magnésio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.
Cal Hidráulica Natural	É cal constituída, principalmente, por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reacção com o hidróxido de cálcio.
Cal Hidráulica Natural com Material Adicional	É um produto que pode conter materiais pozolânicos ou hidráulicos apropriados, adicionados até 20% em massa.
Cal Hidráulica	É cal constituída, principalmente, por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reacção com o hidróxido de cálcio. Nalguns países é também designada cal hidráulica artificial.

3.3.3 Marcação CE Cal

Desde 2002, que em Portugal a cal para construção se encontra normalizada, segunda a Norma NP EN 459-1. Esta norma subdivide-se em 3 partes:

- Parte 1 – Definições, especificações e critérios de conformidade;
- Parte 2 – Métodos de ensaio;
- Parte 3 – Avaliação de conformidade.

O processo de fabrico da cal deve ser alvo de um rigoroso Plano de Controlo de Qualidade, ao longo das diferentes fases, desde a matéria-prima até aos diversos produtos acabados. Para controlo da qualidade da cal é necessário garantir:

- A boa cozedura, não apresentando grãos de material inerte;
- Que a cal não tenha sofrido carbonatação;
- Plasticidade;
- Estabilidade de volume;
- Resistências mecânicas só a muito longo prazo;
- Rendimento muito bom (com 100 litros de cal viva podem obter-se cerca de 300 litros de cal em pasta).

Neste caso, a produção de cal deve obedecer às normas técnicas aplicáveis, isto é, a embalagem do produto deve conter a marca, o tipo, o número da Norma Técnica, o nome ou razão social do fabricante e ainda o Selo de Qualidade.

Todas as cais que estiverem conforme os critérios da NP EN 459-1 (2002) deverão apresentar na embalagem ou na guia de remessa:

- Tipo de cal;
- Forma comercial do tipo de cal;
- Local de fabrico;

- Instruções de utilização;
- Massa;
- Instruções de segurança.

Um exemplo da informação que poderá constar numa etiqueta da Marcação CE da cal, é apresentado na figura 24.

Símbolo CE
Empresa
Morada
Fábrica
Data
EN 459-1
CL 90-Q

Figura 24 - Exemplo de etiqueta da Marcação CE da cal (Coelho *et al.*, 2009).

A Marcação CE em produtos de construção foi introduzida pela Directiva 89/106/EEC, dos Produtos da Construção e representa um passaporte sem o qual os produtos não podem ser comercializados na UE.

A frequência da amostragem e de ensaio deve ser pelo menos conforme o especificado no quadro 11.

Quadro 11 - Frequência de amostragem e ensaio para centros de distribuição (Coelho *et al.*, 2009).

Propriedade	Tipo	Método de ensaio	Frequência mínima
Tempo de presa	Cais hidráulicas naturais	EN 459-2:2001	Semanal
Resistência aos 28 dias	Cais hidráulicas		
CO ₂	Cais vivas		
	Cais hidratadas		
	Pastas de cal		
Água livre	Cais hidratadas		
	Pastas de cal		
	Cais hidráulicas naturais		
Reactividade	Cais hidráulicas		
	Cais vivas		

3.4 Água

3.4.1 Abordagem à normalização da água para misturas hidráulicas

De acordo com a norma NP EN 1008 (2003) – Água de amassadura para betão – especificações para amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada aos processos da indústria de betão, para fabrico de betão, pode-se distinguir os tipos e condições de utilização de águas para amassadura de betões, em função da sua origem. Assim tem-se:

- Água potável é adequada para a amassadura e não necessita ser analisada;

- Água residual industrial é adequada para a amassadura e deve ser analisada previamente e em intervalos frequentes durante a sua utilização;
- Água superficial e subterrânea, normalmente é adequada, mas devem ser analisadas antes da sua utilização;
- Água do mar ou água salobra, normalmente considerada adequada para o fabrico de betão simples, mas deve ser analisada previamente se usada em betão armado ou pré-esforçado;
- Água proveniente da lavagem do equipamento das instalações da produção de betão e betão pronto, pode ser considerada adequada desde que esteja isenta de óleos ou adjuvantes introdutores de ar. Esta deverá ser previamente analisada, excepto se se tratar de água potável;
- Águas residuais domésticas não são adequadas.

A água deve ser examinada seguindo os procedimentos de ensaio estabelecidos no quadro 12.

Quadro 12 - Requisitos e procedimentos de ensaio para a inspeção preliminar da água de amassadura (NP EN 1008 (2003)).

		Requisitos	Procedimento de ensaio (de acordo com NP EN 1008:2003)
1	Óleos e gorduras	No máximo não mais do que traços visíveis.	6.1.1
2	Detergentes	Qualquer espuma deve desaparecer antes de decorridos 2 minutos.	6.1.1
3	Cor	Água de outra origem que não a indicada em 3.2: a cor pode ser ligeiramente amarelada.	6.1.1
4	Matéria em suspensão	Água da origem indicada em 3.2.	A.4
		Água de outras origens: máximo resíduo em suspensão 4 ml.	6.1.1
5	Odor	Água da origem indicada em 3.2: sem cheiro, excepto o odor permitido à água potável e um ligeiro cheiro a cimento e, se na água estiver presente escória de alto-forno, um ligeiro cheiro a sulfuretos.	6.1.1
		Água de outras origens: não deve ter cheiro, excepto o cheiro da água potável. Após junção de ácido clorídrico, não deve ter cheiro a sulfuretos.	
6	Ácidos	P H > 4	6.1.1
7	Matéria orgânica	A cor deve ser amarelo-acastanhado ou mais pálida, após junção de NaOH.	6.1.2

Relativamente às propriedades químicas, a concentração de Cloretos, Sulfatos, Álcalis deverão ser as seguintes:

- **Cloretos** não deveram exceder os limites indicados no quadro 13, a menos que possa ser demonstrado que o teor de cloretos do betão não excederá o valor máximo

especificado na classe seleccionada de acordo com NP EN 206-1: 2007 (Secções relevantes da EN 196-21:1990);

- **Sulfatos** não deverão exceder 2 000 mg/l (Secções relevantes da EN 196-2:2006);
- **Álcalis:** a concentração de óxido de sódio equivalente na água não deve exceder 1 500 mg/l. Se este limite for excedido, a água só pode ser usada se poder ser demonstrado que se tomaram medidas para evitar a reacção álcali-silica (Secções relevantes da EN 196-21:1990);
- **Contaminações prejudiciais ao betão:** em primeira instância, podem ser realizados ensaios qualitativos para identificação de açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco. Se os ensaios qualitativos derem resultados positivos, deve determinar-se ou a concentração da substância em causa ou os tempos de presa e a resistência à compressão. Se for escolhida a análise química, a água deve satisfazer os limites do quadro 14 (Segundo documentos normativos válidos no local).

Quadro 13 - Máxima concentração de cloretos na água de amassadura (NP EN 1008 (2003)).

Uso pretendido	Máxima concentração de cloretos (mg/l)	Procedimento de ensaio
Betão pré-esforçado ou calda	500	Secções relevantes da EN 196-21
Betão armado ou com metal embebido	1 000	
Betão simples	4 500	

Quadro 14 - Requisitos para substâncias prejudiciais ao betão (NP EN 1008 (2003)).

Substâncias	Concentração máxima (mg/l)	Procedimento de ensaio
Açúcares	100	Segundo documentos normativos válidos no local
Fosfatos, expressos em P ₂ O ₅	100	Segundo documentos normativos válidos no local
Nitratos, expressos em NO ₃ ⁻	500	ISO 7890-1
Chumbo, expresso em Pb ²⁺	100	Segundo documentos normativos válidos no local
Zinco, expresso em Zn ²⁺	100	Segundo documentos normativos válidos no local

Na amostragem deverá ser colhida uma amostra de água de pelo menos 5 litros, correctamente identificada e representativa da água a utilizar, tendo devidamente em atenção os possíveis efeitos das variações sazonais. Deverá ser armazenada num recipiente limpo e selado, e previamente enxaguado com a mesma água. A amostra deverá ser ensaiada no prazo de 2 semanas. No que diz respeito aos ensaios, após a amostragem, deve-se avaliar numa subamostra, tão depressa quanto possível, a presença de óleos e gorduras, detergentes, cor, matéria em suspensão, odor.

O método de detecção das impurezas, acima proferidas, é o seguinte:

- Agitar a amostra de modo que qualquer material que tenha ficado assente volte a ficar em suspensão;
- Verter 80 ml da amostra numa proveta de 100 ml, fechar com uma tampa adequada e agitar vigorosamente durante 30 s;
- Destapar a proveta e cheirar a amostra para detectar odores diferentes dos da água limpa. Na dúvida, ensaiar o odor de acordo com as disposições nacionais para a água potável;
- O odor da água deve ser mais baixo que o máximo aceite para a água potável;
- Observar a superfície após agitação para detectar a presença de espuma;
- Colocar a proveta num local sem vibrações;
- Após 2 minutos, verificar a continuação da presença de espuma e sinais de óleos e gorduras;
- Ao fim de 30 minutos, verificar o volume aparente de sólidos sedimentados e a cor da água;
- Medir o pH usando um papel indicador ou um medidor de pH. Juntar 0,5 ml de ácido clorídrico e misturar para detectar a presença de sulfuretos pelo cheiro a ovos podres.

Para a detecção de matéria orgânica, deverão ser colocados 5 ml da amostra num tubo de ensaio e manter a uma temperatura entre 15 °C e 25 °C. Juntar 5 ml de solução de hidróxido de sódio a 3%, agitar e descansar durante uma hora. Observar a cor.

Para os tempos de presa e resistência à compressão devem-se usar os métodos de ensaio:

- Tempos de presa da pasta (NP EN 196-3:2005+A1:2009);
- Resistência de prismas de argamassa (NP EN 196-1:2006);
- Execução de provetes de betão (EN 12390-2:2009);
- Ensaio de provetes de betão (NP EN 12390-3:2009).

A frequência de ensaios a realizar na água deverá estar de acordo com o Quadro 15.

Quadro 15 - Frequência de ensaios na água (NP EN 1008 (2003)).

Tipos de água	Frequência de ensaio da água
Água potável	Não necessita ser ensaiada
Água recuperada dos processos da indústria de betão (como definido em A.2.1)	De acordo com o Anexo A
Água subterrânea, água superficial natural e água residual industrial	Antes da primeira utilização e depois mensalmente até haver uma ideia clara sobre a dispersão da composição da água Pode depois ser adoptada uma frequência mais baixa
Água do mar e água salobra	Antes da primeira utilização e depois uma vez por ano e sempre que necessário

4. Mistura de Solo-Cimento e Solo-Cal

4. Misturas de Solo-Cimento e Solo-Cal

4.1 Solo-Cimento

4.1.1 Técnicas de execução do tratamento

O tratamento de solos com cimento pode ser realizado “in situ” ou recorrendo à mistura realizada em central, englobando diferentes etapas. Após a realização de ensaios laboratoriais e aí verificadas as condições ideais para aplicação deste tipo de tratamento, estar-se-á em condições de realizar um trecho experimental.

Este consiste na execução de uma pequena extensão para aferir o método construtivo e os equipamentos a utilizar. Neste trecho pode-se comprovar alguns aspectos que poderão ser essenciais para o aperfeiçoamento desta técnica, tais como:

- A profundidade e eficácia da desagregação do solo e homogeneidade da mistura solo-cimento;
- Os métodos de compactação;
- O teor de água da compactação mais adequado;
- O grau de compactação e o teor em cimento efectivo em toda a espessura da camada;
- Os métodos de verificação do teor em água, do grau de compactação e do teor em ligante;
- O processo de cura de protecção superficial.

No caso da dimensão máxima do material a tratar seja superior a 100 mm, deverá recorrer-se a um método de separação, como por exemplo um crivo (figura 25), para seleccionar o solo a utilizar no tratamento, antes ainda de se proceder ao espalhamento do cimento.



Figura 25 - Exemplo de um crivo (Caspurro e Dias, 2008).

Os ensaios de controlo para caracterização física e mecânica, são verificados pela colocação de tabuleiros durante o espalhamento do ligante para posterior pesagem.

Seguidamente descrevem-se as diferentes etapas de execução do tratamento do solo, “in situ”:

- Preparação da camada – a camada, sobre a qual se executou o espalhamento do solo a estabilizar, foi regularizada com auxílio de uma motoniveladora, avaliando-se em seguida o grau de compactação e o teor de humidade, sem descurar a altimetria e a regularização. Antes de se executar a camada de solo-cimento é necessária a rega desta camada, de modo a garantir a conservação do teor de água da mistura.
- Espalhamento do solo (figura 26) – após o espalhamento e regularização do solo efectua-se uma compactação ligeira, equivalente a 20% das passagens necessárias à compactação, com o objectivo de adensar uniformemente a camada, limitando as variações do teor em água e facilitando a sua homogeneização durante as operações da mistura. Nesta fase procede-se ao controlo do teor de água do solo, não ultrapassando mais de 2% do valor do estudo laboratorial, relativamente ao peso da mistura. Sempre que necessário dever-se-á regar a camada de modo a corrigir o teor em água.



Figura 26 - Espalhamento de solos (Caspurro e Dias, 2008).

- Espalhamento do cimento – este processo é elaborado com um espalhador munido de um sistema de doseamento volumétrico controlado pela velocidade, permitindo uma distribuição uniforme do cimento pela superfície da camada de acordo com a dosagem estabelecida. O espalhador adaptado a um camião basculante possui uma capacidade de aproximadamente 12 m^3 e uma largura de espalhamento máxima de 2,20 m.

A distribuição do ligante é efectuada por faixas paralelas adjacentes sem sobreposição, e em períodos de tempo inferiores a 1h de modo a garantir uma mistura homogénea sem grumos de cimento. O espalhamento será condicionado pela ocorrência de chuvas e ventos fortes. Este poderá ser realizado por via seca ou via húmida, onde neste último é adicionado ao solo uma calda de cimento que é injectada directamente sobre o solo desagregado, assegurando uma melhor distribuição do ligante. Esta técnica oferece melhores garantias de homogeneização e qualidade da mistura, permitindo adicionalmente uma maior rapidez e versatilidade de execução em condições atmosféricas desfavoráveis, como por exemplo, os ventos fortes ou a chuva, que são impeditivos da aplicação por via seca.

- Mistura – para este processo deve-se recorrer a uma misturadora equipada com um disco de grades de eixo horizontal, com velocidade regulável, responsável pela mistura de largura igual ao espalhamento efectuado previamente. Este equipamento permite o controlo da espessura da camada através da profundidade atingida pelas respectivas grades, regulando automaticamente a profundidade através de um indicador graduado, situado entre a grade de discos e o chassis traseiro. De forma a não haver arraste longitudinal do material, a velocidade do equipamento deve ser regulada.



Figura 27 - Misturadora pulverizadora (Caspurro e Dias, 2008).

- Compactação – a compactação deverá ser efectuada longitudinalmente num intervalo de tempo não superior a 3h desde a colocação do ligante. O esquema de compactação, verificado aquando da realização do trecho experimental, apresentará 3 fases: fase inicial, fase intermédia e fase de acabamento. Pode-se ter, para a fase inicial, quatro passagens em modo vibratório com um cilindro de rasto liso, para a fase intermédia uma passagem sem vibração com o cilindro de rasto liso e para a fase de acabamento duas passagens

com o cilindro de pneus (figura 28). Terminadas todas as operações de compactação, deve ser atingido um grau de compactação superior a 98% em relação ao ensaio Proctor normal.



Figura 28 - Compactação em fase inicial e de acabamento (Caspurro e Dias, 2008).

- Acabamento da superfície – finalizada a compactação da camada, não é permitido o seu acréscimo, embora dentro do prazo máximo de execução estabelecido, poderá haver corte com a motoniveladora até se conseguir as secções definidas no projecto, com as tolerâncias estabelecidas no caderno de encargos. As áreas corrigidas, deverão então ser recompactadas. Concluídas as operações de compactação e acabamento, as quais deverão ser tão rapidamente executadas quanto possível, não é permitido qualquer tipo de tráfego de obra sobre a camada até que esteja terminado o processo de cura, exceptuando o equipamento necessário à aplicação do tratamento para a referida cura.
- Rega de cura – a mistura deve ser mantida húmida, pelo menos durante um período de 7 dias após a sua conclusão. Para tal, e logo após o acabamento da superfície, deverá ser aplicado um tratamento betuminoso de cura. Este tratamento deverá ser mantido e se necessário aplicado novamente até a execução da camada seguinte (figura 29).



Figura 29 - Rega de cura e respectivo equipamento (Caspurro e Dias, 2008).

No processo de fabrico da mistura solo-cimento em central, há grandes variações no comportamento mecânico da mistura, pelo que este facto deverá ser considerado no

dimensionamento de uma camada de solo-cimento. Comparando os custos/benefícios dos processos de tratamento realizados "in situ" e em central, pode dizer-se que o primeiro é o mais vantajoso, pois não exige transporte nem armazenamento da mistura.

4.1.2 Melhoria dos parâmetros geotécnicos após tratamento

De acordo com a variação das características do solo a consolidar, o comportamento dos diferentes tipos de cimento é diverso.

Alguns factores tais como a natureza dos solos, a granulometria, a constituição química e mineralógica, bem como as condições de trabalho, nomeadamente os teores de humidade, assim como os meios de pulverização, de homogeneização e compactação disponíveis, são factores que influenciam extraordinariamente os resultados obtidos.

Este capítulo tenta mostrar os factores físicos e mecânicos que influenciam a hidratação do cimento e as medidas construtivas que melhoram o desempenho da mistura.

A microestrutura da mistura de solo-cimento depende de algumas das características físicas dos solos, como seja a granulometria. De facto, se estivermos na presença de solos granulares bem graduados, dado o seu menor número de vazios, o preenchimento destes torna-se bastante mais fácil.

A baixa dosagem de ligante contida nas misturas de solo-cimento leva a que a solidarização do conjunto dependa da cimentação que ocorre em alguns pontos de contacto entre grãos, verificando-se uma baixa de percentagem de vazios preenchidos por produtos de hidratação.

A obtenção de misturas duráveis e resistentes está directamente relacionada com o estabelecimento dos pontos de ligação entre grãos conferida pelo ligante, havendo lugar a um envolvimento parcial das partículas de solo pelos grãos de cimento.

Se estivermos na presença de areias monogranulares e visto que estas têm um número de vazios muito elevado, apresentando uma área de contacto entre grãos reduzida, a dosagem de cimento terá de ser quase sempre superior à verificada nos solos granulares bem graduados. O mesmo acontece em solos com partículas de maior dimensão.

Por outro lado, os solos ricos em siltes e argilas, também causam dificuldades, pois as partículas coloidais de dimensões máximas iguais à menor dimensão das partículas de cimento são absorvidas pela superfície do grão de cimento formando uma película que não permite a difusão dos iões, perturbando o desenvolvimento da sua hidratação e impedindo o crescimento dos cristais dos produtos de reacção.

No que diz respeito às características da mistura, também poderão ser seriamente afectadas pela preparação, homogeneização e compactação. Mesmo no caso de uma mistura bem doseada, com bons resultados laboratoriais, se a preparação do solo a estabilizar "in situ" não for correcta, isto

é, se o solo não se encontrar com uma granulometria adequada e devidamente preparado (sem raízes e outros resíduos) esta solução poderá ser comprometida. Existem diversas especificações que definem as granulometrias a atingir no tratamento dos solos, sendo de referir que a maioria das partículas (ou agregados de partículas) se encontra abaixo dos 5 mm.

Também se afigura essencial a correcta distribuição do cimento no solo, bem como a garantia da eficácia da sua homogeneização, como sendo a única forma de garantir uma baixa dispersão de resultados. Caso contrário existe a possibilidade de obter em zonas ricas em ligante com resultados óptimos, acima dos valores necessários, enquanto noutras zonas corre-se o risco de rotura devida à falta de resistência.

Para minimizar erros de distribuição e até para colmatar outros efeitos como o arrastamento pelo vento, em regra aplica-se pelo menos dosagens de ligante 1% superiores às estudadas laboratorialmente.

4.2 Solo-Cal

4.2.1 Técnicas de execução do tratamento

A técnica de execução do tratamento de solos com cal, é em tudo semelhante ao tratamento com cimento.

No tratamento de solos com cal, existem dois processos de execução de estabilização: a via seca e a via húmida. A sequência dos trabalhos a executar, de acordo com a técnica do tratamento, encontra-se indicada nas figuras 30 e 31.

O tratamento por via seca contém os seguintes processos:

- Espalhamento da cal em pó (1);
- Mistura da cal com o solo (2);
- Compactação inicial (3);
- Correção do perfil (4);
- Compactação final (5).

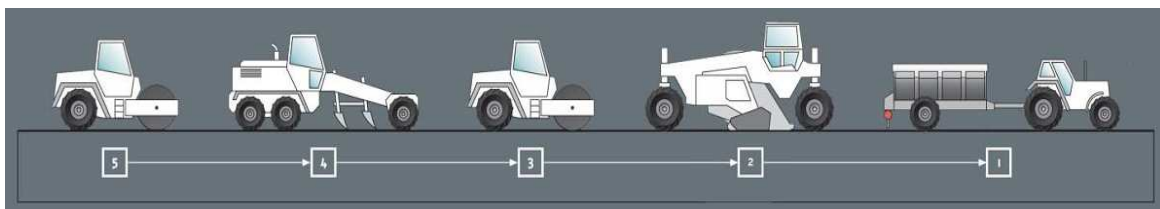


Figura 30 - Execução da estabilização por via seca (Cruz, 2008).

Enquanto o tratamento por via húmida inclui:

- Preparação do solo e armazenamento da cal (1);
- Execução e espalhamento do leite de cal (2);

- Mistura da cal com o solo (3);
- Compactação inicial (4);
- Correção do perfil (5);
- Compactação final (6).

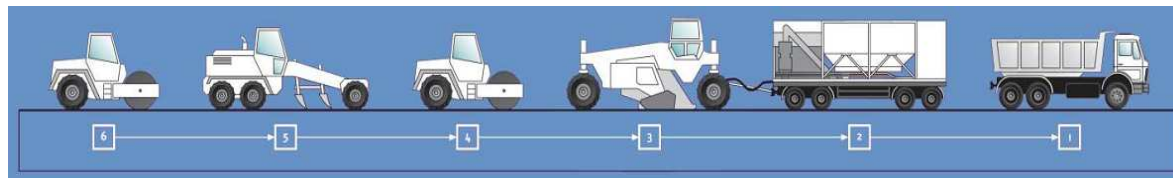


Figura 31 - Execução da estabilização por via húmida (Cruz, 2008).

Estas técnicas de tratamento poderão ser implementadas recorrendo a uma mistura “in situ” ou feita em central fixa ou móvel. A mistura em central pode ser adequada se o solo a executar resultar de um empréstimo. Neste caso, é feita a mistura de solo-cal e armazenada para poder ser utilizada posteriormente. O problema deste tratamento em central prende-se com o facto de o equipamento não ser eficaz devido à dificuldade de manuseamento dos solos argilosos, normalmente tratados.

Quando o solo a ser tratado contém as características essenciais ou existem locais próximos para o empréstimo, o melhor método a utilizar será “in situ”.

Os procedimentos construtivos dividem-se em diferentes fases, apresentadas seguidamente:

- Preparação da superfície existente – tal como no processo do solo-cimento, a superfície do solo a tratar deverá estar isenta da fracção grosseira, cuja separação dos materiais ocorre na escarificação “in situ”, apresentando homogeneização da fracção misturável, assim como, humedificação ou arejamento com vista a mudar o estado hídrico desta mesma fracção. O processo de escarificação será executado até à profundidade mínima necessária para que se obtenha uma camada de solo estabilizado com a rasante e a espessura constantes, sem apresentar elementos de grandes dimensões. Se o solo se encontrar húmido deverá proceder-se a um arejamento, processo este que deverá ser repetido até que se consiga obter um teor em água próximo do óptimo obtido no ensaio Proctor modificado. Há ainda equipamentos do tipo “pulvimixer” ou estabilizadoras (Figura 32) com um ou vários eixos de paletas, que permitem realizar em conjunto a escarificação, a desagregação e a mistura.



Figura 32 - Equipamento "pulvimixer" (<http://www.planete-tp.com>, consultado em Julho de 2009).

- Espalhamento da cal – a cal em pó deverá ser distribuída uniformemente com a dosagem pré-estabelecida, por meios mecânicos que devem estar munidos de doseadores volumétricos controlados pela velocidade de espalhamento, e de dispositivos adequados ao controlo e à redução da emissão de poeiras. Estes doseadores deverão dispor de capacidade suficiente que permita o espalhamento do ligante necessário, no máximo de duas aplicações (figura 33).



Figura 33 - Aplicação da cal viva com meios mecânicos (Cruz, 2008).

Quando não é possível o acesso de equipamento pesado ou se trata de zonas de extensão reduzida, poderá ser autorizada a distribuição do ligante manualmente. Este processo executa-se através da colocação dos sacos de cal no solo a tratar, formando uma quadrícula de lados aproximadamente iguais correspondentes à dosagem aprovada. Depois da abertura dos sacos, o seu conteúdo será distribuído de forma rápida e uniforme por meio de arrastadeiras manuais ou vassouras rebocadas (figura 34).



Figura 34 - Aplicação da cal viva manualmente (Neves, 2007).

No caso da cal a adicionar em forma de leitada, com uma relação ponderal água/cal não inferior a 3, será aplicada por passagens sucessivas e seguidas de uma mistura com o solo. Para este processo o equipamento a utilizar serão cisternas móveis ou rebocáveis com bicos de rega. O espalhamento da cal só será realizado nas superfícies onde se execute o tratamento no próprio dia.

- Humidificação – quando se utiliza a cal em pó, caso seja necessária a modificação, a rega será executada simultaneamente com a operação da mistura no caso de serem utilizados os “pulvimixers”, ou anteriormente ao espalhamento do ligante nas restantes situações, de forma a obter o teor em água estudado previamente. Deverá ter-se em consideração a eventual evaporação no decorrer dos trabalhos, devido à acumulação nas rodeiras deixadas pelo equipamento de humidificação. De referir, para o caso da cal em forma de leitada, que esta operação será dispensável. O equipamento de espalhamento de água deverá ter obrigatoriamente um controlo de dosagem de a forma se obter uma aplicação homogénea.
- Mistura e homogeneização – com a operação da mistura deverá obter-se uma distribuição homogénea de cal aplicada no solo, que poderá ser reconhecida pela cor uniforme final. Os meios mecânicos para realizar este processo estão equipados com grades de discos ou charruas rebocados por tractores de rastos ou por equipamentos do tipo misturador rotativo de eixo horizontal (“pulvimixers”), nos quais a mistura resultante é comparada, em qualidade, à obtida numa central de betão. A mistura entre a cal e o solo deverá ocorrer num intervalo de tempo inferior a 1h, de acordo com JAE (1998), de forma a não ocorrer a formação de grumos de cal, obtendo assim uma mistura homogénea. O número de passagens do equipamento deverá ser o suficiente de modo a garantir que 90% das partículas e torrões argilosos tenham uma dimensão inferior a 25 mm. A compactação e

acabamento, deverão realizar-se num intervalo de tempo inferior a meia hora, caso contrário será necessário realizar nova desagregação e mistura.

- Cura inicial – caso a mistura se realize em 2 etapas, o solo estabilizado “in situ” com cal estará sujeito a um período de cura entre 24 e 48 horas, no qual se evitarão variações do teor em água, compactando-se ligeiramente no caso de existir possibilidade de precipitação. Conforme as “Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos” (Junta de Castilla y León, 2004), este prazo de cura deverá ser aumentado se o índice de plasticidade do solo for superior a 50%, enquanto que o guia técnico francês (GTS, 2000) sugere um período de cura de 7 dias se o índice de plasticidade do solo for superior a 40%.

- Compactação – uma vez realizada a mistura, proceder-se-á à compactação do material até se alcançar a densidade previamente determinada. Nestes materiais há uma grande dependência entre a densidade obtida e as características de durabilidade e resistência, pelo que se deverá controlar os equipamentos de compactação no número de passagens necessárias até se alcançarem os valores de densidade desejados. No início da compactação, a mistura deverá estar solta na espessura especificada e o teor em água não deverá variar mais de 1% do valor óptimo determinado previamente. Caso existam fenómenos de instabilidade ou de deformação deverá ser reduzido o teor em água para que estes sejam eliminados. Segundo o guia técnico francês (GTS, 2000), os valores do grau de compactação deverão ser entre 96% e 98,5% do peso volúmico óptimo do ensaio Proctor normal.

A compactação será efectuada em duas fases, uma compactação parcial e uma compactação final. A primeira, efectuada logo após a conclusão da regularização da superfície, pretende conferir à camada, em toda a sua espessura, uma compacidade de cerca de 93% em relação ao Proctor normal. A regularização final deverá ser efectuada logo após a conclusão da primeira fase de compactação e tem como objectivo o acerto final das cotas e da geometria, que pode ser feito por frisagem ou por corte utilizando motoniveladoras. Por fim, realizar-se-á à compactação final, com o objectivo de atingir o grau de compactação especificado. De realçar que a potência dos compactadores será proporcional à espessura da camada a tratar.

- Acabamento da superfície – o reperfilamento deverá ser realizado antes de terminar a compactação de modo a acertar a rasante, com o auxílio de uma motoniveladora, de forma rápida e dentro do prazo de trabalhabilidade do material estabilizado. A superfície do solo estabilizado “in situ” com cal deverá obedecer aos perfis transversais e longitudinais do projecto, com uma margem de erro admitida entre 2 e 2,5 cm. Caso estas

tolerâncias não sejam cumpridas ou retenham água na superfície, serão corrigidas pela fiscalização. Nas situações em que seja necessária a remoção da camada superficial de solo estabilizado, esta deverá ser escarificada em metade da espessura e deverá ser adicionado um teor mínimo de 0,5% de cal e água em quantidade necessária, antes de se proceder a nova compactação.

- Rega de cura – finalizada a compactação da camada do solo, dever-se-á estender sobre ela uma rega de cura. Esta poderá ser efectuada com água ou com um tratamento de betuminoso. No caso da água, deverá ser mantida a superfície húmida a partir de regas constantes pelo menos durante 7 dias ou até que se estenda a camada seguinte. Aquando do tratamento betuminoso, a superfície deverá ser mantida húmida até à realização do tratamento, que deverá ser realizado o mais cedo possível, num prazo não superior a 4 horas. Neste tratamento será utilizada uma emulsão catiónica rápida de uma taxa de betume residual de cerca de 0,6 kg/m².

O tratamento de cura deve ser mantido e aplicado, caso necessário, novamente até à execução da camada seguinte. Durante este tratamento, deverá ser proibida a circulação de equipamento pesado, exceptuando os cilindros de pneus. Caso haja necessidade de circulação de tráfego de obra sobre a camada, deverá esperar-se até que não se produzam deteriorações superficiais e se proteja a rega de cura com uma camada de areia ou gravilha, que posteriormente será removida.

4.2.2 Melhoria dos parâmetros geotécnicos após tratamento

Numa primeira fase as alterações físicas do solo são desencadeadas devido às permutas iónicas e floculações ocorridas. Estas alterações e melhorias são normalmente aproveitadas para garantir condições de traficabilidade e de colocação em obra dos materiais.

No que diz respeito ao teor em água, os factores essenciais levam às reacções de hidratação entre a cal viva e o solo, à evaporação devida ao calor de hidratação, à evaporação provocada pela exposição ao ar durante a execução da mistura e à adição de uma determinada quantidade de material seco (Neves, 1993). De acordo com o guia técnico francês (GTS, 2000) a avaliação do aumento imediato da resistência das misturas compactadas pode ser feita através de ensaios de resistência à penetração do tipo CBR sem sobrecargas, realizados logo após a preparação dos provetes.

A granulometria mais fina dos solos é influenciada pela cal, onde os minerais argilosos são suficientemente abundantes e reactivos. Após a mistura da cal, e para uma redução do teor de

água, o solo passa a apresentar grãos de maiores dimensões com aparência mais solta, semelhante ao solo arenoso e seco.

Atendendo às modificações provocadas nas suas características de plasticidade, resultantes da adição de cal ao solo, é registada uma mudança dos limites de consistência, isto é, limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade (Neves, 1993). A componente argilosa do solo é responsável pela variação dos limites de liquidez e de plasticidade, que necessitam de teores em cal superiores para reduzir a sua plasticidade ou, num caso extremo, passarem a ser não plásticos. Este método provoca melhorias significativas nos solos com índices de plasticidade e expansibilidade elevados. Como podemos observar na figura 35, quanto maior for a percentagem de cal, menor será o índice de plasticidade (IP), cuja consequência se traduz no aumento do limite de plasticidade (LP), mantendo-se o limite de liquidez (LL) constante.

A redução da expansibilidade é consequência benéfica da redução do IP associado à adição da cal, podendo esta ser estimada a partir da relação com o IP.

Após as reacções químicas imediatas da cal com a fracção argilosa, as características de compactação do solo são alteradas significativamente, em função do teor em cal e o tempo de cura inicial da mistura solo-cal-água. A adição da cal leva a uma diminuição do valor do peso volúmico seco máximo e a um aumento do valor do teor em água óptimo, como se pode verificar na figura 36.

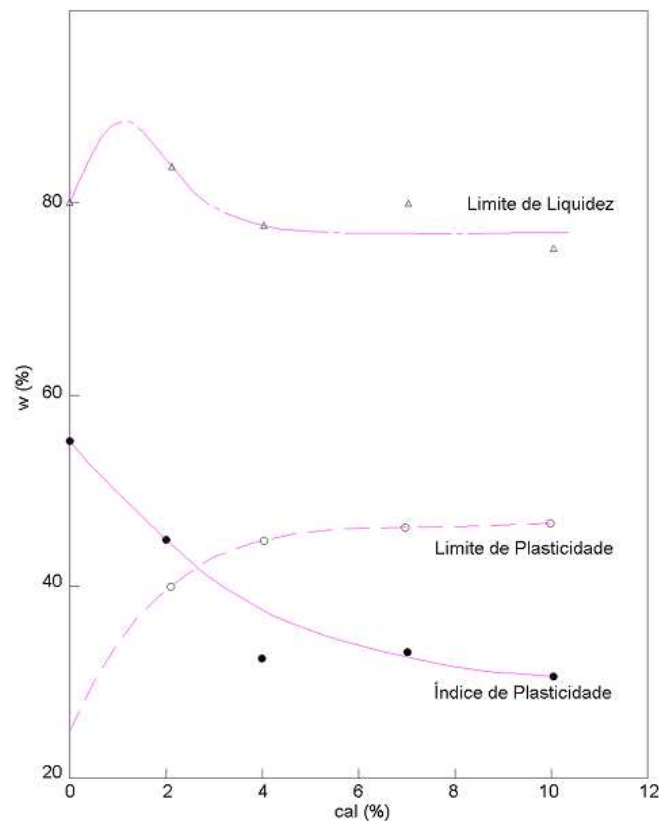


Figura 35 - Modificação da reologia dos solos argilosos devida à adição de cal (Cruz, 2008).

A resistência à compressão simples tem como principais factores o peso volúmico seco, o teor em água de compactação, a natureza do solo, o tipo e o teor em cal, e a temperatura de cura dos provetes de solo estabilizado com cal.

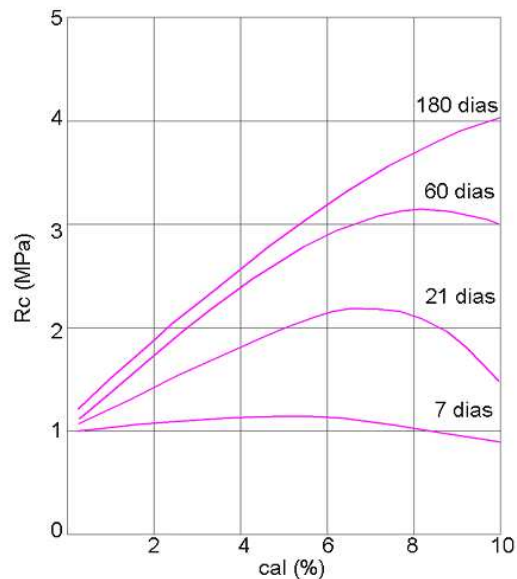


Figura 37 - Variação da resistência à compressão simples em função do teor em cal e do tempo (Cruz, 2008).

O módulo de deformabilidade de uma camada de solo devidamente estabilizada com cal é fundamental, já que o parâmetro é utilizado para o dimensionamento estrutural das camadas de apoio das infra-estruturas de transporte. Esta estabilização leva, normalmente, a um aumento significativo do módulo de deformabilidade ao longo do tempo, cuja cura continuada leva a um aumento de resistência, reduzindo cada vez mais a deformação na rotura.

4.3 Controlo da qualidade

O controlo da qualidade da mistura solo-cimento deverá ser realizado com base nos parâmetros definidos no Caderno de Encargos da respectiva obra. Neste, estão contidas as frequências de ensaios preconizadas, bem como as frequências mínimas de ensaios a realizar para solos a estabilizar, com o objectivo de verificar a ocorrência de variações da sua classificação e consequente aptidão para a estabilização.

Durante a fase de execução, e de acordo com o Caderno de Encargos da Junta autónoma de Estradas (JAE, 1998), no processo de espalhamento do solo, deve-se controlar o espalhamento do solo em cordão e correspondente regularização para que a espessura da camada seja superior a 25 cm. Deve também verificar-se a espessura pela topografia e do teor em água natural do solo com um gamadensímetro. A recolha de amostra de solo deverá ser realizada de acordo com a frequência mínima afixada, como indica o quadro 16.

O controlo da percentagem de cimento foi efectuado através da colocação de tabuleiros para a recolha do ligante, aquando do seu espalhamento e respectiva pesagem.

Quadro 16 - Frequência de ensaios para solos a estabilizar.

Ensaio de laboratório	n.º de ensaios	Período ou quantidade correspondente; critérios
Granulometria	1	A cada 2500 m ³
Limite de liquidez	1	A cada 2500 m ³
Limite de plasticidade	1	A cada 2500 m ³
Equivalente de areia	1	A cada 2500 m ³
Compactação pesada	1	Por semana de trabalho
Teor em água	3	A cada 2500 m ³

No processo de mistura, deve ser controlada a homogeneidade da combinação de solo com cimento e também deverão ser recolhidas amostras com uma frequência necessária, conforme indicado no quadro 17.

Quadro 17 - Frequência de ensaios da mistura de solo-cimento.

Ensaio de laboratório	n.º de ensaios	Período ou quantidade correspondente; critérios
Granulometria	1	Por cada dia de trabalho
Limite de liquidez	1	Por cada dia de trabalho
Limite de plasticidade	1	Por cada dia de trabalho
Equivalente de areia	1	Por cada dia de trabalho
Compactação pesada	1	Por cada semana de trabalho
Resistência à tracção por compressão diametral em provetes fabricados em laboratório (7 e 28 dias)	2x3	Por cada dia de trabalho
Teor em água	3	Por cada dia de trabalho

Após a execução, a espessura mínima da camada deverá ter 0,25 m após boa compactação, não devendo existir diferenças superiores a 3 cm ou inferiores a 2 cm em relação à espessura projectada. A compactação relativa e o teor de água deverão ser controlados com auxílio de um gamadensímetro, que deverá ser ensaiado duas vezes por perfil, não atingindo valores inferiores a 98% relativamente à baridade máxima seca do ensaio Proctor Modificado. Em termos de regularidade, e terminada a compactação, a superfície não deverá apresentar diferenças superiores a 2 cm em relação aos perfis transversais e longitudinais estabelecidos em projecto. Para o controlo da rega de cura, deverá ser verificada a taxa da emulsão catiónica, através da colocação de um geotextil com 1 m² para recolha da emulsão, aquando do seu espalhamento e respectiva pesagem. Na verificação da capacidade de suporte da camada, deverão ser realizados ensaios para determinação da deflexão, de 25 em 25 m, utilizando a viga Benkelman.

4.4 Patologias

Os pavimentos semi-rígidos ou semi-flexíveis são a situação intermédia entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso dos pavimentos compostos das misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume, entre outras, que apresentam razoável resistência à tracção.

Segundo Medina (1997), consideram-se tradicionalmente duas categorias de pavimentos:

- Pavimento flexível: constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente;
- Pavimento rígido: construído por placas de betão (raramente é armado) assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.

Quando se tem uma base cimentada sob o revestimento betuminoso, o pavimento é dito semi-rígido. O pavimento reforçado de betão asfáltico sobre placa de betão é considerado como pavimento composto.

De acordo com Medina (1997), a definição das camadas quanto às suas funções específicas e distintas umas das outras à medida que se passou a analisar o pavimento como um sistema de camadas e a calcular as tensões e deformações. A partir daí começou-se a considerar a absorção dos esforços de tracção pelas camadas de rigidez como o betão asfáltico (www.pavimentacao.ufjf.br, consultado em Agosto de 2009).

As patologias mais usuais nos pavimentos semi-rígidos são as fendas. Estas são denominadas como quaisquer descontinuidades na superfície do pavimento podendo assumir a feição de fissuras, fendas isoladas longitudinais ou transversais e fendas interligadas tipo “*pele de crocodilo*” ou em *bloco*.

As fissuras são fendas de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinalmente, transversalmente ou obliquamente ao eixo da via, somente perceptível à vista desarmada a distâncias inferiores a 1,5 m, com abertura inferior a 1 mm.

As fendas, são rasgos existentes no revestimento, facilmente visível à vista desarmada, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de fenda isolada ou interligada. Entre as fendas isoladas (figura 38) pode-se ter:

- Fenda transversal: fenda isolada que apresenta direcção predominantemente perpendicular ao eixo da via. Quando apresentar extensão até 1 m é denominada fenda transversal curta. Quando a extensão for superior a 1 m, denomina-se fenda transversal longa;
- Fenda longitudinal: fenda isolada que apresenta direcção predominantemente paralela ao eixo da via. Quando apresentar extensão até 1 m é denominada fenda longitudinal curta. Quando a extensão for superior a 1 m, denomina-se fenda longitudinal longa.



Figura 38 - Fenda Isolada (DER/SP, 2006).

➤ Fendas interligadas:

- ✓ Fendas do tipo “pele de crocodilo”: conjunto de fendas interligadas sem direcções preferenciais, assemelhando-se ao aspecto de pele de crocodilo (figura 39). Estas fendas podem apresentar, ou não, erosão acentuada nos bordos.



Figura 39 - Fendas interligadas do tipo "pele de crocodilo" (DER/SP, 2006).

- ✓ Fendas em bloco: conjuntos de fendas interligadas caracterizadas pela configuração de blocos formados por lados bem definidos, podendo, ou não, apresentar erosão acentuada nos bordos (figura 40).



Figura 40 - Fendas interligadas em bloco (DER/SP, 2006).

Outras patologias passivas de ocorrer são:

- Abatimento: deformações permanentes caracterizadas por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de pequena elevação do revestimento asfáltico, podendo apresentar-se sob a forma de abaixamento plástico ou de consolidação.
- Abatimento plástico: causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de pequena elevação do revestimento asfáltico. Quando ocorre em extensão até 6 m é denominado depressão plástico local. Quando a extensão for superior a 6 m e estiver localizado ao longo do rodado do veículo é denominado depressão plástica do rodado do veículo ou flecha no rodado do veículo.
- Abatimento de consolidação: causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito sem estar acompanhado de pequena elevação do revestimento asfáltico. Quando ocorre em extensão até 6 m é denominado abatimento de consolidação local. Quando a extensão for superior a 6 m e estiver localizado ao longo do rodado do veículo é denominado abatimento de consolidação do rodado do veículo ou flecha no rodado do veículo.
- Ondulação: deformação caracterizada por irregularidades longitudinais, com pequenos comprimentos de onda e amplitude irregular, acompanhadas ou não de escorregamentos, resultando em sensíveis vibrações para os veículos em movimento (figura 41).



Figura 41- Ondulações ou corrugações (DER/SP, 2006).

- Escorregamento: deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua (figura 42).
- Exsudação: excesso de ligante asfáltico na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento (figura 43).

- Desgaste: efeito do desgaste progressivo do ligante e do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais (figura 44).



Figura 42 - Escorregamento de massa (DER/SP, 2006).



Figura 43 – Exsudação (DER/SP, 2006).



Figura 44 – Desgaste (DER/SP, 2006).

- Pelada: cavidade que se forma no revestimento por diversas causas, inclusive por falta de aderência entre camadas sobrepostas, causando o desprendimento das placas das

camadas, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento e provocar a desagregação dessas camadas (figura 45).



Figura 45 - Pelada (DER/SP, 2006).

- Remendo: correção, em área localizada, de defeito do pavimento (figura 46). Considera-se remendo superficial quando houver apenas correção do revestimento, ou profundo quando, além do revestimento, forem corrigidas uma ou mais camadas inferiores, podendo atingir o subleito (<http://ftp.sp.gov.br>, consultado em Agosto de 2009).



Figura 46 – Remendo (DER/SP, 2006).

Na figura 47 pode observar-se o efeito de flecha num pavimento, ocorrido nas zonas de maior intensidade da passagem dos rodados dos veículos, especialmente tráfego de pesados.



Figura 47 - Flecha na faixa de rodagem (DER/SP, 2006).

5. Experiências em Portugal e na Europa

5. Experiências em Portugal e na Europa

A utilização do processo do tratamento de solos recorrendo à mistura com ligantes hidráulicos encontra-se em crescimento em Portugal, embora na Europa já seja uma prática corrente, nomeadamente em França e Espanha, os quais são bons exemplos a ter em consideração. Nos pontos 5.1 e 5.2 serão referenciadas experiências, de solo-cimento e solo-cal, respectivamente. No ponto 5.3 são apresentadas as considerações económicas. Em geral, a utilização da técnica de tratamento de solos com ligantes tem aumentado ao longo dos tempos essencialmente devido às elevadas pressões económicas e ambientais ligadas à escassez e elevado custo de materiais tradicionais. Espera-se assim que em Portugal, num futuro próximo, se assistam com mais frequência à utilização deste tipo de tratamento.

5.1 Solo-Cimento

Em Portugal, apesar da pouca utilização da técnica de tratamento de solos com cimento, há a registar as seguintes obras, inseridas no quadro 18.

Quadro 18 - Exemplos de obras com aplicação de solo-cimento.

Obra	Data de execução	Materiais Seleccionados		Execução	Tipo de aplicação	Tensão de compressão (MPa)		Melhorias
		Tipo de solo	% de cimento utilizada			7 dias	28 dias	
IP4 – Variante a Vila Real (3km)	1987	A-1-b	5	“in situ”	Base (estrutura directa)	2,0 a 2,2	-	Melhoramento da carência local em agregados adequados para as previstas camadas de base
IP5 – Celorico da Beira/Guarda (1km)	1989	A-1-b	5,5	Em central	Sub-base (base em betão pobre)	3,2	4,2	Melhoramento do leito em situação precária
IC24 – 1º lanço (Travagem/EN13) (10km, dos quais 9km com solo cimento)	1989	-	5	Em central	Base (estrutura directa)	0,8 a 1,1	<2,0	Melhoramento da camada base, com as características que agora se reconhecem sido estimadas por excesso
IC1 – Neiva/Darque (8km)	1994	A-1-b	6	Em central	Base (estrutura directa)	-	>0,5	Melhoramento no processo de compactação do solo-cimento
IC5 – Variante à EN 206, em Fafe (5km)	-	A-1-b	6,5	Em central	Base (estrutura inversa)	-	-	Melhoramento da mistura de projecto, espessura e compactação
IC13 – Anel Regional de Lisboa (Coima/EN108)	1998	-	4 a 6	“in situ”	Leito (estrutura directa)	-	-	-

(continua)

Quadro 18 - Exemplos de obras com aplicação de solo-cimento (continuação).

IP6 – Abrantes/Mouriscos (9km)	-	Solos locais	3	“in situ”	Indefinida (entre leito e base) (estrutura directa)	-	-	Melhoramento entre o leito e a base
A4 – Sublanço Penafiel/Amarante (24,2km)	1994	A-1-b	6	Em central	Sub-base (base em solos seleccionados)	4	-	Melhoramento da camada do sub-base
A6 – Sublanço Vendas Novas/Montemor (20,9km)	1995	A-1-b	4,5	Em central	Sub-base (base em solos seleccionados)	3,5	-	Melhoramento da camada do sub-base

5.2 Solo-Cal

A técnica de tratamento de solos com cal, é em Portugal ainda menos aplicada do que a técnica com cimento, embora por grande parte da Europa seja uma prática cada vez mais corrente, conforme constam os exemplos do quadro 19.

Quadro 19 - Exemplos de obras de tratamento de solos com cal.

Obra	Data de execução	Melhorias
Auto-estrada A381: Jerez de la Frontera – Los Barrios (Espanha)	2003	Reutilização de 5 milhões de m ² de solo
Auto-estrada AP61: San Rafael – Segovia (Espanha)	2003	Devido às baixas temperaturas locais, a adição de cal possibilitou o cumprimento dos prazos desejados
Novas pistas do Aeroporto de Barajas (Espanha)	2003	Diminuição da plasticidade utilizando uma solução mista com cimento
Instalações Desportivas e Campo de Futebol de Ciempozuelos (Espanha)	2006	Estabilização de um aterro, eliminando a sub-base, composto por materiais argilosos misturados com restos de demolições de construções
Alargamento das M501 e M511 entre a M49 e o km 21,8 da M501 (Espanha)	2000	Redução do teor em água, aumentado devido à ocorrência de chuvas
Aeroporto de Charles de Gaulle (França)	2000	Estabilização de solos siltosos com diferentes percentagens de cal
Auto-estrada A66: Almendralejo – Zafra (Espanha)	2000	Redução da plasticidade da fracção fina em solos com um CBR bastante elevado
Auto-estrada M45: Ligação dos troços N-IV a N-V	-	Redução do índice de plasticidade e do teor em água
Auto-estrada A2: Vienna – Graz (Áustria)	1965	Melhoramento das características mecânicas da fundação, reduzir a susceptibilidade dos solos à água durante a construção e substituir os materiais granulares indisponíveis na altura
Estradas na Normandia (França)	-	Redução do teor em água em solos siltosos de reduzida plasticidade
Linha Ferroviária de Alta Velocidade: Colónia – Frankfurt (Alemanha)	2000	Redução do teor em água e da plasticidade, aumentando a compactabilidade e a resistência do solo
Auto-estrada A231: Léon – Burgos (Espanha)	2001	Diminuição do peso volúmico seco máximo aumentando o teor em água óptimo de compactação
Parque Temático de San Martin de la Vega e os seus acessos (Espanha)	2000	Diminuição da plasticidade e aumento da capacidade resistente dos solos argilosos
Estradas A305 e A301 (Espanha)	2000	Aproveitamento de 175 mil m ³ , onde se reduziu a plasticidade muito elevada
Renovação de linhas férreas em Portugal	2004	Redução de tempo de execução e tratamento de 200mil m ³ de solo argiloso

(continua)

Quadro 19 - Exemplos de obras de tratamento de solos com cal.

Auto-estrada A34: Sedan – Reims (França)	2003	Reutilização de argilas verdes e castanhas
Aeroporto de Madrid (Espanha)	2003	Tratamento de 1 milhão de m ³ de solo, reduzindo o teor em água
N61 – Província de Sealand (Holanda)	2002	Diminuição do teor em água e aumento da capacidade resistente do solo
A29 Oeste: Neufchâtel-en-Bray – Amiens (França)	2004	Valorização dos calcários pouco densos e muito húmidos
Estradas florestais em Alicante (Espanha)	2002	Reciclagem dos pavimentos existentes a frio com ligante, “in situ”
TGV Este (França)	2003	Diminuição imediata do teor em água, adicionando ligante a calcários
Linha Ferroviária: Usti nad Labem – Lovosice (República Checa)	1999	Melhoria das camadas de apoio das vias-férreas, e tratamento “in situ” dos solos.
Linha ferroviária: Zatec – Plzen (República Checa)	2001	Tratamento de solos utilizando matérias leves, diminuindo o elevado teor em água
Linha ferroviária: Trebovice – Rudoltice (República Checa)	-	Aumento do valor do CBR e da coesão efectiva
Auto-estrada A26: Calais – Reims (França)	1978	Diminuição do teor em água e reutilização de 10 milhões de m ³ de material
Auto-estrada A1: Milão – Nápoles (Itália)	2004	Reutilização de 1 milhão de m ³ de solo, melhoramento dos valores de CBR e resistência à compressão
N411: Aalst – Opwijk (Bélgica)	2003	Aumento da capacidade resistente do solo
Auto-estrada A89: Bordeaux – Lyon (França)	2003	Tratamento de solos silto-argilosos para utilização em aterro
Auto-estrada A20: Montauban – Cahors Sud (França)	2003	Melhoramento das características mecânicas do solo
Linhas ferroviárias de alta velocidade na Bélgica	-	Diminuição do teor de humidade e plasticidade
Auto-estrada A2 (Portugal)	2002	Tornou-se uma mistura não plástica, obtendo valores de CBR elevado e expansibilidade reduzida
Auto-estrada A10 (Portugal)	-	Melhoramento da granulometria; aumento do limite de plasticidade consequente diminuição do índice de plasticidade; diminuição do peso volúmico seco máximo

5.3 Considerações Económicas

Tendo em conta o estado económico actualmente vivido no mundo, torna-se necessário optar por soluções mais económicas no que diz respeito às técnicas construtivas, ou seja, deverá ser sempre estudada uma possibilidade que garanta uma execução dos trabalhos de forma tecnicamente válida ao menor custo.

Uma solução muito viável à redução de custos é a solução apresentada neste trabalho. O tratamento de solos com ligantes hidráulicos, como já foi anteriormente referido, apresenta várias vantagens entre as quais, a redução significativa de custos em vários aspectos durante a sua execução em obra. De facto, a utilização do solo local elimina a necessidade de o remover e transportar para vazadouro, reduzindo assim o prazo de execução da obra e trazendo, consequentemente, benefício em termos dos custos e da gestão financeira.

A remoção a vazadouro torna-se menos dispendiosa não só pela diminuição da quantidade de material transportado como pela diminuição da necessidade de espaço físico a depósito.

Também são de salientar as vantagens que resultam do melhoramento das condições de circulação do equipamento de movimentação de terras e veículos de obra, e da possibilidade de se poder trabalhar em condições mais favoráveis mesmo em situações particularmente adversas de pluviosidade (Mesquita, 2008).

Seguidamente apresenta-se, nos quadros 20 e 21, uma simulação de possíveis custos, consoante as combinações utilizadas neste trabalho, para o tratamento de um solo plástico e não plástico, respectivamente, com ligantes hidráulicos.

Quadro 20 - Custos de construção de um aterro com solo plástico tratado, num exemplo de obra.

Solo escavado tratado com:	Fase/Custo									
	Escavação do solo (€/m ³)	Transporte do local de escavação para aterro (€/m ³)	Descarga do solo na área do aterro (€/m ³)	Compra de cimento à porta de fábrica (€/m ³) (% x 1,7t/m ³ x 79€/t)	Compra de cal à porta de fábrica (€/m ³) (% x 1,7t/m ³ x 65€/t)	Mistura e nivelamento (€/m ³)	Nivelamento e compactação (€/m ³)	Total (€/m ³)	Volume (m ³) (1000m x 10m x 0,30m)	Simulação da obra (€)
3%CIM+0%CAL	2,00	1,50	0,50	4,03	0,00	2,20	2,00	12,23	3000,00	36687,00
2%CIM+1%CAL	2,00	1,50	0,50	2,69	1,11	2,20	2,00	11,99	3000,00	35973,00
1,5%CIM+1,5%CAL	2,00	1,50	0,50	2,01	1,66	2,20	2,00	11,87	3000,00	35616,00
1%CIM+2%CAL	2,00	1,50	0,50	1,34	2,21	2,20	2,00	11,75	3000,00	35259,00
0%CIM+3%CAL	2,00	1,50	0,50	0,00	3,32	2,20	2,00	11,52	3000,00	34545,00

Quadro 21 - Custos de construção de um aterro com solo não plástico tratado, num exemplo de obra.

Solo escavado tratado com:	Fase/Custo									
	Escavação do solo (€/m ³)	Transporte do local de escavação para aterro (€/m ³)	Descarga do solo na área do aterro (€/m ³)	Compra de cimento à porta de fábrica (€/m ³) (% x 1,7t/m ³ x 79€/t)	Compra de cal à porta de fábrica (€/m ³) (% x 1,7t/m ³ x 65€/t)	Mistura e nivelamento (€/m ³)	Nivelamento e compactação (€/m ³)	Total (€/m ³)	Volume (m ³) (1000m x 10m x 0,30m)	Simulação da obra (€)
4%CIM+0%CAL	2,00	1,50	0,50	5,37	0,00	2,20	2,00	13,57	3000,00	40716,00
3%CIM+1%CAL	2,00	1,50	0,50	4,03	1,11	2,20	2,00	13,33	3000,00	40002,00
2%CIM+2%CAL	2,00	1,50	0,50	2,69	2,21	2,20	2,00	13,10	3000,00	39288,00
1%CIM+3%CAL	2,00	1,50	0,50	1,34	3,32	2,20	2,00	12,86	3000,00	38574,00
0%CIM+4%CAL	2,00	1,50	0,50	0,00	4,42	2,20	2,00	12,62	3000,00	37860,00

O exemplo apresentado é relativo a uma simulação de pequeno trecho de uma estrada com volumetria de camada de aterro correspondente a 1 Km de extensão, uma largura de 10 m e uma espessura de 0,30 m.

6. Estudo Experimental

6. Estudo Experimental

6.1 Estudo de formulação de uma mistura de solo-cimento / solo-cal

Os estudos de formulação para uma mistura de solo-cal ou solo-cimento, têm como objectivo principal estabelecer as regras para a definição da dosagem do ligante hidráulico, consoante as necessidades de obtenção de determinadas características.

A formulação da mistura permite determinar a quantidade de cal que leva à optimização das características de resistência e deformabilidade da camada final, em termos técnicos e económicos.

Para tal, realizaram-se ensaios laboratoriais, tais como, a análise granulométrica, os limites de consistência, a caracterização da compactação, o equivalente de areia, o azul-de-metileno, todos eles para caracterização dos solos. No que diz respeito à cal, são realizados ensaios de análise granulométrica, reactividade, superfície específica e da massa volúmica.

Estes ensaios são fulcrais para se determinar o tipo de tratamento a escolher, assim como a percentagem de ligante hidráulico a ser utilizado no melhoramento das características geotécnicas do solo.

Após o tratamento dos solos é necessário estudar algumas características, para se determinar a sua evolução, tais como, análise granulométrica, equivalente de areia e azul-de-metileno.

6.2 Metodologia de ensaios

Para a realização deste trabalho, e de modo a determinar os parâmetros a serem cumpridos pelo caderno de encargos (JAE, 1998), foi necessário realizar um estudo de formulação para as misturas de solo e ligante hidráulico com a finalidade de se obter uma percentagem óptima de ligante a adicionar.

Este estudo de formulação, consiste em primeiro lugar, em caracterizar o solo para determinar os parâmetros mais importantes (encontrando-se exemplos desses ensaios na figura 48), tais como, a granulometria, o equivalente de areia, o azul-de-metileno, os limites de liquidez e plasticidade, a baridade seca máxima, teor de água óptimo, a expansibilidade e a percentagem de força de penetração do solo.



Figura 48 - Exemplos de alguns ensaios de caracterização do solo (azul-de-metileno, equivalente de areia e CBR, respectivamente).

Na figura 49, estão presentes as 4 etapas fundamentais da aplicação de cal e cimento para tratar cada um dos tipos de solo. Inicialmente, humedece-se o solo, para depois se acrescentar cal, misturando-se com o solo para que haja reacção entre ambos. Em seguida, é adicionado cimento, repetindo-se a homogeneização com o solo, obtendo-se assim a mistura de solo-cal-cimento.



Figura 49 – Etapas do processo de aplicação da cal e do cimento para o tratamento do solo.

Os ligantes hidráulicos foram também caracterizados, utilizando-se para o cimento a análise granulométrica, massa volúmica e superfície específica. Para a cal, além dos ensaios anteriormente referidos, também foi realizado o ensaio da velocidade de reacção.

Após determinados estes parâmetros, podemos escolher o tipo de tratamento a aplicar no solo. No caso deste trabalho foi considerada adição de combinações de cimento *portland* CEM II/B L 32.5N e cal viva.

Para o solo plástico (argila magra arenosa (CL) / A-6(10)) foram adicionadas quantidades de 3%, 4% e 5% de cimento, realizando-se em cada mistura, provetes para efectuar os ensaios de resistência à compressão diametral aos 7 e 28 dias, e resistência à compressão simples aos 28 dias.

Após os rebentamentos destes provetes, e em comparação com os valores de referência do caderno de encargos, podemos determinar qual a percentagem mínima que garanta a resistência estipulada aos 7 e 28 dias na compressão diametral e aos 28 dias na compressão simples.



Figura 50 - Exemplo de provetes para o ensaio de resistência à compressão simples e diametral.

Na figura 50, podem-se observar exemplos de provetes para ensaio à compressão simples e diametral, respectivamente.

Os valores 3%, 4% e 5% foram as percentagens seleccionadas tendo em conta as características apresentadas pelo solo e a percentagem mínima de 3% exigida no caderno de encargos.

Depois da escolha da percentagem óptima de cimento a utilizar no solo plástico, realizou-se o ensaio proctor à mesma, com o intuito de determinar um valor de referência da baridade e do teor de água.

Todo este processo é repetido para o solo não plástico (areia bem graduada com silte (SW-SM) / A-1-b(0)). Para este solo foram experimentadas as percentagens de cimento de 4% e 5%, e adoptado, após rebentamento dos provetes, a percentagem de 4% de acréscimo de ligante, a qual se comprovou ser suficiente para cumprir com o mínimo exigido pelo caderno de encargos.

No final deste estudo de formulação, procedeu-se à execução de provetes de ensaio para cada um dos tipos de solos.

Para o solo plástico foram utilizadas as percentagens de: 3% de cimento e 0% de cal; 2% de cimento e 1% de cal; 1,5% de cimento e 1,5% de cal; 1% de cimento e 2% de cal; e 0% de cimento e 3% de cal.

Para o solo não plástico, as combinações utilizadas foram as percentagens de: 4% de cimento e 0% de cal; 3% de cimento e 1% de cal; 2% de cimento e 2% de cal; 1% de cimento e 3% de cal; e 0% de cimento e 4% de cal.

Em cada uma das percentagens óptimas foram realizados três provetes para cada um dos ensaios a executar: resistência à compressão simples aos 7 dias; resistência à compressão simples aos 28

dias; resistência à compressão diametral aos 7 dias; resistência à compressão diametral aos 28 dias; e PCDIAM.



Figura 51 - Exemplo dos provetes a ensaiar na prensa de compressão diametral - PCDIAM.

No que diz respeito ao volume dos provetes, para os ensaios de PCDIAM (figura 51) foram utilizados provetes mais reduzidos com 98 cm^3 , e para os restantes ensaios os provetes continham um volume de 3230 cm^3 .

Após o rebentamento dos provetes, foram também efectuados ensaios de caracterização, tais como, análise granulometria, e equivalente de areia e azul metileno, de modo a permitir a verificação da evolução dos parâmetros acima referidos, antes e após o tratamento do solo com os ligantes hidráulicos, em ambos os solos. Complementarmente, realizaram-se também ensaios ao PH das misturas.

Para realizar a análise granulométrica por peneiração húmida, recorreu-se à norma do LNEC E239 de 1970, que tem por objectivo determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas de um solo, retidas no peneiro ASTM n.º200 (0,074 mm) e a percentagem de material passado nesse peneiro.

O ensaio de equivalente de areia, segundo a norma LNEC E177 de 1967, destina-se a determinar o equivalente de areia, sendo esta a característica que exprime a quantidade e a qualidade dos finos presentes num solo.

Os limites de consistência foram executados de acordo com a norma NP 143 de 1969, que tem como objectivo definir e fixar os processos para a determinação dos limites de liquidez, plasticidade e retracção de solos. A determinação do limite de liquidez e plasticidade é apenas aplicável a solos com partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm e cuja massa seja 30% ou mais. O ensaio deixa de ter sentido quando os solos são predominantemente arenosos.

Para a caracterização dos solos é necessário também o ensaio de compactação (Proctor), segundo a norma LNEC E197 de 1966, destinando-se a fixar o modo de determinar a relação entre o teor em água e a baridade seca dos solos. Entre outras aplicações, o ensaio de compactação permite

um termo de comparação para o controle da baridade e humidade no campo. Dos tipos de compactação existentes, especificam-se os seguintes:

- Compactação leve em molde pequeno;
- Compactação pesada em molde pequeno;
- Compactação leve em molde grande;
- Compactação pesada em molde grande.

O ensaio da determinação do CBR, segundo a norma LNEC E198 datada de 1967, tem como objectivo fixar o modo de determinação do valor do CBR em solos com vista ao dimensionamento de pavimentos flexíveis de estradas e aeródromos. O ensaio consiste em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma certa profundidade, com determinada velocidade. O valor do CBR é a força requerida para o pistão penetrar até essa profundidade, expressa em percentagem da força necessária para o mesmo pistão penetrar, até à mesma velocidade, utilizando-se normalmente, penetração de 2,5 mm e 5,0 mm.

A determinação do índice de CBR imediato é realizada de acordo com a norma NF P94-078, esta que descreve os equipamentos, procedimentos e processo de ensaios de funcionamento para a determinação do: Índice Portante Imediato (IPI); Índice de CBR imediato; e Índice de CBR após imersão, de um solo ou um material granular utilizado na construção de terraplanagem ou pavimentos de fundação. Aplica-se nos solos, materiais rochosos e subprodutos industriais definidos na norma NF P 11-300, desde que a proporção de elementos onde o diâmetro máximo (Dmax) que excede 20 mm não exceda 30%. Aplica-se, igualmente, aos materiais quando estes são misturados com vários produtos, como ligantes hidráulicos ou pozolânicos, fibras, etc.

O Índice CBR antes de imersão e Índice CBR imediato são grandezas utilizadas para caracterizar um solo ou um material composto por granulometria variada, desde que suporte uma estrutura de aterro.

O Índice Portante Imediato é a grandeza utilizada para avaliar a aptidão, de um solo ou de um material composto por granulometria variada, para suportar a circulação de máquinas de obra.

A caracterização dos ligantes hidráulicos (cimento e cal) tem como principais ensaios a análise granulométrica, a massa volúmica e a superfície específica. O ensaio de análise granulométrica, referente a materiais muito finos, como por exemplo o filer, segue a norma LNEC E234 de 1969, que se destina a fixar o modo de determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas que constituem o filer.

A determinação da massa volúmica (usualmente aplicada para cimentos, mas também utilizada para a cal), é realizada em concordância com a norma LNEC E64 de 1979. Determina-se a massa de uma quantidade definida de cimento previamente seco e é determinado o volume

correspondente num voluminómetro com as características especificadas, calculando-se a massa volúmica a partir destes 2 valores.

A determinação da superfície específica segundo a norma LNEC E65 datada de 1980, tem por objectivo fixar o método de determinação da superfície específica de cimentos. Para a determinação da superfície específica é necessário determinar a massa volúmica (LNEC E64:1979). Determina-se o tempo de escoamento de uma certa quantidade de ar através de uma camada do cimento em ensaio, compactada em condições especificadas, e por comparação com o tempo de escoamento da mesma quantidade de ar através de uma camada de cimento padrão de superfície específica conhecida, calculando-se o valor da superfície especificada do cimento em ensaio.

7. Análise de Resultados

7. Análise de Resultados

7.1 Solo plástico

Após a realização dos ensaios de caracterização do solo plástico, proveniente da obra do Adutor de Pedrógão, localizada no município da Vidigueira, distrito de Beja (Baixo Alentejo) e recolhido na cota PK2+700, cujos resultados se encontram apresentados no quadro 22, permitiu classificar-se o solo, segundo as normas Unificada e AASTHO, como uma argila magra arenosa (CL) / A-6(10).

Quadro 22 - Características do solo plástico.

Ensaio	Norma	Resultados	
Análise Granulométrica	LNEC E 239	P#3/4''	100.0 %
		P#3/8''	98.8 %
		P#nº4	93.6 %
		P#nº10	89.0 %
		P#nº20	82.7 %
		P#nº40	78.4 %
		P#nº60	74.7 %
		P#nº140	63.5 %
		P#nº200	57.9 %
Equivalente de Areia	LNEC E 199	13 %	
Limites de Consistência	NP-143	Limite de Liquidez	39 %
		Limite de Plasticidade	16 %
		Índice de Plasticidade	23 %
Compactação Proctor	LNEC E 197	γ_d máx	1.839 g/cm ³
		w_{opt}	11.2 %
CBR	LNEC E 199	CBR % (95% CR) = 6 (2.5mm)	
		CBR % (95% CR) = 7 (5.0mm)	
		Expansão % (95% CR) = 3	
Ensaio de Azul-de-metileno	NF P 94-068	3.66 g/100g _{solo}	

No quadro 23, encontram-se presentes os diferentes teores de água do solo tratado com os ligantes hidráulicos, isto é, teor em água (W_a), teor de água com cimento (W_{a+c}) e teor de água com cimento e cal (W_{a+c+c}).

Quadro 23 - Diferentes teores de água do solo tratado com ligantes hidráulicos.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura									
			Peso do Proвете	w_a (%)		Média	w_{a+c} (%)		Média	w_{a+c+c} (%)		Média
70	0	3	6636	13,6	13,4	14,0	-	-	-	13,4	12,9	13,4
71			6637	13,9			-			12,7		
72			6618	12,7			-			12,5		
58	0	3	6683	14,7	15,2	14,0	-	-	-	14,5	14,3	13,4
59			6720	15,2			-			14,1		
60			6686	15,6			-			14,3		
100	0	3	6658	13,7	13,5	14,0	-	-	-	12,9	13,1	13,4
101			6688	13,3			-			13,3		
(1)			(1)	(1)			-			(1)		
85	0	3	6683	13,7	14,0	14,0	-	-	-	13,2	13,2	13,4
86			6653	14,6			-			13,3		
87			6658	13,8			-			13,1		
67	1	2	6553	13,4	13,6	14,0	12,8	12,9	13,6	12,1	12,3	13,1
68			6647	13,9			12,9			12,4		
69			6688	13,5			13,0			12,3		
55	1	2	6700	14,6	14,4	14,0	14,6	14,3	13,6	14,0	13,5	13,1
56			6697	14,7			14,2			13,9		
57			6678	13,9			14,0			12,7		
206	1	2	6561	13,4	13,6	14,0	13,3	13,5	13,6	13,1	13,2	13,1
208			6588	13,8			13,6			13,3		
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)		
82	1	2	6645	14,3	14,4	14,0	13,8	13,8	13,5	13,2	13,2	13,1
83			6660	14,4			13,7			13,0		
84			6671	14,6			13,9			13,4		
64	15	1,5	6566	13,6	13,5	13,9	13,3	13,2	13,5	13,0	12,8	13,1
65			6630	13,5			13,1			12,8		
66			6451	13,4			13,1			12,7		
52	15	1,5	6653	14,1	14,0	13,9	13,7	13,6	13,5	13,1	13,2	13,1
53			6728	14,0			13,7			13,2		
54			6761	13,9			13,5			13,2		
204	15	1,5	6562	13,9	13,9	14,0	13,7	13,7	13,4	13,4	13,4	13,1
205			6660	13,8			13,7			13,3		
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)		
79	15	1,5	6676	14,1	14,3	13,9	13,1	13,3	13,4	12,6	13,0	12,8
80			6668	14,6			13,5			13,4		
81			6697	14,3			13,4			13,1		
61	2	1	6663	13,3	13,3	13,9	12,8	12,8	13,4	12,3	12,4	12,8
62			6653	13,2			12,7			12,5		
63			6683	13,5			12,8			12,5		
49	2	1	6616	13,7	14,4	13,9	13,5	14,0	13,4	12,9	13,0	12,8
50			6688	14,3			14,1			13,2		
51			6680	15,1			14,5			13,0		
202	2	1	6639	14,6	14,5	14,0	14,1	14,1	13,4	13,9	13,8	12,8
203			6616	14,4			14,0			13,6		
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)		
76	2	1	6571	12,9	13,3	14,0	12,5	12,9	13,0	11,6	12,0	12,8
77			6542	14,0			13,4			11,7		
78			6634	13,0			12,8			12,8		
1	3	0	6642	14,5	14,1	14,0	12,7	13,0	13,0	-	-	-
2			6606	13,6			12,9			-		
3			6646	14,2			13,3			-		
28	3	0	6601	13,8	13,4	14,0	11,9	12,3	13,0	-	-	-
29			6618	12,7			12,3			-		
30			6619	13,6			12,6			-		
200	3	0	6726	14,9	14,8	14,0	14,0	14,0	13,0	-	-	-
201			6708	14,6			13,9			-		
(1)			(1)	(1)			(1)			-		
73	3	0	6706	13,7	13,8	14,0	12,5	12,7	13,0	-	-	-
74			6733	13,8			12,2			-		
75			6701	13,9			13,4			-		

(1) Provetes realizados, mas não contabilizados devido aos resultados aberrantes obtidos.

No quadro 24, encontram-se presentes os diferentes teores de água do solo tratado com os ligantes hidráulicos, isto é, teor de água (W_a), teor de água com cimento e cal antes (W_{a+c}) e após a cura (W_f).

Quadro 24 - Evolução dos teores de água, antes e após a cura.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura					Após cura						
			Peso do Provete	W_a		Média	W_{a+c}		Média	Peso do Provete	W_f		Média	
70	0	3	6636	13,6	13,4	14,0	13,4	12,9	13,4	6634	11,7	12,0		
71			6637	13,9			12,7			6636	11,5			
72			6618	12,7			12,5			6616	11,6			
58	0	3	6683	14,7	15,2		14,5	14,3		6686	10,9		11,2	
59			6720	15,2			14,1			6732	11,7			
60			6686	15,6			14,3			6690	11,1			
100	0	3	6658	13,7	13,5		12,9	13,1		6656	12,7		12,9	
101			6688	13,3			13,3			6684	13,1			
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)	(1)			
85	0	3	6683	13,7	14,0		13,2	13,2		6683	10,9		12,4	
86			6653	14,6			13,3			6653	13,6			
87			6658	13,8			13,1			6658	12,8			
67	1	2	6553	13,4	13,6		14,0	12,1		13,1	6553		10,2	12,1
68			6647	13,9				12,4			6647		11,5	
69			6688	13,5				12,3			6687		11,2	
55	1	2	6700	14,6	14,4	14,0		13,5	6702		12,7	12,9		
56			6697	14,7		13,9			6698		12,9			
57			6678	13,9		12,7			6680		13,0			
206	1	2	6561	13,4	13,6	13,1		13,2	6561		11,3	11,6		
208			6588	13,8		13,3			6587		11,9			
(1)			(1)	(1)		(1)			(1)		(1)			
82	1	2	6645	14,3	14,4	13,2		13,2	6645		12,3	12,8		
83			6660	14,4		13,0			6660		13,0			
84			6671	14,6		13,4			6672		13,0			
64	1,5	1,5	6566	13,6	13,5	13,9		13,0	13,1		6566	11,1	11,9	
65			6630	13,5				12,8			6630	11,2		
66			6451	13,4				12,7			6450	11,7		
52	1,5	1,5	6653	14,1	14,0		13,1	13,2		6659	11,9	12,1		
53			6728	14,0			13,2			6742	12,3			
54			6761	13,9			13,2			6767	12,0			
204	1,5	1,5	6562	13,9	13,9		13,4	13,4		6562	11,7	12,1		
205			6660	13,8			13,3			6660	12,4			
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)	(1)			
79	1,5	1,5	6676	14,1	14,3		12,6	13,0		6676	12,6	12,2		
80			6668	14,6			13,4			6667	11,8			
81			6697	14,3			13,1			6697	12,2			
61	2	1	6663	13,3	13,3		13,9	12,3		12,8	6662	11,0		11,6
62			6653	13,2				12,5			6654	11,4		
63			6683	13,5				12,5			6680	11,7		
49	2	1	6616	13,7	14,4	12,9		13,0	6621		10,5	11,0		
50			6688	14,3		13,2			6694		11,1			
51			6680	15,1		13,0			6686		11,5			
202	2	1	6639	14,6	14,5	13,9		13,8	6637		13,1	12,8		
203			6616	14,4		13,6			6615		12,4			
(1)			(1)	(1)		(1)			(1)		(1)			
76	2	1	6571	12,9	13,3	11,6		12,0	6572		11,8	11,4		
77			6542	14,0		11,7			6542		11,1			
78			6634	13,0		12,8			6634		11,2			
1	3	0	6642	14,5	14,1	14,0		-	-		6640	10,3	11,8	
2			6606	13,6				-			6608	11,4		
3			6646	14,2				-			6640	11,9		
28	3	0	6601	13,8	13,4		-	-		6602	11,2	11,4		
29			6618	12,7			-			6619	11,4			
30			6619	13,6			-			6621	11,5			
200	3	0	6726	14,9	14,8		-	-		6728	12,5	12,4		
201			6708	14,6			-			6776	12,3			
(1)			(1)	(1)			(1)			(1)	(1)			
73	3	0	6706	13,7	13,8		-	-		6708	12,2	12,2		
74			6733	13,8			-			6730	12,1			
75			6701	13,9			-			6749	12,3			

(1) Provetes realizados, mas não contabilizados devido aos resultados aberrantes obtidos.

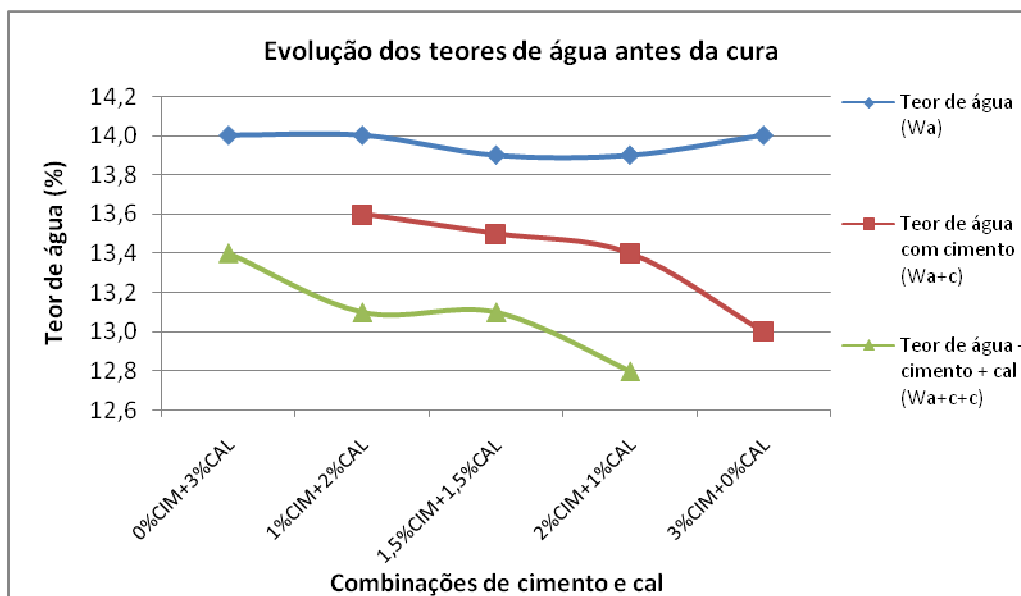


Figura 52 - Gráfico indicativo da evolução dos teores em água.

De acordo com a análise da figura 52, pode-se verificar que o teor em água (W_a) diminui após adição de cimento (W_{a+c}), assim como após o acréscimo de cal (W_{a+c+c}), devido às reacções químicas dos ligantes hidráulicos em contacto com a água.

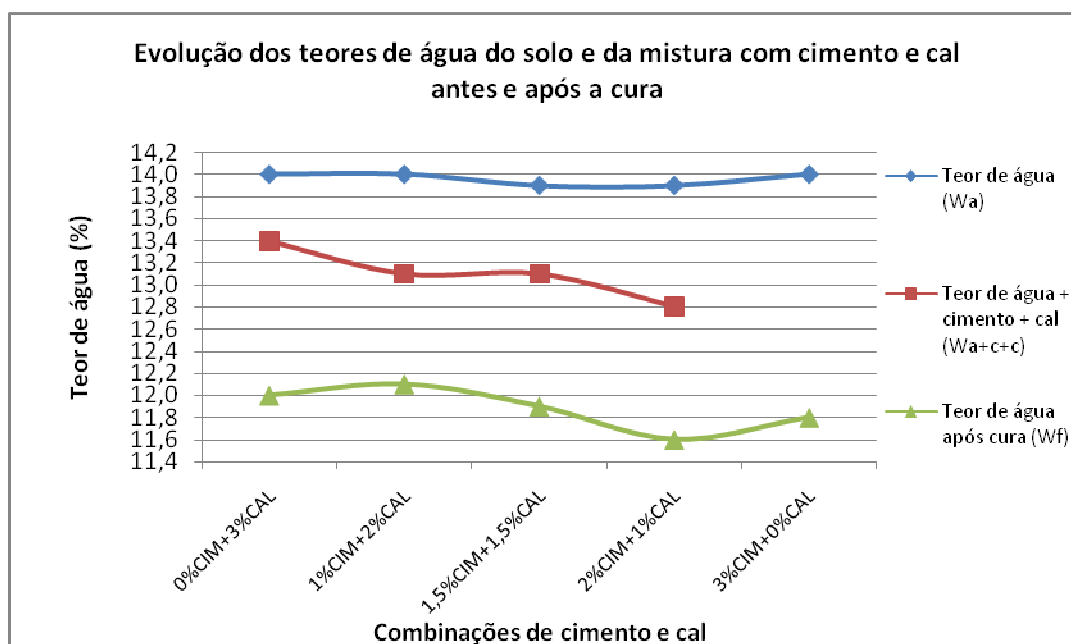


Figura 53 - Evolução dos teores em água antes e após cura.

Analisando a figura 53, constata-se que os teores de água após adição de cal e cimento (W_{a+c+c}) diminuem em comparação com o teor de água do solo (W_a), cujo comportamento após a cura (W_f) mantém a mesma tendência. Este último teor em água tem ligeiras variações que poderão ser explicadas pelo modo como alguns dos provetes podem ter sido impermeabilizados aquando da cura na câmara húmida.

No quadro 25, encontra-se presente a variação da baridade máxima antes e após a cura.

Quadro 25 - Baridade máxima antes e após a cura.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura			Após cura			
			Peso do Provete	γ_d inicial (g/cm ³)	γ_d inicial Média	Peso do Provete	γ_d final (g/cm ³)	γ_d final média	
70	0	3	6636	1,812	1,818	1,820	6634	1,839	1,839
71			6637	1,823			6636	1,842	
72			6618	1,820			6616	1,835	
58	0	3	6683	1,807	1,814		6686	1,866	1,865
59			6720	1,824			6732	1,865	
60			6686	1,811			6690	1,864	
100	0	3	6658	1,826	1,827		6656	1,828	1,829
101			6688	1,827			6684	1,830	
(1)			(1)	(1)			(1)		
85	0	3	6683	1,827	1,823		6683	1,865	1,836
86			6653	1,819		6653	1,814		
87			6658	1,823		6658	1,828		
67	1	2	6553	1,809	1,818	6553	1,841	1,850	
68			6647	1,832		6647	1,846		
69			6688	1,844		6687	1,862		
55	1	2	6700	1,819		1,825	6702	1,841	1,836
56			6697	1,821			6698	1,838	
57			6678	1,835			6680	1,83	
206	1	2	6561	1,795		1,798	6561	1,825	1,834
208			6588	1,800			6587	1,822	
(1)			(1)	(1)			(1)		
82	1	2	6645	1,817		1,821	6645	1,832	1,828
83			6660	1,824	6660		1,824		
84			6671	1,821	6672		1,828		
64	1,5	1,5	6566	1,799	1,817	6566	1,830	1,837	
65			6630	1,819		6630	1,846		
66			6451	1,772		6450	1,787		
52	1,5	1,5	6653	1,821		1,836	6659	1,842	1,857
53			6728	1,840			6742	1,858	
54			6761	1,848			6767	1,870	
204	1,5	1,5	6562	1,791		1,806	6562	1,819	1,827
205			6660	1,820			6660	1,835	
(1)			(1)	(1)			(1)		
79	1,5	1,5	6676	1,836		1,830	6676	1,836	1,844
80			6668	1,820	6667		1,846		
81			6697	1,833	6697		1,849		
61	2	1	6663	1,836	1,821	6662	1,858	1,852	
62			6653	1,831		6654	1,848		
63			6683	1,838		6680	1,851		
49	2	1	6616	1,815		1,825	6621	1,855	1,859
50			6688	1,829			6694	1,865	
51			6680	1,830			6686	1,857	
202	2	1	6639	1,804		1,804	6637	1,818	1,820
203			6616	1,803			6615	1,822	
(1)			(1)	(1)			(1)		
76	2	1	6571	1,822		1,819	6572	1,820	1,830
77			6542	1,814	6542		1,823		
78			6634	1,821	6634		1,846		
1	3	0	6642	1,824	1,828	6640	1,864	1,850	
2			6606	1,811		6608	1,836		
3			6646	1,816		6640	1,837		
28	3	0	6601	1,826		1,824	6602	1,838	1,836
29			6618	1,824			6619	1,839	
30			6619	1,821			6621	1,831	
200	3	0	6726	1,827		1,826	6728	1,852	1,860
201			6708	1,824			6776	1,868	
(1)			(1)	(1)			(1)		
73	3	0	6706	1,845		1,844	6708	1,851	1,856
74			6733	1,858	6730		1,858		
75			6701	1,830	6749		1,860		

(1) Provetes realizados, mas não contabilizados devido aos resultados aberrantes obtidos.

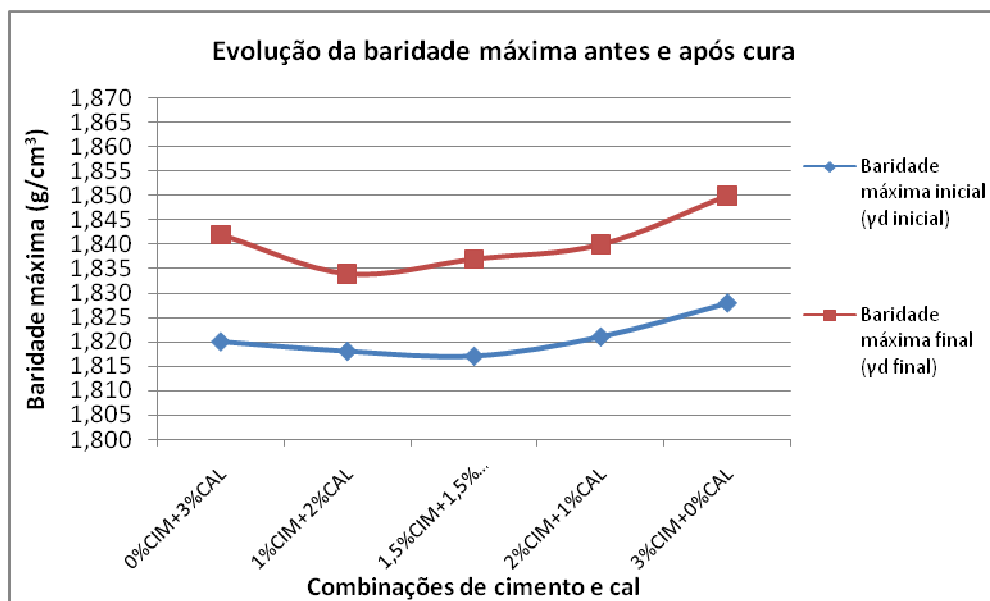


Figura 54 - Evolução da baridade máxima antes e após a cura.

Na análise da figura 54, constata-se que a baridade máxima, antes ($\gamma_{d \text{ inicial}}$) e após a cura ($\gamma_{d \text{ final}}$), diminui à medida que é acrescentado cimento à mistura e consequentemente diminuição da percentagem de cal, até ao ponto de equilíbrio das percentagens, 1,5% de cimento e 1,5 % de cal, começando a aumentar a partir desse ponto até à combinação de 3% de cimento e 0% de cal. Após a cura os teores de humidade baixam, originando a consequente diminuição da baridade máxima.

Quadro 26 - Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Compressão simples 7 dias				Compressão simples 28 dias		
			Peso do Provette	Carga (KN)	$\sigma_{cd,7}$ (MPa)	$\sigma_{cd,7}$	Carga (KN)	$\sigma_{cs,28}$ (MPa)	$\sigma_{cs,28}$
100	0	3	6656	21,5	1,20	1,25	-		
101			6684	23,0	1,30				
(1)			(1)	(1)	(1)				
85	0	3	6683	-			49,2	2,70	2,67
86			6653	46,5	2,60				
87			6658	48,9	2,70				
206	1	2	6561	34,6	1,90	1,85	-		
208			6587	32,7	1,80				
(1)			(1)	(1)	(1)				
82	1	2	6645	-			52,5	2,90	2,87
83			6660	52,3	2,90				
84			6672	51,6	2,80				
204	1,5	1,5	6562	38,3	2,10	2,00	-		
205			6660	34,4	1,90				
(1)			(1)	(1)	(1)				
79	1,5	1,5	6676	-			51,8	2,90	2,90
80			6667	52,6	2,90				
81			6697	52,6	2,90				
202	2	1	6637	30,2	1,70	1,70	-		
203			6615	31,0	1,70				
(1)			(1)	(1)	(1)				
76	2	1	6572	-			50,5	2,80	2,77
77			6542	49,9	2,70				
78			6634	51,4	2,80				
200	3	0	6728	27,4	1,50	1,45	-		
201			6776	26,3	1,40				
(1)			(1)	(1)	(1)				
73	3	0	6708	-			42,4	2,30	2,27
74			6730	40,2	2,20				
75			6749	41,5	2,30				

(1) Provetes realizados, mas não contabilizados devido aos resultados aberrantes obtidos.

No quadro 26, pode-se verificar os valores da resistência à compressão simples obtidos, nos ensaios aos 7 dias e aos 28 dias.

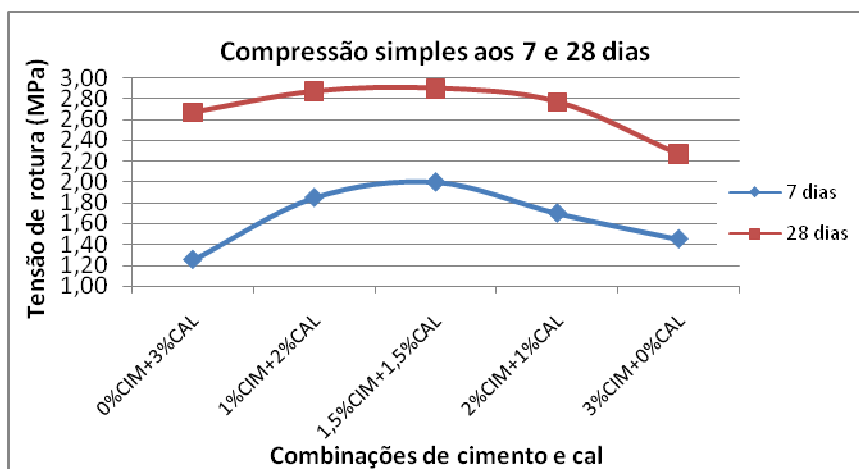


Figura 55 - Variação das tensões de rotura aos 7 e 28 dias.

Pela análise da figura 55, observa-se uma crescente tensão de rotura dos provetes ensaiados à compressão simples, aos 7 e aos 28 dias, até à combinação de percentagens iguais de ligantes hidráulicos (1,5% de cimento e 1,5% de cal), começando a partir dessa combinação a diminuir o valor da tensão de rotura à medida que é acrescentado mais cimento e diminuída a percentagem de cal.

No quadro 27, pode-se observar os valores da resistência à compressão diametral ensaiados aos 7 e aos 28 dias.

Quadro 27 - Resistência à compressão diametral aos 7 e 28 dias.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Compressão diametral 7 dias				Compressão diametral 28 dias		
			Peso do Provete	Carga (KN)	$\sigma_{cd,7}$ (Mpa)	$\sigma_{cd,7}$	Carga (KN)	$\sigma_{cd,28}$ (Mpa)	$\sigma_{cs,28}$
70	0	3	6634	10,41	0,60	0,63	-		
71			6636	12,01	0,70				
72			6616	10,67	0,60				
58	0	3	6686	-			15,50	0,90	0,90
59			6732	-			15,80	0,90	
60			6690	-			15,60	0,90	
67	1	2	6553	14,00	0,80	0,77	-		
68			6647	12,70	0,70				
69			6687	14,20	0,80				
55	1	2	6702	-			17,40	1,00	1,00
56			6698	-			15,60	0,90	
57			6680	-			20,60	1,10	
64	1,5	1,5	6566	14,80	0,80	0,83	-		
65			6630	16,00	0,90				
66			6450	15,04	0,80				
52	1,5	1,5	6659	-			18,30	1,00	1,03
53			6742	-			18,00	1,00	
54			6767	-			20,10	1,10	
61	2	1	6662	15,40	0,80	0,80	-		
62			6654	16,10	0,90				
63			6680	13,50	0,70				
49	2	1	6621	-			18,80	1,00	0,97
50			6694	-			17,80	1,00	
51			6686	-			17,10	0,90	
1	3	0	6640	13,70	0,70	0,70	-		
2			6608	12,80	0,70				
3			6640	13,20	0,70				
28	3	0	6602	-			15,68	0,90	0,90
29			6619	-			16,52	0,90	
30			6621	-			15,45	0,90	

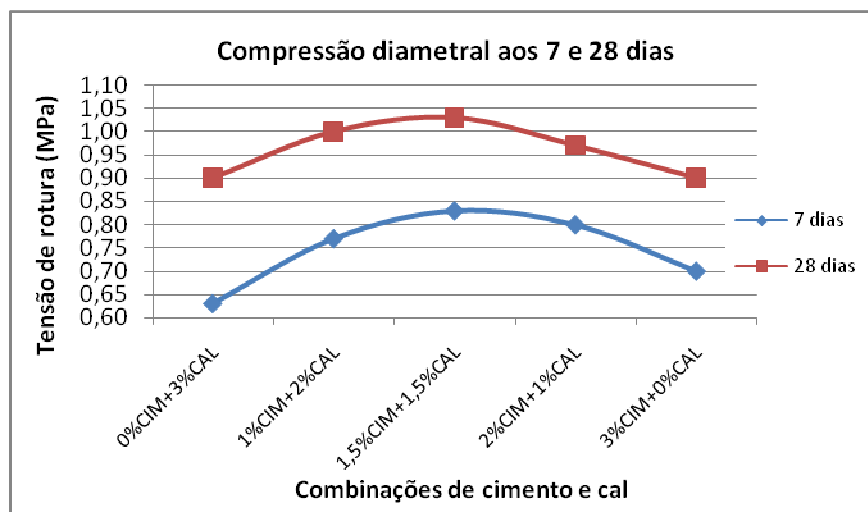


Figura 56 - Variação das tensões de rotura aos 7 e 28 dias.

Analisando a figura 56, observa-se que a tensão de rotura relativamente ao ensaio de resistência à compressão diametral, aos 7 e aos 28 dias, segue os mesmos princípios da resistência à compressão simples no mesmo período, ou seja, há um aumento do valor da tensão de rotura conforme se diminui a percentagem de cal, até chegar ao ponto de equilíbrio da combinação entre a cal e o cimento, começando a partir daí a diminuir o valor da tensão de rotura, com o aumento da percentagem de cimento.

No quadro 28, estão registados os valores obtidos nos ensaios referentes à tensão de rotura, à resistência à tracção e ao módulo secante, realizados na prensa PCDIAM.

Quadro 28 - Valores da tensão de rotura, resistência à tracção e módulo secante.

n.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Tempo de Cura (dias)	Tensão de Rotura (Mpa)	Média	Resistência à Tracção R_{tb} (Mpa)	Média	Módulo Secante E_{tb} (Mpa)	Média
13	0	3	7	0,2	0,20	0,125	0,120	213,89	206,61
14				0,2		0,111		192,06	
15				0,2		0,125		213,89	
17	0	3	28	0,5	0,50	0,265	0,234	302,64	432,62
18				0,4		0,214		488,88	
19				0,6		0,222		506,34	
10	1	2	7	0,4	0,40	0,194	0,190	331,74	325,92
11				0,4		0,181		309,92	
12				0,4		0,196		336,11	
13	1	2	28	0,6	0,57	0,255	0,268	498,86	501,77
14				0,5		0,260		508,83	
15				0,6		0,290		497,61	
7	1,5	1,5	7	0,4	0,43	0,206	0,220	314,28	350,17
8				0,4		0,214		325,92	
9				0,5		0,239		410,31	
9	1,5	1,5	28	0,6	0,57	0,290	0,275	497,61	518,47
10				0,6		0,288		493,25	
11				0,5		0,247		564,54	
4	2	1	7	0,5	0,45	0,251	0,248	345,71	339,89
5				0,4		0,260		356,18	
6				0,5		0,232		317,77	
5	2	1	28	0,6	0,57	0,235	0,262	480,39	475,27
6				0,6		0,293		474,54	
7				0,5		0,257		470,87	
1	3	0	7	0,4	0,33	0,188	0,175	184,58	159,17
2				0,3		0,160		157,14	
3				0,3		0,178		135,80	
1	3	0	28	0,6	0,47	0,278	0,254	365,99	373,75
2				0,4		0,255		406,05	
3				0,4		0,229		349,20	

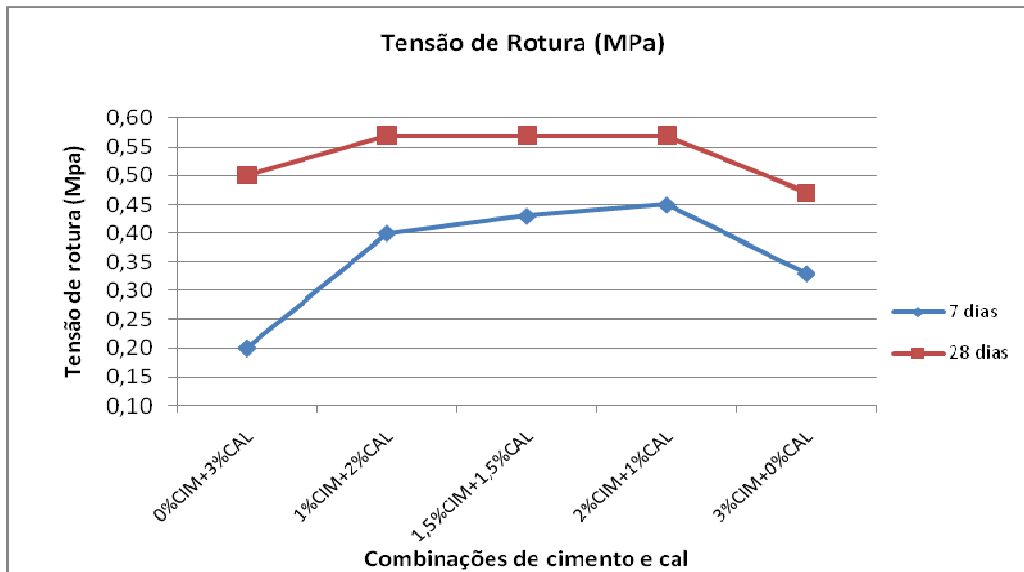


Figura 57 - Tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.

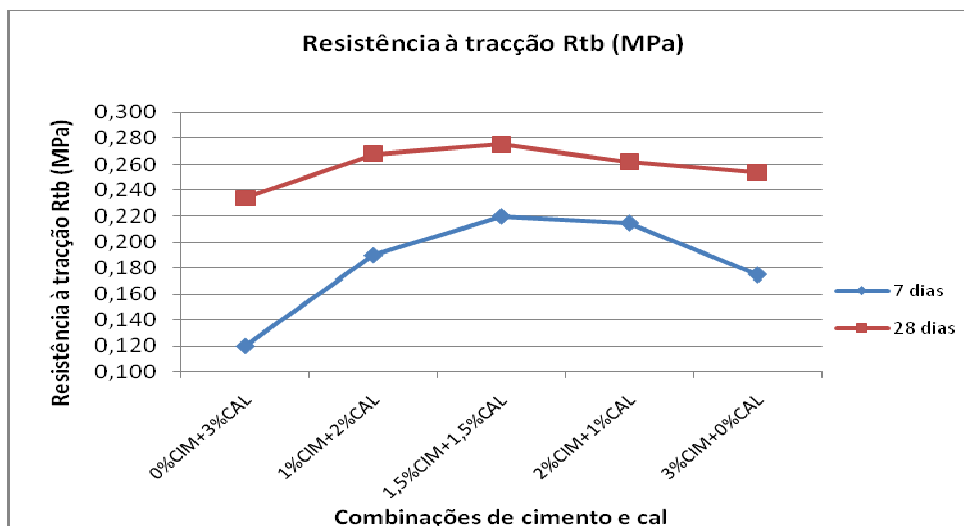


Figura 58 - Resistência à tracção, aos 7 e 28 dias.

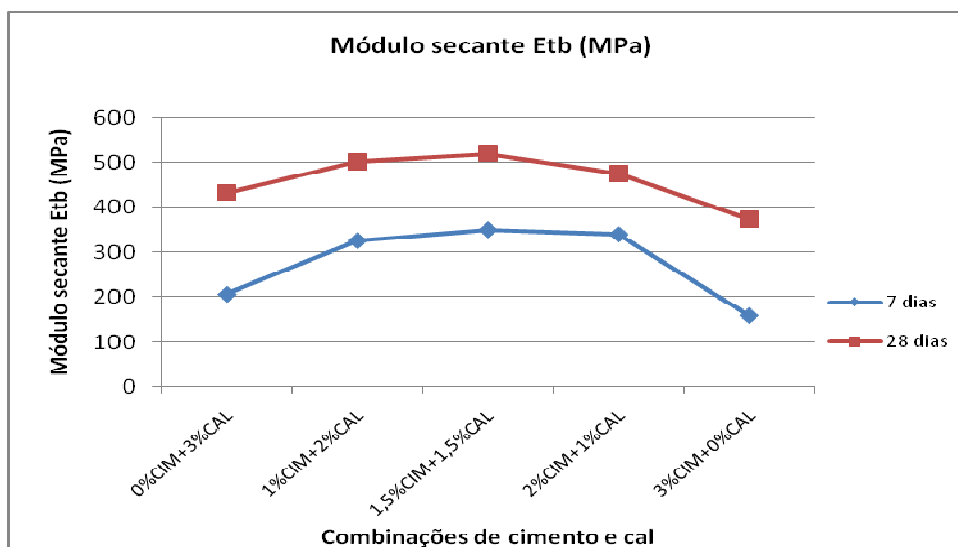


Figura 59 - Módulo secante, aos 7 e 28 dias.

De acordo com a análise das figuras 57, 58 e 59, constata-se que os valores da tensão de rotura, da resistência à tracção e do módulo secante seguem a mesma linha de ideias apresentada nos ensaios de resistência à compressão simples e diametral, onde os valores obtidos têm um acréscimo desde a combinação de 0% de cimento e 3% de cal até 1,5% de cimento e 1,5% de cal, começando a decrescer os valores da tensão de rotura, resistência à tracção e módulo secante, com o aumento de cimento e conseqüente diminuição da quantidade de cal.

No quadro 29, observam-se os valores obtidos dos ensaios da análise de granulometria, equivalente de areia e azul-de-metileno, após a realização das misturas.

Quadro 29- Caracterização do solo após mistura com os ligantes hidráulicos.

Cimento (%)	Cal (%)	Peneiro			Equivalente Areia (%)	Azul Metileno (g/100g _{solo})
		abertura	(mm)	% passados		
0	0	3/4"	19	100,0	13	3,66
		3/8"	9,5	98,0		
		nº4	4,75	93,6		
		nº10	2	89,0		
		nº20	0,85	82,7		
		nº40	0,425	78,4		
		nº60	0,25	74,7		
		nº140	0,106	63,5		
3	0	nº200	0,075	57,9	37	2,06
		3/8"	9,5	100,0		
		nº4	4,75	99,1		
		nº10	2	79,9		
		nº20	0,85	63,4		
		nº40	0,425	53,9		
		nº60	0,25	47,1		
		nº140	0,106	35,6		
2	1	nº200	0,075	31,4	61	1,81
		3/8"	9,5	100,0		
		nº4	4,75	98,0		
		nº10	2	81,2		
		nº20	0,85	59,1		
		nº40	0,425	49,3		
		nº60	0,25	43,5		
		nº140	0,106	34,6		
1,5	1,5	nº200	0,075	31,6	64	1,64
		3/8"	9,5	100,0		
		nº4	4,75	98,3		
		nº10	2	73,5		
		nº20	0,85	57,1		
		nº40	0,425	49,1		
		nº60	0,25	43,9		
		nº140	0,106	35,1		
1	2	nº200	0,075	32,2	63	1,74
		3/8"	9,5	100,0		
		nº4	4,75	99,4		
		nº10	2	79,0		
		nº20	0,85	60,1		
		nº40	0,425	52,0		
		nº60	0,25	47,0		
		nº140	0,106	38,3		
0	3	nº200	0,075	35,3	69	1,70
		3/8"	9,5	100,0		
		nº4	4,75	98,4		
		nº10	2	73,3		
		nº20	0,85	49,2		
		nº40	0,425	38,2		
		nº60	0,25	31,9		
		nº140	0,106	23,8		
		nº200	0,075	21,4		

Na figura 60, estão representadas as diferentes curvas granulométricas com e sem adição de cal e cimento, constatando-se que após o tratamento com os ligantes hidráulicos, as curvas mantêm-se semelhantes, diferindo da curva granulométrica do solo inicial sem tratamento, o que demonstra o efeito que os ligantes hidráulicos conferem ao solo, aumentando a dimensão da granulometria.

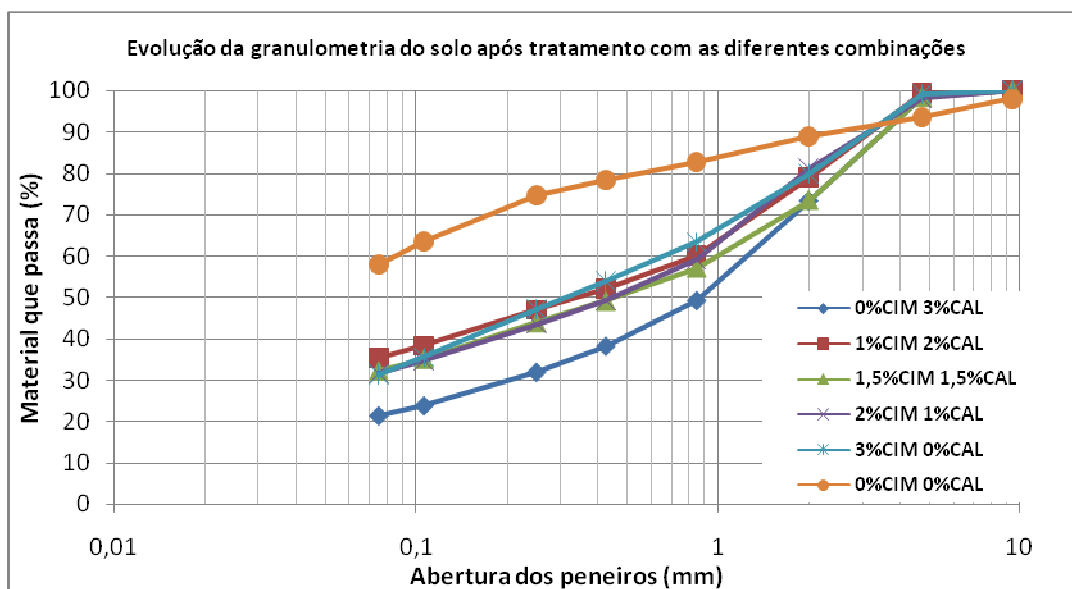


Figura 60 - Análise granulométrica do solo com e sem mistura de cimento e cal.

Na figura 61, está representado o valor do equivalente de areia relativo às diferentes combinações, de cimento e cal, utilizadas no tratamento do solo. Comparando esses valores com o equivalente de areia do solo sem tratamento (0% de cimento e 0% de cal), verifica-se um valor mais elevado após o tratamento e ligeiramente constante ao longo das diferentes adições de ligantes hidráulicos, à excepção da mistura constituída apenas por solo e cimento (3% de cimento e 0% de cal), cujo valor se encontra num patamar intermédio entre o equivalente de areia do solo simples e das restantes combinações contendo cal.

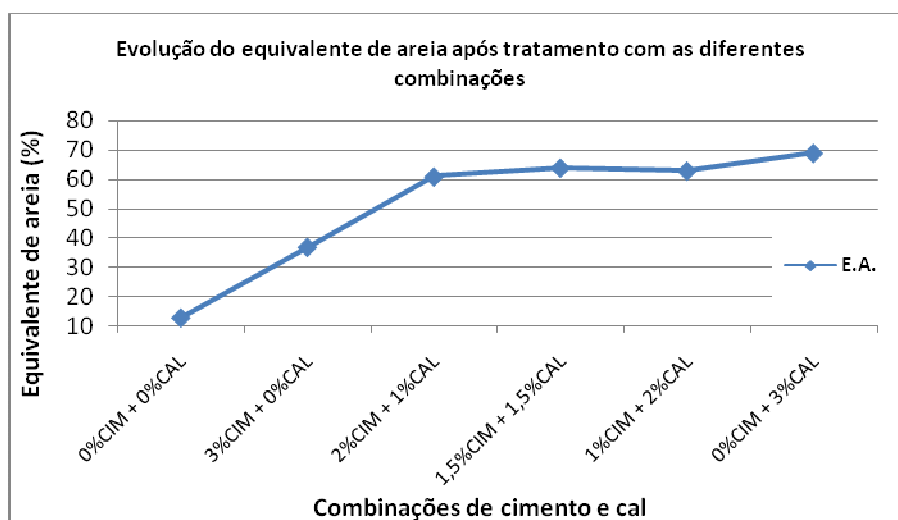


Figura 61 - Variação do equivalente de areia consoante as combinações dos ligantes hidráulicos.

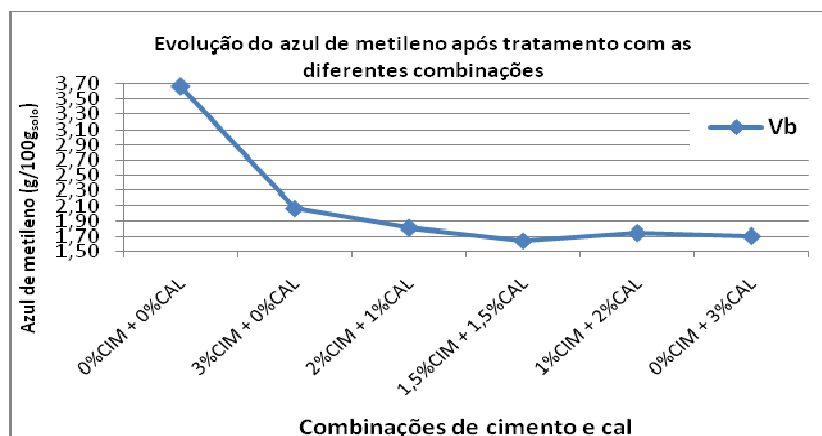


Figura 62 - Variação do valor de azul-de-metileno com as diferentes combinações de ligantes hidráulicos.

Na figura 62, constata-se a evolução do valor do azul-de-metileno, diminuindo o seu valor com alguma relevância após tratamento com os ligantes hidráulicos, mantendo-se relativamente constante com os acréscimos de cal à mistura. À semelhança dos valores obtidos no equivalente de areia, a combinação de solo apenas com cimento atinge um valor intermédio entre o solo antes do tratamento e as restantes combinações de cal e cimento.

No quadro 30 apresentam-se os valores obtidos relativamente ao ensaio de pH das misturas.

Quadro 30 - Resultados de ensaio ao pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo plástico).

Ensaio aos 0 dias				
N.º Provete	Combinação	Massa (g)	Temperatura (°C)	PH
11	3%CIM + 0%CAL	11,60	19,8	11,546
12	2%CIM + 1%CAL	11,30	19,9	12,089
13	1,5%CIM + 1,5%CAL	11,30	20,0	12,183
14	1%CIM + 2%CAL	11,30	20,0	12,368
15	0%CIM + 3%CAL	11,30	20,1	12,489

Ensaio aos 7 dias				
N.º Provete	Combinação	Massa (g)	temperatura (°C)	PH
20	3%CIM + 0%CAL	10,11	20,0	9,987
19	2%CIM + 1%CAL	10,33	19,8	10,327
18	1,5%CIM + 1,5%CAL	10,16	19,9	10,203
17	1%CIM + 2%CAL	10,00	19,2	10,349
16	0%CIM + 3%CAL	10,25	19,2	9,543

Ensaio aos 28 dias				
N.º Provete	Combinação	Massa (g)	temperatura (°C)	PH
2	3%CIM + 0%CAL	10,09	20,2	10,582
5	2%CIM + 1%CAL	10,05	20,1	10,725
4	1,5%CIM + 1,5%CAL	10,00	20,2	10,317
1	1%CIM + 2%CAL	10,14	20,3	10,639

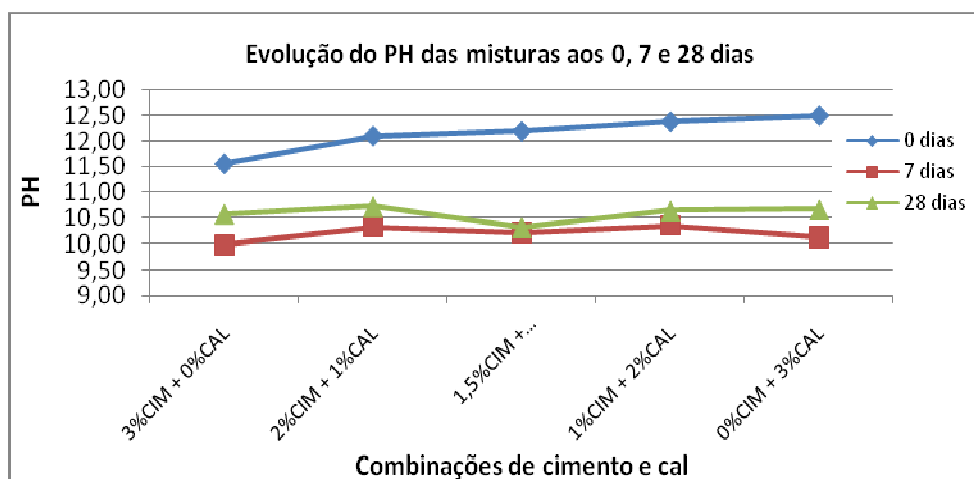


Figura 63 - Evolução do pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo plástico).

Na figura 63 demonstra-se a evolução do pH das misturas de cimento e cal com o solo a tratar, observando-se que o pH inicial logo após mistura (0 dias) é significativamente maior comparativamente com o valor aos 7 e 28 dias das mesmas misturas. Constata-se também que a evolução do pH inicial tende a subir com o aumento da percentagem de cal e consequente diminuição de cimento. Aos 7 dias, o valor do pH é o mais baixo em relação às 3 datas analisadas (0, 7 e 28 dias), mantendo-se relativamente constante ao longo das várias combinações de cal e cimento. Relativamente ao ensaio aos 28 dias, nota-se um ligeiro aumento do valor do pH em relação ao valor obtido aos 7 dias e com tendência a aproximar-se do pH inicial (0 dias), mantendo-se também constante ao longo das diferentes percentagens.

7.2 Solo não plástico

Após a realização dos ensaios de caracterização do solo não plástico, proveniente da obra da Subconcessão do Douro Interior – Lote 6 (lote 6.2 - solução Norte), localizada na ligação IC5 Murça (IP4) /Nó de Pombal, distrito de Vila Real e recolhido na cota PK18+725, cujos resultados se encontram apresentados no quadro 31, permitiu classificar-se o solo, segundo as normas Unificada e AASTHO, como areia bem graduada com silte (SW-SM) / A-1-b(0).

Quadro 31 - Características do solo não plástico.

Ensaio	Norma	Resultados	
Análise Granulométrica	LNEC E 239	P#3/4''	100.0 %
		P#3/8''	95.8 %
		P#nº4	93.6 %
		P#nº10	64.0 %
		P#nº20	45.1 %
		P#nº40	33.3 %
		P#nº60	25.2 %
		P#nº140	14.7 %
		P#nº200	11.3 %
Equivalente de Areia	LNEC E 199	53 %	
Limites de Consistência	NP-143	Limite de Liquidez	NP
		Limite de Plasticidade	NP
		Índice de Plasticidade	NP
Compactação Proctor	LNEC E 197	Y _{d máx}	1.963 g/cm ³
		W _{opt}	9.5 %
CBR	LNEC E 199	CBR % (95% CR) = 26 (2.5mm)	
		CBR % (95% CR) = 28 (5.0mm)	
		Expansão % (95% CR) = 0	
Ensaio de Azul-de-metileno	NF P 94-068	0.33 g/100g _{solo}	

No quadro 32, estão presentes os diferentes teores em água do solo tratado com ligantes hidráulicos, isto é, teor de água (W_a), teor de água com cimento (W_{a+c}) e teor de água com cimento e cal (W_{a+c+c}).

Quadro 32 - Teores em água do solo tratado com ligantes hidráulicos.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura											
			Peso do Provelte	w_a (%)		Média	W_{a+c} (%)		Média	W_{a+c+c} (%)		Média		
112	0	4	6508	9,2	9,1	9,2	-	-	-	8,1	8,1	8,1		
113			6674	9,1			-			8,2				
114			6676	9,0			-			7,9				
46	0	4	6609	8,7	8,9		-	-		-	8,1		8,1	
47			6592	9,3			-			8,0				
48			6648	8,6			-			8,1				
115	0	4	6607	9,6	9,5		-	-		-	7,9		8,1	
116			6565	9,4			-			8,2				
117			6612	9,4			-			8,2				
31	0	4	6607	9,3	9,4		-	-		-	8,1		8,1	
32			6565	9,5		-	8,1							
33			6612	9,4		-	8,1							
106	1	3	6645	9,0	9,3	9,3	9,1	9,1	9,1	8,1	8,2	8,2		
107			6663	9,3			9,1			8,2				
108			6684	9,5			9,2			8,3				
43	1	3	6551	9,5	9,4		9,3	9,1		9,1	8,1		8,2	
44			6478	9,5			9,0				8,2			
45			6534	9,3			9,1				8,2			
109	1	3	6698	9,3	9,2		9,0	8,8			8,8		8,3	8,3
110			6617	9,2			8,8						8,2	
111			6696	9,0			8,7						8,3	
28	1	3	6689	9,4	9,3		9,2	9,1					9,1	8,2
29			6629	9,3		9,1	8,0							
30			6613	9,3		9,0	8,2							
100	2	2	6681	9,2	9,1	9,3	8,9	9,0	9,0			8,4		8,5
101			6719	9,1			9,1			8,6				
102			6611	9,1			8,9			8,4				
40	2	2	6556	9,2	9,3		9,0			9,0		9,0		8,3
41			6420	9,4			9,1				8,4			
42			6617	9,3			9,0				8,3			
103	2	2	6641	9,1	9,5		8,8			8,9	8,9			8,6
104			6710	9,7			8,9						8,4	
105			6789	9,6			9,0						8,6	
25	2	2	6678	9,5	9,4		9,0			9,0			9,0	8,3
26			6717	9,2		9,0	8,4							
27			6700	9,4		9,1	8,5							
94	3	1	6592	9,4	9,3	9,3	9,0	9,0	9,0	8,4				8,5
95			6532	9,4			8,9			8,6				
96			6762	9,2			9,0			8,4				
37	3	1	6694	9,1	9,1		9,1			8,9		8,9		8,6
38			6608	9,1			8,7				8,6			
39			6637	9,2			8,8				8,6			
97	3	1	6663	9,4	9,4		8,9			8,9	8,9			8,4
98			6725	9,4			8,9						8,5	
99			6744	9,5			8,9						8,5	
22	3	1	6618	9,3	9,3		9,0			9,0			9,0	8,6
23			6677	9,3		8,9	8,6							
24			6699	9,3		9,0	8,7							
88	4	0	6790	9,4	9,4	9,4	9,0	9,1	9,1	-				-
89			6772	9,4			9,1			-				
90			6708	9,3			9,1			-				
34	4	0	6705	9,2	9,2		8,9			8,8		8,9		-
35			6774	9,3			8,8				-			
36			6722	9,2			8,8				-			
91	4	0	6806	9,2	9,4		8,9			8,9	8,9			-
92			6806	9,4			8,9						-	
93			6826	9,6			9,0						-	
19	4	0	6721	9,6	9,5		8,7			8,8			8,8	-
20			6649	9,6		8,8	-							
21			6663	9,3		8,8	-							

No quadro 33 estão presentes os diferentes teores de água do solo tratado com ligantes hidráulicos, isto é, teor de água (W_a), teor de água com cimento e cal (W_{a+c+c}), antes e após a cura.

Quadro 33 - Evolução dos teores em água, antes e após a cura.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura					Após cura					
			Peso do Provete	w_a (%)	Média	w_{a+c+c} (%)	Média	Peso do Provete	w_r (%)	Média			
112	0	4	6508	9,2	9,1	9,2	8,1	8,1	8,1	6509	6,3	6,8	6,5
113			6674	9,1			8,2			6675	7,0		
114			6676	9,0			7,9			6677	7,0		
46	0	4	6609	8,7	8,9	9,2	8,1	8,1	8,1	6609	6,3	6,5	6,5
47			6592	9,3			8,0			6593	6,5		
48			6648	8,6			8,1			6647	6,6		
115	0	4	6607	9,6	9,5	9,2	7,9	8,1	8,1	6714	6,7	6,5	6,5
116			6565	9,4			8,2			6728	6,4		
117			6612	9,4			8,2			6635	6,5		
31	0	4	6607	9,3	9,4	9,2	8,1	8,1	8,1	6609	6,2	6,4	6,5
32			6565	9,5			8,1			6567	6,6		
33			6612	9,4			8,1			6611	6,4		
106	1	3	6645	9,0	9,3	9,3	8,1	8,2	8,2	6646	6,9	6,9	6,8
107			6663	9,3			8,2			6663	6,9		
108			6684	9,5			8,3			6684	7,0		
43	1	3	6551	9,5	9,4	9,3	8,1	8,2	8,2	6551	6,8	6,6	6,8
44			6478	9,5			8,2			6478	6,4		
45			6534	9,3			8,2			6534	6,6		
109	1	3	6698	9,3	9,2	9,3	8,3	8,3	8,2	6699	6,3	6,6	6,8
110			6617	9,2			8,2			6618	6,6		
111			6696	9,0			8,3			6697	7,0		
28	1	3	6689	9,4	9,3	9,3	8,2	8,1	8,2	6724	7,5	6,9	6,8
29			6629	9,3			8,0			6630	6,8		
30			6613	9,3			8,2			6614	6,5		
100	2	2	6681	9,2	9,1	9,3	8,4	8,5	8,4	6679	6,8	7,0	7,0
101			6719	9,1			8,6			6717	7,0		
102			6611	9,1			8,4			6611	7,2		
40	2	2	6556	9,2	9,3	9,3	8,3	8,3	8,4	6555	6,6	6,6	7,0
41			6420	9,4			8,4			6420	6,5		
42			6617	9,3			8,3			6619	6,6		
103	2	2	6641	9,1	9,5	9,3	8,6	8,5	8,4	6642	7,1	7,3	7,0
104			6710	9,7			8,4			6710	7,3		
105			6789	9,6			8,6			6788	7,4		
25	2	2	6678	9,5	9,4	9,3	8,3	8,4	8,5	6680	6,9	7,0	7,1
26			6717	9,2			8,4			6717	7,2		
27			6700	9,4			8,5			6700	7,0		
94	3	1	6592	9,4	9,3	9,3	8,4	8,5	8,5	6592	6,8	7,2	7,1
95			6532	9,4			8,6			6532	7,3		
96			6762	9,2			8,4			6762	7,4		
37	3	1	6694	9,1	9,1	9,3	8,6	8,6	8,5	6692	6,8	6,8	7,1
38			6608	9,1			8,6			6607	6,9		
39			6637	9,2			8,6			6635	6,6		
97	3	1	6663	9,4	9,4	9,3	8,4	8,5	8,5	6663	6,6	7,3	7,1
98			6725	9,4			8,5			6726	7,7		
99			6744	9,5			8,5			6745	7,7		
22	3	1	6618	9,3	9,3	9,3	8,6	8,6	8,5	6617	7,2	7,1	7,4
23			6677	9,3			8,6			6677	6,9		
24			6699	9,3			8,7			6699	7,2		
88	4	0	6790	9,4	9,4	9,4	-	-	-	6790	7,6	7,6	7,4
89			6772	9,4			-			6773	7,5		
90			6708	9,3			-			6710	7,7		
34	4	0	6705	9,2	9,2	9,4	-	-	-	6705	7,3	7,1	7,4
35			6774	9,3			-			6774	7,1		
36			6722	9,2			-			6723	6,8		
91	4	0	6806	9,2	9,4	9,4	-	-	-	6806	7,7	7,6	7,4
92			6806	9,4			-			6806	7,7		
93			6826	9,6			-			6826	7,3		
19	4	0	6721	9,6	9,5	9,4	-	-	-	6723	7,2	7,4	7,4
20			6649	9,6			-			6648	7,6		
21			6663	9,3			-			6663	7,3		

Na figura 64, pode-se verificar a evolução dos diferentes teores em água antes da cura: teor de água do solo sem ligantes hidráulicos; teor de água do solo com cimento; e teor de água do solo com cimento e com cal.

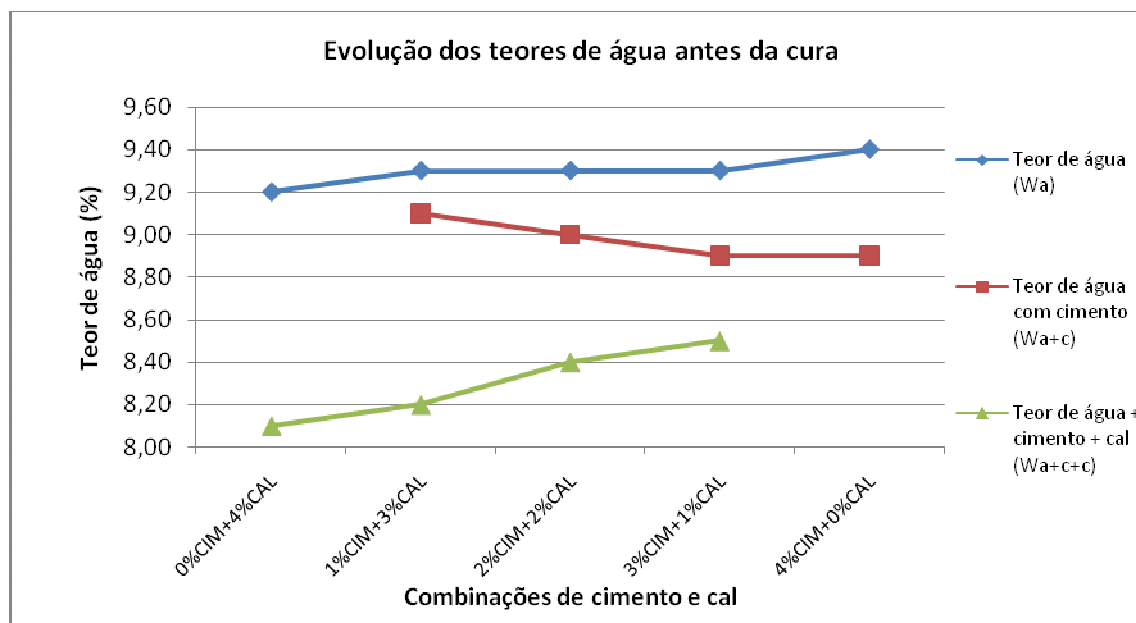


Figura 64 - Evolução dos teores em água antes da cura.

Na figura 65, pode-se verificar a evolução dos diferentes teores em água antes e após a cura: teor de água do solo, antes da cura (W_a), sem ligantes hidráulicos e teor de água do solo com cimento e com cal, antes da cura (W_{a+c+c}) e após cura (W_f). Verifica-se que os teores de humidade aumentam consoante a diminuição da percentagem adicionada de cal ao solo a tratar.

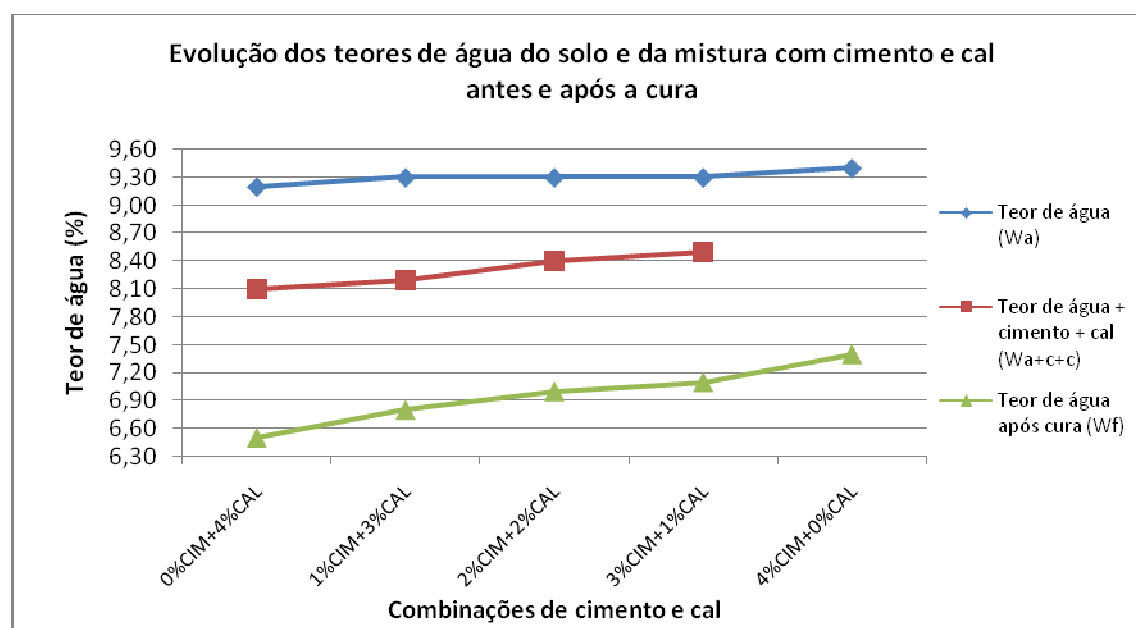


Figura 65 - Evolução do teor em água antes e após a cura.

No quadro 34, encontra-se presente a variação da baridade máxima antes (γ_d inicial) e após a cura (γ_d final).

Quadro 34 - Baridade máxima antes e após a cura.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Antes da cura			Após cura					
			Peso do Provete	γ_d inicial (g/cm ³)		γ_d inicial Média	Peso do Provete	γ_d final (g/cm ³)		γ_d final média	
112	0	4	6508	1,864		1,896	1,892	6509	1,895		1,919
113			6674	1,910				6675	1,931		
114			6676	1,915				6677	1,932		
46	0	4	6609	1,893		1,896	1,892	6609	1,924		1,927
47			6592	1,889				6593	1,917		
48			6648	1,905				6647	1,931		
115	0	4	6607	1,896		1,889	1,892	6714	1,949		1,945
116			6565	1,878				6728	1,958		
117			6612	1,892				6635	1,928		
31	0	4	6607	1,893		1,889	1,896	6609	1,926		1,919
32			6565	1,880				6567	1,907		
33			6612	1,893				6611	1,924		
106	1	3	6645	1,904		1,907	1,896	6646	1,925		1,919
107			6663	1,907				6663	1,929		
108			6684	1,910				6684	1,934		
43	1	3	6551	1,875		1,866	1,899	6551	1,899		1,919
44			6478	1,854				6478	1,885		
45			6534	1,870				6534	1,898		
109	1	3	6698	1,914		1,907	1,896	6699	1,951		1,937
110			6617	1,893				6618	1,922		
111			6696	1,914				6697	1,938		
28	1	3	6689	1,915		1,902	1,899	6724	1,937		1,917
29			6629	1,901				6630	1,922		
30			6613	1,891				6614	1,891		
100	2	2	6681	1,909		1,904	1,899	6679	1,937		1,925
101			6719	1,915				6717	1,943		
102			6611	1,888				6611	1,910		
40	2	2	6556	1,874		1,866	1,899	6555	1,903		1,925
41			6420	1,833				6420	1,866		
42			6617	1,891				6619	1,922		
103	2	2	6641	1,893		1,915	1,899	6642	1,920		1,937
104			6710	1,916				6710	1,936		
105			6789	1,935				6788	1,956		
25	2	2	6678	1,909		1,913	1,899	6680	1,934		1,937
26			6717	1,918				6717	1,940		
27			6700	1,911				6700	1,938		
94	3	1	6592	1,883		1,892	1,901	6592	1,912		1,926
95			6532	1,862				6532	1,885		
96			6762	1,932				6762	1,950		
37	3	1	6694	1,908		1,895	1,901	6692	1,940		1,927
38			6608	1,884				6607	1,913		
39			6637	1,892				6635	1,927		
97	3	1	6663	1,903		1,916	1,901	6663	1,935		1,936
98			6725	1,919				6726	1,934		
99			6744	1,925				6745	1,938		
22	3	1	6618	1,886		1,899	1,901	6617	1,911		1,927
23			6677	1,903				6677	1,934		
24			6699	1,909				6699	1,935		
88	4	0	6790	1,929		1,918	1,918	6790	1,954		1,944
89			6772	1,922				6773	1,950		
90			6708	1,904				6710	1,928		
34	4	0	6705	1,906		1,916	1,918	6705	1,935		1,947
35			6774	1,928				6774	1,957		
36			6722	1,913				6723	1,950		
91	4	0	6806	1,935		1,936	1,918	6806	1,956		1,960
92			6806	1,935				6806	1,956		
93			6826	1,939				6826	1,969		
19	4	0	6721	1,915		1,901	1,918	6723	1,942		1,926
20			6649	1,892				6648	1,912		
21			6663	1,897				6663	1,923		

Na figura 66, constata-se que a baridade máxima antes da cura sofre um aumento consoante o acréscimo da percentagem de cimento e consequente diminuição da cal utilizada. Este fenómeno verifica-se, em parte, na baridade máxima após a cura, onde se observou que o teor em água diminuiu, o peso dos provetes aumentou ligeiramente na maior parte dos exemplos, mantendo-se também o volume, logo a baridade máxima sofre um acréscimo.

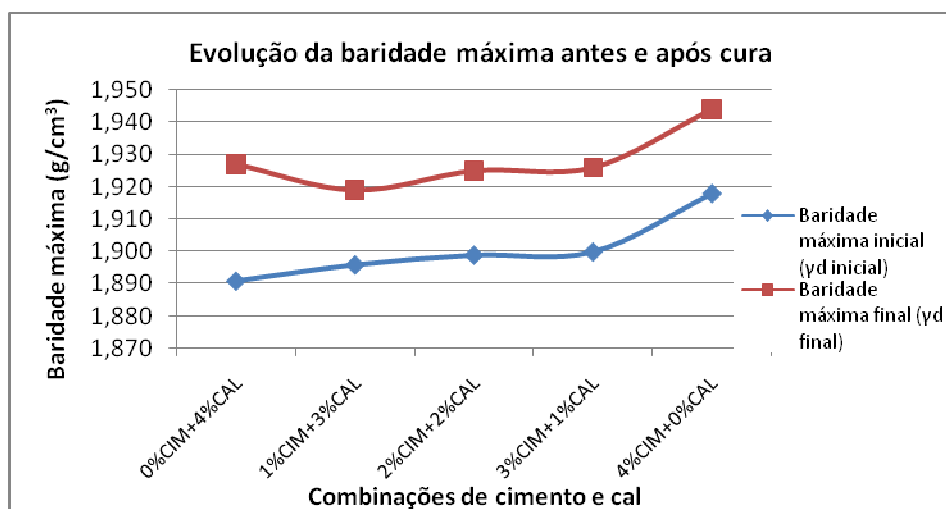


Figura 66 - Evolução das baridades máximas antes e após cura.

No quadro 35, podemos verificar os valores da resistência à compressão diametral ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias.

Quadro 35 - Resistência à compressão simples, aos 7 dias e 28 dias.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Compressão simples 7 dias				Compressão simples 28 dias		
			Peso do Proвете	Carga (KN)	$\sigma_{cd,7}$ (M pa)	$\sigma_{cd,7}$	Carga (KN)	$\sigma_{cd,28}$ (M pa)	$\sigma_{cs,28}$
115	0	4	6714	7,43	0,41	0,40	-		
116			6728	7,54	0,41				
117			6635	6,79	0,38				
31	0	4	6609	-			7,78	0,43	0,45
32			6567				8,63	0,48	
33			6611				8,15	0,45	
109	1	3	6699	9,11	0,50	0,47	-		
110			6618	8,29	0,46				
111			6697	8,05	0,45				
28	1	3	6724	-			9,89	0,55	0,57
29			6630				10,00	0,55	
30			6614				11,28	0,62	
103	2	2	6642	9,00	0,50	0,56	-		
104			6710	9,78	0,54				
105			6788	11,56	0,64				
25	2	2	6680	-			13,95	0,77	0,82
26			6717				15,84	0,88	
27			6700				14,49	0,80	
97	3	1	6663	12,46	0,69	0,70	-		
98			6726	11,33	0,63				
99			6745	13,87	0,77				
22	3	1	6617	-			17,55	0,97	1,00
23			6677				17,02	0,94	
24			6699				19,42	1,08	
91	4	0	6806	15,75	0,87	0,77	-		
92			6806	13,20	0,73				
93			6826	12,58	0,70				
19	4	0	6723	-			18,30	1,01	1,02
20			6648				17,84	0,99	
21			6663				19,04	1,05	

Ao contrário do que se constatou no ensaio de resistência à compressão simples do solo plástico, os valores da tensão de rotura são crescentes à medida que é acrescentado cimento e diminuída a cal, conforme é evidenciado na figura 67.

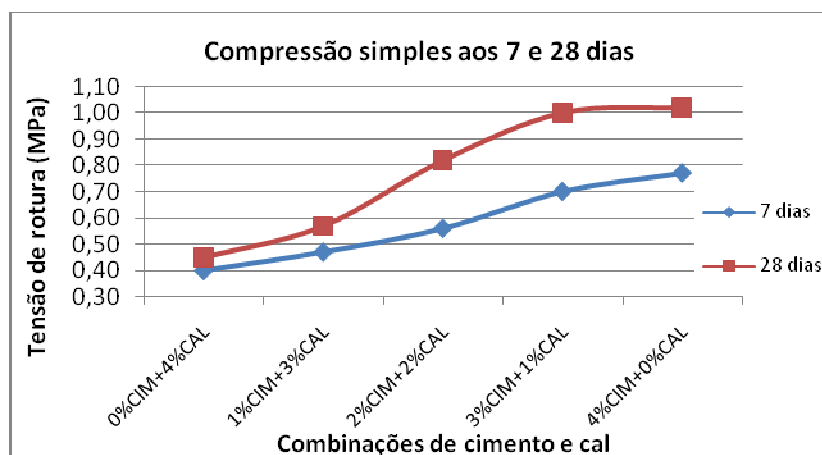


Figura 67 - Evolução da tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.

No quadro 36, podemos verificar os valores da resistência à compressão diametral ensaiados aos 7 dias ($\sigma_{cd,7}$) e aos 28 dias ($\sigma_{cs,28}$).

Quadro 36 - Resistência à compressão diametral, aos 7 dias e 28 dias.

N.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Compressão diametral 7 dias				Compressão diametral 28 dias		
			Peso do Provete	Carga	$\sigma_{cd,7}$	$\sigma_{cd,7}$	Carga	$\sigma_{cs,28}$	$\sigma_{cs,28}$
112	0	4	6509	0,9	0,05	0,05	-		
113			6675	1,1	0,06				
114			6677	1,0	0,05				
46	0	4	6609	-			1,3	0,07	0,07
47			6593						
48			6647						
106	1	3	6646	1,4	0,08	0,08	-		
107			6663	1,3	0,07				
108			6684	1,5	0,08				
43	1	3	6551	-			1,6	0,09	0,09
44			6478						
45			6534						
100	2	2	6679	2,30	0,13	0,12	-		
101			6717	2,20	0,12				
102			6611	1,80	0,10				
40	2	2	6555	-			2,90	0,16	0,19
41			6420						
42			6619						
94	3	1	6592	3,43	0,19	0,17	-		
95			6532	2,87	0,16				
96			6762	2,94	0,16				
37	3	1	6692	-			4,15	0,23	0,25
38			6607						
39			6635						
1	4	0	6790	4,3	0,24	0,24	-		
2			6773	4,6	0,25				
3			6710	4,2	0,23				
28	4	0	6705	-			6,1	0,34	0,30
29			6774						
30			6723						

Na figura 68, pode-se observar um constante crescimento da tensão de rotura, aos 7 e aos 28 dias, conforme a percentagem de cimento é crescente e a de cal diminui.

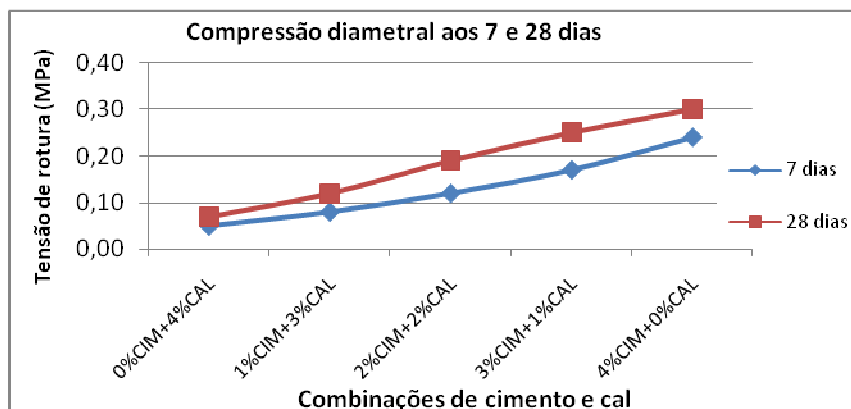


Figura 68 - Evolução da tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.

No quadro 37, estão registados os valores obtidos nos ensaios referentes à tensão de rotura (σ), à resistência à tracção (R_{td}) e ao módulo secante (E_{tb}), realizados na máquina PCDIAM.

Quadro 37- Valores da tensão de rotura, resistência à tracção e módulo secante.

n.º provete	Cimento (%)	Cal (%)	Tempo de Cura (dias)	Tensão de Rotura (Mpa)	Média	Resistência à Tracção R_{tb} (Mpa)	Média	Módulo Secante E_{tb} (Mpa)	Média
28	0	4	7	0,03	0,02	0,005	0,005	0,79	0,75
29				0,02		0,006		0,64	
30				0,01		0,005		0,82	
13	0	4	28	0,05	0,04	0,015	0,018	1,34	1,52
14				0,04		0,020		1,79	
15				0,04		0,018		1,44	
25	1	3	7	0,02	0,02	0,010	0,011	0,70	0,86
26				0,02		0,010		0,78	
27				0,03		0,013		1,09	
10	1	3	28	0,04	0,05	0,018	0,023	2,44	2,90
11				0,05		0,023		2,46	
12				0,07		0,028		3,80	
22	2	2	7	0,04	0,04	0,020	0,018	2,79	2,26
23				0,03		0,015		2,38	
24				0,04		0,018		1,62	
7	2	2	28	0,07	0,07	0,036	0,034	18,80	22,21
8				0,06		0,028		24,01	
9				0,08		0,038		23,81	
19	3	1	7	0,05	0,06	0,023	0,025	7,86	8,73
20				0,06		0,028		9,60	
21				0,06		0,025		8,73	
4	3	1	28	0,10	0,10	0,048	0,049	47,39	52,88
5				0,10		0,048		51,04	
6				0,10		0,051		60,21	
16	4	0	7	0,06	0,06	0,028	0,029	13,72	12,14
17				0,05		0,028		9,60	
18				0,07		0,031		13,10	
1	4	0	28	0,07	0,08	0,033	0,037	56,75	56,12
2				0,07		0,031		52,38	
3				0,10		0,048		59,24	

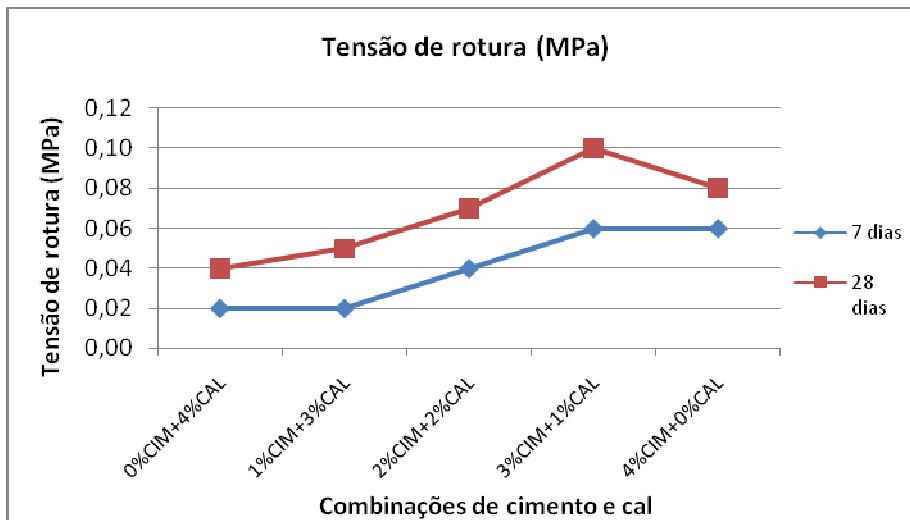


Figura 69 - Tensão de rotura, aos 7 e 28 dias.

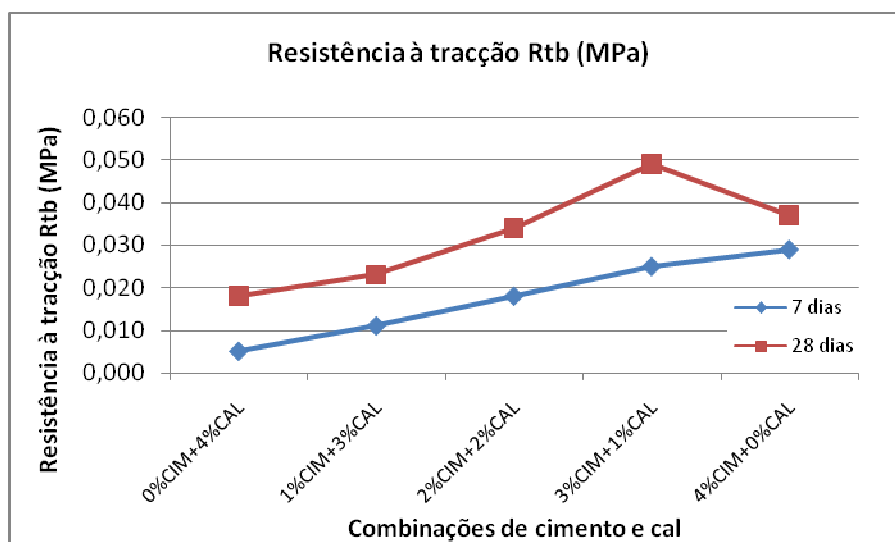


Figura 70 - Resistência à tracção, aos 7 e 28 dias.

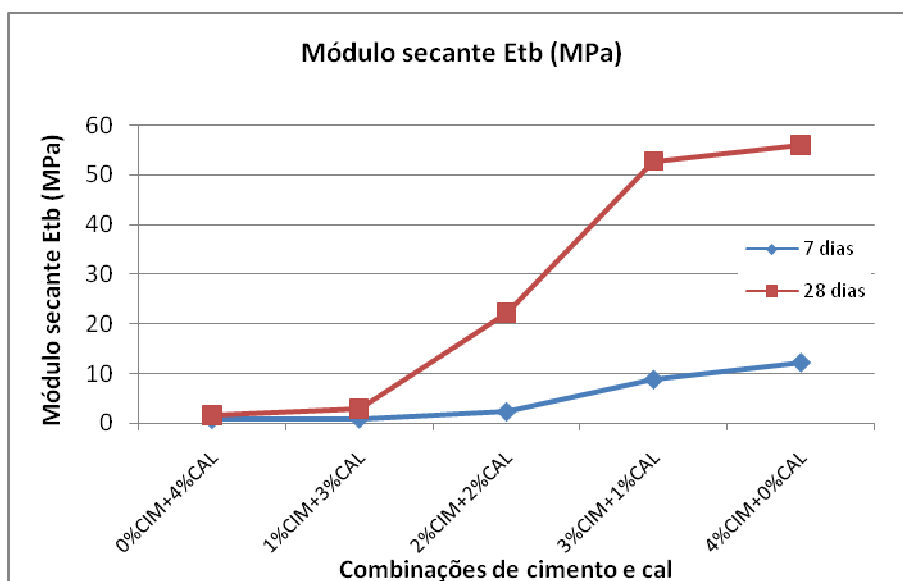


Figura 71 - Módulo secante, aos 7 e 28 dias.

De acordo com a análise das figuras 69, 70 e 71, os valores da tensão de rotura, da resistência à tracção e do módulo secante, apresentam valores crescentes à medida que é substituída a cal pelo cimento.

No quadro 38, encontra-se apresentado os valores do equivalente de areia e azul metileno do solo após a mistura com os ligantes hidráulicos.

Quadro 38 - Caracterização do solo após mistura com os ligantes hidráulicos.

Cimento (%)	Cal (%)	Peneiro			Equivalente Areia (%)	Azul Metileno (g/100g _{solo})
		abertura	(mm)	% passados		
0	0	3/8"	9,5	100	53	0,33
		nº4	4,75	95,8		
		nº10	2	64		
		nº20	0,85	45,1		
		nº40	0,425	33,3		
		nº60	0,25	25,2		
		nº140	0,106	14,7		
		nº200	0,075	11,3		
0	4	3/8"	9,5	100	59	0,11
		nº4	4,75	98,5		
		nº10	2	78,9		
		nº20	0,85	58,4		
		nº40	0,425	45,6		
		nº60	0,25	35,4		
		nº140	0,106	22,5		
		nº200	0,075	19		
1	3	3/8"	9,5	100	53	0,15
		nº4	4,75	98,6		
		nº10	2	78,5		
		nº20	0,85	55,1		
		nº40	0,425	41,4		
		nº60	0,25	31,8		
		nº140	0,106	19,7		
		nº200	0,075	16,5		
2	2	3/8"	9,5	100	50	0,16
		nº4	4,75	98		
		nº10	2	78		
		nº20	0,85	57,3		
		nº40	0,425	44,2		
		nº60	0,25	34,2		
		nº140	0,106	21,8		
		nº200	0,075	18,3		
3	1	3/8"	9,5	100	54	0,16
		nº4	4,75	98,3		
		nº10	2	76		
		nº20	0,85	53,5		
		nº40	0,425	40,9		
		nº60	0,25	31,5		
		nº140	0,106	20,2		
		nº200	0,075	17		
4	0	3/8"	9,5	100	52	0,16
		nº4	4,75	99,1		
		nº10	2	83,8		
		nº20	0,85	60,8		
		nº40	0,425	47,2		
		nº60	0,25	37,1		
		nº140	0,106	23,5		
		nº200	0,075	20,2		

Ao analisar a figura 72, constata-se que a utilização de ligantes hidráulicos vai diminuir ligeiramente a granulometria do solo em comparação com o solo antes do tratamento.

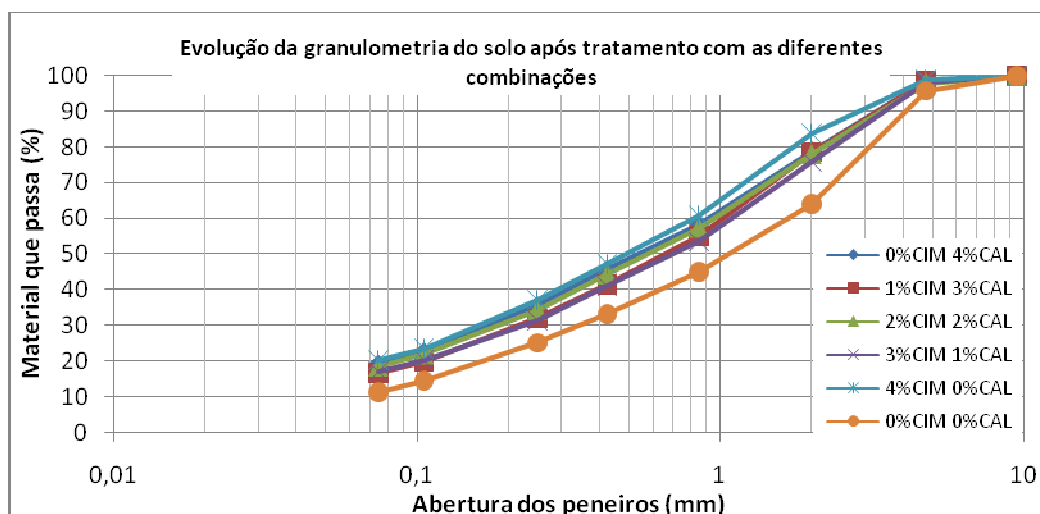


Figura 72 - Análise granulométrica do solo com e sem mistura de cimento e cal

Na figura 73, observa-se que na evolução do equivalente de areia, após o tratamento, obtém-se um valor mais elevados quando a percentagem de cal é máxima, logo a quantidade de cimento é nula, sendo o valor deste parâmetro relativamente constante nas restantes percentagens combinadas, inclusive no solo antes do tratamento.

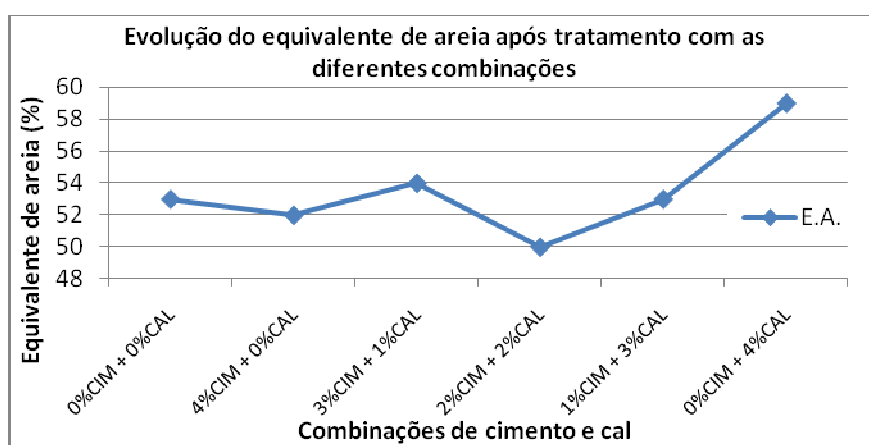


Figura 73 - Variação do equivalente de areia consoante o acréscimo dos ligantes hidráulicos

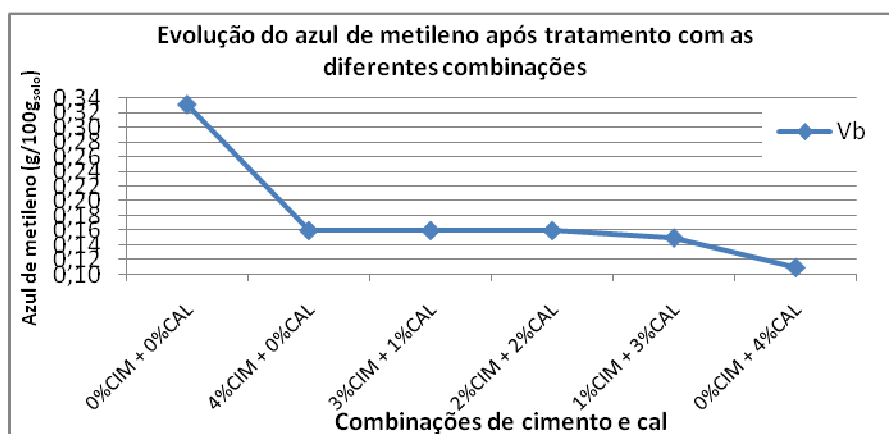


Figura 74 - Variação do valor de azul-de-metileno com o acréscimo de ligantes hidráulicos

Na figura 74, constata-se que após o tratamento com ligantes hidráulicos o valor do azul-de-metileno reduziu para cerca de metade em comparação com o valor anterior ao tratamento. É de realçar que a variação dos valores do azul-de-metileno, segundo as diferentes combinações de ligantes hidráulicos utilizados, é mínima.

No quadro 39 apresentam-se os valores obtidos relativamente ao ensaio de PH das misturas, no caso do solo não plástico.

Quadro 39 - Resultados de ensaio ao pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo não plástico).

Ensaio aos 0 dias

N.º Provete	Combinação	Massa (g)	Temperatura (°C)	PH
24	4%CIM + 0%CAL	10,71	19,9	11,703
25	3%CIM + 1%CAL	10,24	20,0	12,369
23	2%CIM + 2%CAL	10,04	20,0	12,64
21	1%CIM + 3%CAL	10,14	20,0	12,701
22	0%CIM + 4%CAL	10,71	20,0	12,873

Ensaio aos 7 dias

N.º Provete	Combinação	Massa (g)	temperatura (°C)	PH
29	4%CIM + 0%CAL	10,15	20,1	9,982
30	3%CIM + 1%CAL	10,27	20,2	10,005
28	2%CIM + 2%CAL	10,35	20,1	10,035
26	1%CIM + 3%CAL	10,12	20,0	10,127
27	0%CIM + 4%CAL	10,07	20,1	10,232

Ensaio aos 28 dias

N.º Provete	Combinação	Massa (g)	temperatura (°C)	PH
7	4%CIM + 0%CAL	10,03	21,1	10,974
6	3%CIM + 1%CAL	10,07	20,1	11,613
8	2%CIM + 2%CAL	10,59	20,8	11,522
10	1%CIM + 3%CAL	10,28	20,5	12,176

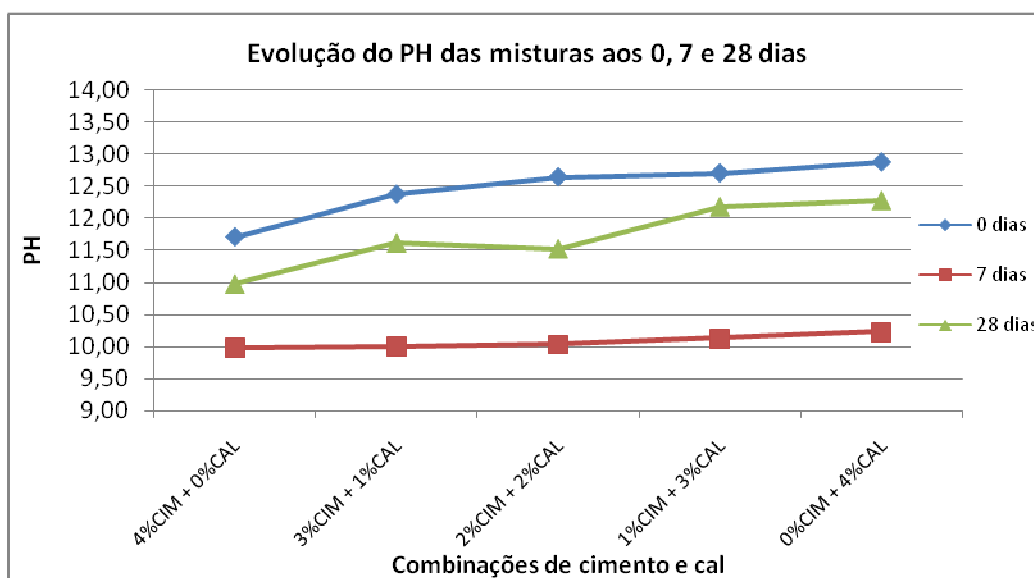


Figura 75 - Evolução do pH das misturas aos 0, 7 e 28 dias (solo não plástico).

Na figura 75 demonstra-se a evolução do pH das misturas de cimento e cal com o solo a tratar, observando-se que o pH inicial logo após mistura (0 dias) é o mais elevado comparativamente com o valor aos 7 e 28 dias das mesmas misturas. Constata-se também que a evolução do pH inicial tende a subir com o aumento da percentagem de cal. Aos 7 dias, o valor do pH é o mais

baixo em relação às 3 datas analisadas (0, 7 e 28 dias), mantendo-se relativamente constante ao longo das várias combinações de cal e cimento. Relativamente ao ensaio aos 28 dias, nota-se um substancial aumento do valor do PH em relação ao valor obtido aos 7 dias e com tendência a aproximar-se do pH inicial (0 dias), observando-se um crescimento do valor à medida que aumenta a percentagem de cal na mistura.

7.3 Cal

No quadro 40 é apresentada a caracterização da cal, com os ensaios de análise granulométrica, massa volúmica, superfície específica e velocidade de reacção.

Ensaio	Norma	Resultados	
Análise Granulométrica	LNEC E 234	P#nº16	100.0 %
		P#nº20	99.9 %
		P#nº30	99.7 %
		P#nº40	99.1 %
		P#nº50	97.7 %
		P#nº60	98.2 %
		P#nº80	94.0 %
		P#nº100	95.4 %
		P#nº140	90.3 %
P#nº200	88.8 %		
Massa Volúmica	LNEC E 64	2.86 (g/cm ³)	
Superfície Específica	LNEC E 65	8760 (10cm ² /g)	
Velocidade de Reacção	NF P 98-102	T (seg)	T (°C)
		0	20
		30	26
		60	29
		90	30
		120	32
		150	34
		180	35
		210	36
		240	37
		270	38
		300	39
		360	40
		420	40
		480	41
		540	41
600	41		
900	41		
1200	40		
1500	39		

Quadro 40 – Caracterização da cal viva.

7.4 Cimento

No quadro 41 é apresentada a caracterização do cimento utilizado neste trabalho, onde são apresentados os ensaios de análise granulométrica, massa volúmica, superfície específica e velocidade de reacção.

Ensaio	Norma	Resultados	
Análise Granulométrica	LNEC E 234	P#nº80	100.0 %
		P#nº100	99.9 %
		P#nº140	99.6 %
		P#nº200	98.1 %
Massa Volúmica	LNEC E 64	3.05 (g/cm ³)	
Superfície Específica	LNEC E 65	3200 (10cm ² /g)	

Quadro 41 – Caracterização do cimento.

8. Conclusões

8. Conclusões

Este trabalho foi realizado com a finalidade de estudar os melhoramentos conferidos aos solos, após tratamento com diferentes combinações de cal e cimento.

Para este efeito, foram utilizados dois tipos de solo: uma argila magra arenosa (CL) e uma areia bem graduada com silte (SW-SM). As combinações de cal e cimento utilizadas foram, para o solo plástico de: 3% cimento e 0% cal; 2% cimento e 1% cal; 1,5% cimento e 1,5% cal; 1% cimento e 2% cal; e 0% cimento e 3% cal. Para o solo não plástico, utilizaram-se combinações de: 4% cimento e 0% cal; 3% cimento e 1% cal; 2% cimento e 2% cal; 1% cimento e 3% cal; e 0% cimento e 4% cal.

Em ambos os solos e para todas as combinações de cal e cimento, foram realizados ensaios de caracterização dos solos, entre os quais, os ensaios de análise granulométrica, equivalente de areia, limites de consistência, compactação proctor, CBR e azul-de-metileno.

Nos dois tipos de solo foram analisados, os teores de água antes (W_a , W_{a+c} , W_{a+c+c}) e após a cura (W_t), assim como, baridades máximas (γ_d) antes e após a cura. Foram também determinadas as resistências à compressão simples e diametral aos 7 e 28 dias, bem como, a tensão de rotura ($\sigma_{cd,7}$ e $\sigma_{cs,28}$), a resistência à tracção (R_{tb}) e o módulo secante (E_{tb}).

Os ensaios da análise granulométrica, equivalente de areia e azul-de-metileno, foram igualmente efectuados após a realização das misturas, de forma a possibilitar a determinação da evolução destas características após o tratamento do solo.

Na sequência da análise dos parâmetros anteriores, conclui-se que o tratamento dos diferentes tipos de solo estudados resulta na diminuição dos teores de água após a adição dos ligantes hidráulicos. Esta redução é devida à ocorrência de reacções químicas entre a água e o cimento e/ou cal.

A mistura do solo com os ligantes hidráulicos propostos, permitiu também avaliar a evolução da baridade máxima. A comparação desta, no momento em que é efectuada a combinação e após a cura, comprovou o seu aumento. Este acréscimo deve-se ao aumento das partículas sólidas para um mesmo volume, o que permite melhores condições na execução de um aterro, por exemplo. Este comportamento é verificado tanto no solo plástico como no não plástico.

Tal como referido anteriormente, o principal objectivo deste trabalho prendia-se com avaliação técnica do tratamento dos solos com cal e/ou cimento, assim, para além da evolução dos teores de água e da baridade máxima, também era importante verificar se a rigidez do material aumentava o suficiente, de forma ser possível adoptar o tratamento em estudo. Deste modo, foi possível concluir que há melhorias significativas, embora diferentes para cada um dos solos. No solo plástico os melhores resultados foram obtidos na combinação de igual percentagem de cada ligante hidráulico (1,5% de cimento e 1,5% de cal). No solo não plástico, os resultados

tecnicamente mais satisfatórios foram obtidos quando a percentagem de cimento é máxima relativamente à cal (4% de cimento e 0% de cal).

Foram ainda analisados os dois tipos de solos estudados, no que diz respeito à tensão de rotura, resistência à tracção e módulo de secante, através de ensaios na prensa de compressão diametral (PCDIAM). Para estes ensaios obtiveram-se resultados em tudo semelhantes aos ensaios de compressão simples e diametral, ou seja, para o solo plástico os resultados mais conclusivos foram obtidos para uma percentagem equilibrada de cimento e cal (1,5% de cimento e 1,5% de cal), enquanto que, para o solo não plástico o melhor resultado foi obtido para uma percentagem máxima de cimento (4% de cimento e 0% de cal).

Confirmou-se também que, após a adição de cal e cimento, os parâmetros geotécnicos avaliados (análise granulométrica, equivalente de areia e azul-de-metileno) melhoraram significativamente quanto comparados com o seu valor inicial, antes do tratamento.

Assim, para o solo plástico, notou-se um significativo aumento da granulometria das partículas, cuja evolução se verificou também no acréscimo do valor do equivalente de areia e diminuição do azul-de-metileno. Estas características evoluem neste sentido quando o solo se torna mais granular.

No caso do solo não plástico, e sendo este mais granular, os resultados obtidos evoluíram no mesmo sentido de melhoria ocorrida no solo plástico, embora a variação seja em menor escala.

Foi igualmente analisado o valor do pH, para averiguar até que ponto este poderia tornar-se mais ácido ou alcalino com a evolução do tempo e para as diferentes combinações de cal e cimento. Assim, para o solo plástico, com características alcalinas, há uma diminuição do valor de pH aos 7 dias, mantendo-se constante ao longo das diferentes combinações, à excepção da combinação com máxima percentagem de cal (0% de cimento e 3% de cal). Esta diminuição deve-se às reacções químicas dos ligantes hidráulicos. Nos ensaios aos 28 dias, para todas as combinações utilizadas, ocorre um ligeiro aumento do valor do pH comparativamente com os ensaios realizados aos 7 dias.

No solo não plástico também com características alcalinas, verificou-se também uma diminuição do valor de pH aos 7 dias, mantendo-se constante para as diferentes combinações de cimento e cal. No entanto, nos ensaios aos 28 dias, para todas as combinações utilizadas, ocorre um significativo aumento do valor do pH, com tendência a aproximar-se do seu valor inicial.

No que diz respeito ao custo da aplicação deste tratamento, após análise económica para os dois tipos de solos estudados, e tomando sempre como referencial o tratamento de solo-cimento, dado que é a técnica mais comum em Portugal, pode-se concluir que a execução do tratamento no caso do solo plástico, com percentagens de cimento (1,5%) e cal (1,5%), é mais vantajosa a nível técnico e económico do que no solo não plástico, que necessita de 4% de cimento e 0% de

cal para obter o resultado mais satisfatório. Esta escolha tem por base uma ponderação entre vantagens ao nível do comportamento mecânico dos materiais através da combinação dos ligantes e as técnicas tradicionais de tratamento com cimento e cal, executadas separadamente. Todo este trabalho foi realizado com algumas dificuldades de informação bibliográfica e do estado de arte actual, resultante da utilização pouco frequente deste tipo de técnicas, nomeadamente, nos teores de água e correspondentes baridades máximas, e na homogeneização das misturas. Estes aspectos controlados no contexto de trechos experimentais executados em obra são fundamentais para que este tipo de técnicas seja bem sucedida, sendo necessário ter associado um rigoroso sistema de qualidade.

Perspectivas de estudo e desenvolvimento

Pretendeu-se com este trabalho desenvolver fundamentalmente um estudo laboratorial onde fosse possível identificar uma primeira abordagem à determinação das percentagens adequadas a um tratamento combinado entre dois ligantes hidráulicos no tratamento e melhoramento de solos. Dado que todo o trabalho se desenvolveu em ambiente laboratorial, através de ensaios correntes, pretende-se como trabalhos futuros dar continuidade ao trabalho desenvolvido através da execução de ensaios laboratoriais mais específicos, como é o caso dos ensaios triaxiais e também da execução de trechos experimentais em ambiente de obra, acompanhados do respectivo controlo da qualidade e monitorização das características geotécnicas das camadas tratadas ao longo do tempo.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- Aguiar, B. (2007). *Materiais de Construção 1. Apontamentos*. Universidade do Minho.
- Alvarez, J., Sequeira, C., Costa, M., (2005). Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- Bauer, L. (1987). *Materiais de Construção 1. Livros Técnicos e Científicos Editora, 3ª Edição*, Rio de Janeiro – Brasil.
- Borrego, C., Lopes, M., Ribeiro, I., (2009). Sociedade, tecnologia e ambiente: um trinómio para o desenvolvimento sustentável. Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – caracterização e medidas para o desenvolvimento do sector. CESAM e Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Caspurro, I., Dias, S., (2008). Experiência de aplicação do Solo-Cimento em obras de rede rodoviária nacional. Alguns casos de aplicação (TRATCICA, 2008).
- Cartmell, H., Berg, A., (1958). Lime Stabilization of Soils for Use as Road Constructions of Low-Cost Roads in N. Rhodesia. N. Rhodesia, Road Research Overseas Bull, nº 9.
- Castelló, R.D.B.. El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal. 252 pp.(Tese de Mestrado).
- Coelho, A.Z., Torgal, F.P., Jalali, Said (2009). *A cal na construção*. Tecminho, Guimarães. 130 pp.
- Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2. Ligantes e caldas*. Departamento de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cowan, H. (1977). *The Master Builders: a history of structural and environmental design from ancient Egypt to the Ninetennth Century*. John Wiley and Sons, New York.
- Cristelo, N., (2001). Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Departamento de Engenharia Civil – Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho. (Tese de Mestrado).
- Cruz, J., (2008). Avaliação do Estado da Arte da Aplicação de Solos Tratados com Cal no Âmbito das Infra-Estruturas de Transporte. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Tese de Mestrado).
- DER/SP (2006). Departamento de estradas de rodagem do estado de São Paulo.
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars – A review. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1416-1424.
- Fernandes, M. (1994). *Mecânica dos Solos – I Volume (reimpressão de Julho 2003)*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato, E., *et al* .(2009). Valorização dos Resíduos de Construção e Demolição em Obras Geotécnicas. CESAM e Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

- Gomes Correia, A. Neves, J. M. C., (1996). Misturas de solos com ligantes hidráulicos e pozolânicos: Propriedades físicas-químicas e mecânicas.
- Guimarães, J. (2002). A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2ª Edição, São Paulo, Pini.
- JAE, (1998). Caderno de Encargos. Junta Autónoma das Estradas.
- LCPC, (1977). Catalogue des structures type de chaussées neuves.
- LCPC, (2005). Tratamiento de suelos con cal y/o conglomerantes hidráulicos – Aplicación a la construcción de terraplenes y capas de forma – Guide Technique.
- LCPC/SETRA, (1972). Recommendation pour le traitement en place des sols fins à la chaux.
- LCPC/SETRA, (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme.
- LCPC/SETRA, (2000). Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS).
- LNEC, (1962). Vocabulário de Estradas e Aeródromos, 4ª Edição, Especificação E1-1962. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Luís, A. (1972). Estabilização com Cal – Breve referência ao seu emprego em Moçambique. Colóquio realizado no LNEC.
- Margalha, M. (2008). Conservação e recuperação de construções em taipa. Acção de formação. Taliscas, Odemira.
- Mesquita, A. (2008). Tratamento de solos de fundação com cal hidráulica: experiência numa obra municipal. Seminário TRATCICA – Tratamento de Solos com Cimento e Cal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Miller, M. (1999). Lime. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook.
- Moreira, S. & Santos, J., (2003). Estabilização de um solo com ligante hidráulico. Estudo laboratorial. A7 - sublanço Calvos/Fafe (lote 5.2). Relatório Técnico.
- National Lime Association, (2004). Lime-Treated Soil Construction Manual, Lime Stabilization & Lime Modification.
- Navarro, V.T., Gama, C.D., (2006). A sustentabilidade das Obras Geotécnicas. 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Universidade Nova de Lisboa.
- Neves, J.M.C., (2007). Curso de Especialização Materiais Tratados e Reciclados em Infra-estruturas de Transportes. FUNDEC/LNEC.
- Neves, J.M.C., (1993). Estabilização de solos com cal. Estudo e aplicações rodoviárias. Secção Autónoma de Geotecnia Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 242 pp. (Tese de Mestrado).
- Paiva, S., Gomes, E., Oliveira, R., (2007). Controle de Qualidade da Cal para Argamassas – Metodologias Alternativas. Revista Ciência e Tecnologia. Ano 1, nº 1, pp.1-11.

Paulo, R. (2006). Caracterização de Argamassas Industriais. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. (Tese de Mestrado).

Portland Cement Association, (1979). Soil-Cement Construction Handbook.

Ribeiro, L., Lopes, R. (2007). As argamassas na antiguidade Greco-Romana: usos, definições e traduções. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

Santiago, C. (2000). Estudo dos Materiais de Construção de Vitruvius até ao Séc. XVIII, uma Visão Crítico Interpretativa à Luz da Ciência Contemporânea. Departamento de Conservação do Património Arquitectónico, Universidade de Évora. (Tese de Doutoramento).

Santos, J. (1985). Viabilidade técnica da produção de blocos silico-calcários. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. (Tese de Mestrado).

Santos, J., (2008). Estudos de formulação de Solo-Cimento e Solo-Cal e Respectivas Aplicações. Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto. 130 pp. (Tese de Mestrado).

Sequeira, A., Frade, D., Gonçalves, P., (2007). Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

Silva, N., (2006). Argamassa de revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária. Sector de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. (Tese de Mestrado).

Simão, A., Borges, A., (2009). Enquadramento Legislativo da Valorização de Resíduos. Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – caracterização e medidas para o desenvolvimento do sector. CESAM e Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Veiga, R.; Tavares, M. (2002). Características das Paredes Antigas. Requisitos dos Revestimentos por Pintura. Actas do Encontro A Indústria das Tintas no início do Séc. XXI. Associação Portuguesa dos Técnicos de Tintas, Lisboa.

Normas e Especificações

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2003. **C5**. Standard Specification for Quicklime for Structural Purposes.

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2003. **D560**. Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures.

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2006. **D2487**. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

CEDEX – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1990. **NLT 305**. Resistência a compresión simple de materiales tratados com conglomerantes hidráulicos.

CEN - European Committee for Standardization, 2003. **EN 13286-41**. Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures

CEN - European Committee for Standardization, 2004. **EN 13286-47**. Unbound and hydraulically bound mixtures. Test méthode for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 1965. **NP 84**. Solos: Determinação do teor em água.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 1969. **NP 143**. Solos: Determinação de limites de consistência.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2001. **NP EN 197-1**. Cimento parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2002. **NP EN 459-1**. Cal de construção Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2002. **NP EN 459-2**. Cal de construção Parte 2: Métodos de ensaio.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2002. **NP EN 459-3**. Cal de construção Parte 3: Avaliação da conformidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2003. **NP EN 771-2**. Especificações para elementos de alvenaria. Parte 2: Blocos silico-calcários.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2003. **NP EN 1008**. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2006. **NP EN 196-1**. Métodos de ensaio de cimentos parte 1: determinação das resistências mecânicas.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2006. **NP EN 196-3**. Método de ensaio de cimentos parte 3: determinação do tempo de presa e da expansibilidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2007. **NP EN 206**. Especificações para betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2009. **NP EN 12390**. Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2009. **NP EN 12390**. Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966. **E 197**. Ensaio de compactação.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. **E 199**. Ensaio de equivalente de areia.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970. **E 240**. Solos. Classificação para fins rodoviários.

Links na internet

<http://www.clegiosaofrancisco.com.br> (consultado em Maio de 2009).

<http://www.pime.org.br> (consultado em Maio de 2009).

<http://marius.blogs.sapo.pt> (consultado em Maio de 2009).

<http://commons.wikimedia.org> (consultado em Maio de 2009).

<http://www.uniblog.com.br> (consultado em Maio de 2009).

<http://br.olhares.com> (consultado em Maio de 2009).

<http://www.ipq.pt> (consultado em Março de 2009).

<http://www.astm.org> (consultado em Março de 2009).

<http://www.cimentoitambe.com.br> (consultado em Abril de 2009).

<http://www.pavimentacao.ufjf.br> (consultado em Agosto de 2009).

<http://ftp.sp.gov.br> (consultado em Agosto de 2009).

<http://flexiblelearning.auckland.ac.nz/geog105/>, (consultado em Maio de 2009).

<http://www.planete-tp.com>, (consultado em Julho de 2009).

ANEXO I – Fluxogramas com o Plano de Trabalhos

ANEXO II – Boletins de Ensaio