



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Estudo da Utilização de Escombreciras das Pedreiras do Poio em Pavimentos Rodoviários e na sua Fundação.

Mestrado em Infraestruturas de Construção Civil

Sónia R. Baptista Velez

**Orientador
Rosa C. Luzia**

Julho 2014



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Estudo da Utilização de Escombrelras das Pedreiras do Poio em Pavimentos Rodoviários e na sua Fundação.

Sónia R. Baptista Velez

Orientadora

Rosa C. Luzia

Dissertação apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Infraestruturas de Construção Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Rosa Luzia, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Julho 2014

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor Maria Teresa Durães Albuquerque
Professor Adjunto da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Francisco José Freire Lucas
Professor Coordenador da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Professor Doutor Rosa Paula da Conceição Luzia
Professor Adjunto da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Agradecimentos

Ao concluir esta dissertação desejo expressar publicamente os meus agradecimentos a algumas pessoas que mais contribuíram para que a mesma se realizasse.

À Professora Doutora Rosa Luzia, Professor Adjunto da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia, do Instituto Politécnico de Castelo Branco, pela aceitação da orientação da minha dissertação de mestrado, pela sugestão do tema do presente trabalho, pela disponibilização de todos os meios necessários para a sua realização, pelo seu apoio e pela sua amizade.

À SOLICEL – Sociedade do Centro Industrial de Esteios de Lousa, Lda., na pessoa do Dr. Mauro Búrcio, pelas facilidades concedidas na recolha do material na sua pedreira, em Vila Nova de Foz Côa.

Um agradecimento aos meus amigos pelo apoio na realização de certas tarefas, pelo apoio e carinho que sempre me deram.

Um agradecimento especial ao meu marido Vitor David, pelo apoio na realização de algumas tarefas, pelo apoio, compreensão, incentivo e carinho que sempre me deu.

Por fim agradeço à minha restante família, em especial aos meus pais, irmãos, cunhados e sobrinhas por todo o apoio, incentivo e carinho que sempre me deram, principalmente durante a realização deste trabalho.

Resumo

Por todo o País existem indústrias extrativas de rocha com produção elevada de escombrelras, as quais levantam sérios problemas ambientais e cujos materiais poderiam, eventualmente, ser utilizados nas camadas não ligadas bem como na fundação de pavimentos rodoviários.

Um exemplo desta situação ocorre no denominado núcleo de pedrelras do Poio, Vila Nova de Foz Côa, em pleno Parque Arqueológico do Vale do Côa, onde os materiais xistosos são extraídos produzindo um grande volume de escombrelras.

O objetivo principal deste trabalho foi contribuir para o aproveitamento deste material e sucessivamente para a redução do impacte ambiental na zona envolvente das pedrelras, fazendo a avaliação do comportamento geotécnico dos materiais xistosos das escombrelras com vista à sua utilização em pavimentos rodoviários à luz de especificações usadas em Portugal.

Para cumprir este objetivo procedeu-se à recolha de material numa das pedrelras do denominado núcleo das Pedrelras do Poio. De seguida, foi efetuado um levantamento das normas e foram identificadas as condições, procedimentos e ensaios que cada uma das delas define como essenciais para a verificação da utilização daquele material.

Após esta identificação, fez-se o estudo experimental que consistiu na caracterização geotécnica em laboratório do material recolhido procedendo-se à análise e tratamento dos resultados. Da análise dos resultados à luz das normas referidas pode concluir-se que o material em estudo, segundo algumas delas, poderia ser utilizado em aterro e leito do pavimento. Constatou-se igualmente que cumpre algumas das exigências estipuladas para a sua possível utilização em fundação e mesmo em camadas granulares de pavimentos rodoviários.

Por fim, o material em estudo comparou-se com outros materiais já utilizados na construção de pavimentos rodoviários, incluindo a sua fundação, e constatou-se que amostra em estudo tem algumas propriedades idênticas às de alguns deles.

Pelo exposto, pensa poder afirmar-se que o material em estudo poderia ser utilizado na construção de obras rodoviárias, nomeadamente em elementos estruturais geotécnicos, sem que os mesmos pudessem sofrer danos futuros.

Palavras chave

Camadas não ligadas; Fundação; Escombrelras; Pavimentos Rodoviários; Pedrelras do Poio.

Abstract

All over the country there are the exploration of rock quarrying with of high production of heaps tailings, which pose serious environmental problems and whose material could eventually be used in unbound layers as well as in the foundation of road pavements.

An example of this occurs in so-called core of quarries of Poio, Vila Nova de Foz Coa, in the Archaeological Park of the Coa Valley, where the extracted shale materials, are producing a large amount of tailings.

The main objective of this work was to contribute to the utilization of this material and successively to reduce the environmental impact in the surrounding area of the quarries, making the evaluation of the geotechnical behaviour of shale tailings with a view to their utilization in road pavements, according to the specifications used in Portugal.

To meet this goal was collected material in a quarry of the so-called core of quarries of Poio. Then, a survey was made of the standards and were identified the conditions, procedures and tests that each of them defines as essential for verification of utilization of the material.

After this identification, made up the experimental study which consisted in the geotechnical characterization of the collected material in laboratory and proceeded to the analysis and processing of results.

From analysis of the results in light of the standards referred to can be concluded that the material under study, according to some, could be used in landfills and capping layer. According to others, it could also be considered possible to use the materials on the foundation and granular layers of road pavements, if some criteria were changed and if it was made a correction in the material granulometry.

Finally, the material in study was compared with other materials already used in the construction of road pavements, including its foundation and it was found that the material in study has identical properties to those of some of them.

For these reasons, thinks it can be said that the material studied could be used in the construction of road pavements, particularly in its foundation, without which they could suffer future damage.

Keywords

Unbound layers; Foundation; Tailings; Road Pavements; Quarries of Poio.

Índice geral

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos e metodologia	1
1.3 Organização do trabalho.....	2
2. A utilização de xisto na construção de estradas em Portugal.....	3
2.1 Considerações iniciais	3
2.2 Construção do lanço IP3 – Raiva / Gestosa – Lanço Nó da Raiva – Santa Comba Dão.....	3
2.3 IP5 – Troço Albergaria-a-Velha / Viseu.....	6
2.4 IC8 – Troço Sertã / Proença-a-Nova	11
2.5 E.N.238 Sertã (IC8) / Cernache do Bonjardim.....	13
2.6 Troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6	16
2.8 Considerações finais	23
3. Especificações aplicáveis em Portugal.....	25
3.1 Considerações iniciais	25
3.2 Especificação LNEC E 240 – 1970: “Solos. Classificação para fins rodoviários” (LNEC, 1970b)	25
3.3 “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. Norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001)	25
3.4 Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995).....	26
3.5 Caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012)..	28
3.5.1 Considerações iniciais	28
3.5.2 Vol. 14.01 – Terraplenagem. Características dos materiais (EP, 2009).....	28
3.5.2.1 Materiais para aterro	28
3.5.2.2 Materiais para leito do pavimento.....	33
3.5.3 Vol. 14.03 – Pavimentação. Características dos materiais (EP, 2012).....	35
3.5.3.1 Camada de Sub-base.....	35
3.5.3.2 Camada de Base.....	36
4. Apresentação dos ensaios realizados.....	37

4.1	Considerações iniciais.....	37
4.2	Análise granulométrica	37
4.3	Limites de consistência	37
4.4	Ensaio de compactação pesada tipo <i>Proctor</i>	37
4.5	Ensaio CBR (<i>California Bearing Ratio</i>).....	38
4.6	Ensaio de azul de metileno.....	38
4.7	Ensaio equivalente de areia	41
4.8	Ensaio de <i>Los Angeles</i>	43
4.9	Ensaio micro- <i>Deval</i>	44
4.10	<i>Slake durability test</i>	46
4.11	Índices de forma	47
4.12	Índice de achatamento.....	47
4.13	Ensaio de degradabilidade	49
4.14	Ensaio de fragmentabilidade.....	49
5.	Trabalho experimental	51
5.1	Considerações iniciais.....	51
5.2	Material em estudo	51
5.3	Apresentação dos resultados	52
5.3.1	Análise granulométrica	52
5.3.2	Limites de consistência.....	54
5.3.3	Ensaio de compactação pesada tipo <i>Proctor</i>	54
5.3.4	Ensaio de CBR (<i>California Bearing Ratio</i>).....	55
5.3.5	Ensaio de azul de metileno.....	55
5.3.6	Ensaio de equivalente de areia.....	56
5.3.7	Ensaio de <i>Los Angeles</i>	56
5.3.8	Ensaio micro- <i>Deval</i>	56
5.3.9	<i>Slake durability test</i>	56
5.3.10	Índices de forma	57
5.3.11	Índice de achatamento.....	57
5.3.12	Ensaio de degradabilidade	57
5.3.13	Ensaio de fragmentabilidade.....	57
6.	Análise de Resultados	59
6.1	Considerações iniciais.....	59

6.2	Especificação LNEC E 240 – 1970: “Solos. Classificação para fins rodoviários”.	59
6.3	“Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. Norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001)	59
6.4	Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995)	59
6.5	Caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012)..	60
6.5.1	Vol. 14.01 – Terraplenagem. Características dos materiais (EP, 2009).....	60
6.5.1.1	Materiais para Aterro	60
6.5.1.2	Materiais para leito do pavimento.....	62
6.5.2	Vol. 14.03 – Pavimentação. Características dos materiais (EP, 2012).....	64
6.5.2.1	Camada de Sub-base	64
6.5.2.2	Camada de Base	64
6.6	Comparação com os resultados de outros trabalhos	65
6.6.1	Considerações iniciais	65
6.6.2	Construção do lanço IP3 – Raiva / Gestosa – Lanço Nó da Raiva – Santa Comba Dão.....	65
6.6.3	IP5 – Troço Albergaria-a-Velha / Viseu.....	66
6.6.4	IC8 – Troço Sertã / Proença-a-Nova	67
6.6.5	Troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6	68
7.	Conclusões	71
	Bibliografia	73

Índice de figuras

Figura 3.1 - Fuso granulométrico previsto no caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009).....	34
Figura 4.1 – Equipamento de compactação mecânica Proctor.....	38
Figura 4.2 – Equipamento para ensaio do azul de metileno.....	39
Figura 4.3 – Gotas de preparação no papel de filtro, teste da mancha (AFNOR, 1990)	39
Figura 4.4 – Agitador mecânico de provetas	41
Figura 4.5 – Provetas cilíndricas com o preparado.....	43
Figura 4.6 – Provete e esferas no cilindro de ensaio	44
Figura 4.7 – Provetes com carga abrasiva nos cilindros para ensaio.....	45
Figura 4.8 – Equipamento micro-Deval	45
Figura 4.9 – Equipamento Slake Durability Test.....	46
Figura 4.10 – Peneiro de barra.....	48
Figura 5.1 - Amostra de material utilizado.....	51
Figura 5.2 - Amostra de material utilizado.....	52
Figura 5.3 – Curva granulométrica resultante da análise granulométrica segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966)	53
Figura 5.4 – Curva granulométrica resultante da análise granulométrica segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a).....	54
Figura 5.5 – Curva de compactação.....	55
Figura 6.1 - Curva granulométrica do material, norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a), comparação com fuso granulométrico previsto Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2009).....	63

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Resultados dos ensaios de caracterização obtidos em fase de projeto (Coteprol, 1991, ref. por Luzia, R. C., 1998)	4
Tabela 2.2 - Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização realizados no decorrer da obra (Luzia, R. C., 1998)	5
Tabela 2.3 - Valores médios dos resultados do controle de compactação realizados no decorrer da obra (Luzia, R. C., 1998)	5
Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados durante a fase de projeto (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)	6
Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados durante a obra (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)	7
Tabela 2.6 - Constituição do leito do pavimento (espessuras) nos cinco quilómetros iniciais do IP 5 (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)	8
Tabela 2.7 - Características de compactação exibidas pelos aterros (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)	9
Tabela 2.8 - Localização dos materiais do IP5 ensaiados (Luzia, R.C., 1998)	9
Tabela 2.9 - Resumo dos principais resultados dos ensaios realizados sobre os materiais 272, 269 e 271 (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)	10
Tabela 2.10 – Classificação dos materiais segundo Gamble (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998)	10
Tabela 2.11 – Espessura de camadas para a construção dos aterros segundo Lutton (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998)	11
Tabela 2.12 – Valores médios dos resultados dos ensaios de laboratório realizados na fase de projeto (Coba, 1990, ref. por Luzia, R. C., 1998)	12
Tabela 2.13 – Valores médios dos resultados dos ensaios de caraterização realizados durante a obra (Luzia, R. C., 1998)	12
Tabela 2.14 – Valores médios dos resultados do controle de compactação realizado durante a obra (Luzia, R. C., 1998)	13
Tabela 2.15 – Resultados das sondagens realizadas na fase de projeto (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998)	14
Tabela 2.16 – Valores médios dos resultados dos ensaios de caraterização realizados na fase de projeto (Luzia, R. C., 1998)	15
Tabela 2.17 – Classificação unificada (ASTM, 1997), para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970) e LCPC/SETRA dos materiais (LCPC/SETRA, 1992) (Luzia, R. C., 1998)	15

Tabela 2.18 – Designação e localização das amostras sobre as quais se realizaram os ensaios de laboratório (Luzia, R. C., 1998)	17
Tabela 2.19 – Resultados da análise granulométrica, coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura do material (Luzia, R. C., 1998)	18
Tabela 2.20 – Resultados dos limites de consistência (Luzia, R. C., 1998)	18
Tabela 2.21 – Resultados do ensaio Proctor modificado (Luzia, R. C., 1998).....	19
Tabela 2.22 – Resultados do ensaio CBR com embebição (Luzia, R. C., 1998).....	19
Tabela 2.23 – Resultados do ensaio de equivalente de areia (Luzia, R. C., 1998).....	19
Tabela 2.24 – Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno (Luzia, R. C., 1998).....	20
Tabela 2.25 – Resultados do ensaio de fragmentabilidade (Luzia, R. C., 1998).....	20
Tabela 2.26 – Resultados do ensaio de degradabilidade (Luzia, R. C., 1998).....	21
Tabela 2.27 – Resultados do ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles (Luzia, R. C., 1998)	21
Tabela 2.28 – Resultados do ensaio de desgaste em meio húmido (Luzia, R. C., 1998).....	21
Tabela 2.29 – Classificações unificada e para fins rodoviários (Luzia, R. C., 1998) ..	22
Tabela 3.1. – Regras gerais, baseadas na classificação unificada, para utilização de solos em aterros (EP, 2009).....	30
Tabela 3.2 – Solo para aterro: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)	31
Tabela 3.3 – Materiais rochosos para aterro: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)	32
Tabela 3.4 – Materiais do tipo solo-enrocamento para aterro: características o requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)	33
Tabela 3.5 – Solo para leito de pavimento: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009).....	34
Tabela 3.6 – Materiais granulares britados para leito de pavimento: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)	35
Tabela 3.7 – Agregado britado de granulometria extensa para sub-base: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2012).....	36
Tabela 3.8 – Agregado britado de granulometria extensa para base: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2012)	36
Tabela 4.1 – Classificação do material com base no “Vam” (adapt. De Pereira e Picado-Santos, 2002, ref. por Luzia, R.C., 1998).....	41
Tabela 4.2 – Classificação do material com base no EA	42

Tabela 4.3 – Critério de durabilidade para rochas segundo Gamble (Gamble, 1971)	47
Tabela 4.4 – Peneiros de barra a utilizar de acordo com a fração granulométrica a ensaiar	48
Tabela 5.1 – Valores médios dos resultados da análise granulométrica segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966a).....	52
Tabela 5.2 – Valores médios dos resultados da análise granulométrica segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a).....	53
Tabela 5.3 - Resultados dos limites de consistência e índice de plasticidade, norma NP 143 (IGPAI, 1969).....	54
Tabela 5.4 - Resultados do ensaio de desgaste em meio húmido.....	56
Tabela 6.1 – Caraterísticas a apresentar pelos materiais granulares britados segundo o manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995) e caraterísticas apresentadas para a amostra em estudo. 60	
Tabela 6.2 – Solo para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	60
Tabela 6.3 – Materiais rochosos para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009).....	61
Tabela 6.4 – Materiais do tipo solo-enrocamento para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	61
Tabela 6.5 – Solo para leito de pavimento: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009).....	62
Tabela 6.6 – Materiais granulares britados para leito de pavimento: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	63
Tabela 6.7 – Agregado britado de granulometria extensa para sub-base: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2012)	64
Tabela 6.8 – Agregado britado de granulometria extensa para base: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2012)	65
Tabela 6.9 – Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no lanço IP3 - Raiva / Gestosa – Lanço Nó da Raiva – Santa Comba Dão em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo.....	66
Tabela 6.10 – Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Albergaria-a-Velha / Viseu em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo.....	67
Tabela 6.11 – Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Troço Sertã / Proença-a-Nova em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo.....	68

Tabela 6.12 – Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6 em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo.....69

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BG	Base granular
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CE	Caderno de Encargos
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
EP	Estradas de Portugal, S. A.
IC	Itinerário Complementar
IGPAI	Inspeção Geral de Produtos Agrícolas e Industriais
IP	Itinerário Principal
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LCPC	<i>Laboratoire Central des Points et Chaussées</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
Máx	Máximo
Min	Mínimo
NF	Norma Francesa
NP	Norma Portuguesa
SbG	Sub-base granular
SETRA	<i>Service d'Études Techniques des Routes et des Aérodrômes</i>

Lista de símbolos

Cc	Coeficiente de curvatura
CR	Compactação relativa
CR _{méd}	Compactação relativa média
Cu	Coeficiente de uniformidade
D	Perda de desgaste pela máquina de <i>Los Angeles</i> (especificação LNEC E 237 (LNEC, 1970a))
DG	Coeficiente de degradabilidade
d _i	Diâmetro inferior
D _i	Diâmetro superior
D _{máx}	Dimensão máxima das partículas
DP	Desvio padrão
e	Índice de vazios
E(x)	Valor médio
EA	Equivalente de areia
f	Teor de finos
f'	Porcentagem de finos
F _i	Classe de fundação
FI	Índice de achatamento
FR	Coeficiente de fragmentabilidade
G	Granulometria
g	Gramas
GC	Grau de compactação
H	Horizontal
Id _j	Índice de desgaste em meio húmido
IG	Índice de grupo
IP	Índice de plasticidade
kg	Quilograma
km	Quilómetro
LA	Coeficiente de <i>Los Angeles</i> (norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c))

m	Metro
MB	Valor de azul de metileno
M _{DE}	Coefficiente micro- <i>Deval</i> com agregados húmidos
M _{DS}	Coefficiente micro- <i>Deval</i> com agregados secos
P _i	Percentagem de material passado no peneiro de malha i
SE	Valor do equivalente de areia (norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002a))
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TMDA _P	Tráfego médio diário anual de veículos pesados
V	Vertical
V _{am}	Valor de adsorção de azul de metileno
w	Teor em água
w _L	Limite de liquidez
w _{méd}	Teor em água médio
w _{ót}	Teor em água ótimo
w _P	Limite de plasticidade
γ	Peso volúmico
γ _{d máx}	Peso volúmico seco máximo
γ _d	Peso volúmico seco
γ _{d in situ}	Peso volúmico seco <i>in situ</i>
γ _s	Peso volúmico das partículas sólidas

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais

Em Portugal, os pavimentos rodoviários, nomeadamente as suas camadas não ligadas, são construídos, maioritariamente, com agregados naturais, geralmente britados. Grande parte da exploração de agregados que ocorre a nível nacional, com as consequências económicas e impactes ambientais daí resultantes, é para utilização neste tipo de estruturas.

Por todo o País existem indústrias extrativas de rocha com produção elevada de escombrelras, as quais levantam sérios problemas ambientais e cujos materiais poderiam, eventualmente, ser utilizados nas camadas não ligadas bem como na fundação de pavimentos rodoviários.

Um exemplo desta situação ocorre no denominado núcleo de pedrelras do Poio, Vila Nova de Foz Côa, em pleno Parque Arqueológico do Vale do Côa, onde os materiais xistosos são extraídos produzindo um grande volume de escombrelras.

1.2 Objetivos e metodologia

O impacte ambiental provocado pelas escombrelras na zona das pedrelras do Poio considerou-se elevado, pelo que se entendeu importante a correção daquela situação, desenvolvendo-se o trabalho que agora se apresenta, tentando contribuir para o aproveitamento deste tipo de material e consequentemente para a melhoria da zona envolvente a estas pedrelras.

Este trabalho tem como principal objetivo a avaliação do comportamento geotécnico dos materiais xistosos das escombrelras do núcleo das pedrelras do Poio com vista à sua utilização em pavimentos rodoviários, à luz de especificações portuguesas e norte-americanas, nomeadamente a especificação LNEC E 240 – 1970: “Solos. Classificação para fins rodoviários” (LNEC, 1970b), a norma ASTM D 2487-00: “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” (ASTM, 2001), o manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995) e o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012).

Para cumprir este objetivo procedeu-se à recolha de material numa das pedrelras do denominado núcleo das Pedrelras do Poio e procedeu-se à sua caracterização geotécnica em laboratório, de acordo com o estipulado nas especificações usadas em Portugal.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, cujos conteúdos se apresentam de seguida.

A este capítulo inicial no qual se faz uma breve introdução ao trabalho desenvolvido, segue-se o capítulo 2, onde se faz uma apresentação de alguns pavimentos em Portugal em cuja construção foi utilizado material xistento.

No capítulo 3, faz-se a apresentação de especificações geralmente utilizadas em Portugal, nomeadamente especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012), manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995) e a norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001), as quais dão indicação das características dos materiais a utilizar em aterro, leito do pavimento e camadas granulares não ligadas de pavimentos rodoviários.

O capítulo 4 diz respeito aos ensaios de laboratório que foram realizados no âmbito do presente trabalho, dos quais se faz uma breve apresentação.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados dos ensaios do estudo experimental realizado.

No capítulo 6 faz-se a análise dos resultados obtidos, sua classificação e comparação com o requerido nas especificações apresentadas no capítulo 3 e avalia-se a viabilidade de aplicação dos materiais em pavimentos rodoviários. Neste capítulo faz-se ainda a comparação dos resultados obtidos com os dos trabalhos apresentados no capítulo 2.

Por último, no capítulo 7, apresentam-se as conclusões gerais incluindo algumas recomendações para a utilização destes materiais em pavimentos rodoviários.

2. A utilização de xisto na construção de estradas em Portugal

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo pretende fazer-se o levantamento e respetiva análise das principais estradas construídas em Portugal nas últimas décadas, nas quais se utilizou material pertencente ao denominado complexo xisto-grauváquico.

O complexo xisto-grauváquico aflora na zona centro-Ibérica, pelo que, pode encontrar-se desde o Vale do Douro até à Beira Baixa, passando pela Beira Litoral e pela Beira Alta, numa banda, com continuação em Espanha, que a sul do afloramento coincide, aproximadamente, com a falha Porto – Coimbra - Badajoz – Córdoba.

Nas últimas décadas foram construídas várias estradas na zona centro do país, em que os aterros foram realizados com os materiais escavados na própria linha.

Analisar-se-ão apenas alguns casos porque, após várias tentativas, não foi possível a obtenção dos elementos de algumas construções de estradas mais recentes.

Alguns ensaios e características que irão ser referidos neste capítulo encontram-se descritos nos capítulos 4 e 5.

2.2 Construção do lanço IP3 - Raiva / Gestosa - Lanço Nó da Raiva - Santa Comba Dão

Este lanço do IP3, com cerca de 19 quilómetros, consiste, principalmente, no alargamento do traçado do IP3 existente e na construção de duas variantes – Variante do Chamadouro (km 12+000 a km 13+500) e variante do Rojão Grande (km 14+700 a km 18+525).

Este subcapítulo contempla uma breve referência aos estudos realizados no âmbito do projeto de execução, seguindo-se de uma análise da fase de construção.

Os materiais do complexo xisto-grauváquico encontram-se ao longo de quase todo o traçado, até às proximidades do km 15+000, aparecendo, também, recortados por depósitos recentes (Coteprol, 1991, ref. por Luzia, R. C., 1998).

A prospeção geotécnica realizada com vista à elaboração do Estudo Geológico - Geotécnico (Coteprol, 1991, ref. por Luzia, R. C., 1998) consistiu, essencialmente, em prospeção geofísica, sondagens mecânicas e poços.

Com base no conhecimento geológico da superfície, nos trabalhos de prospeção e nos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização, realizados sobre o material recolhido nos poços, foi possível descrever as características mais importantes dos materiais, as quais se apresentam nos pontos seguintes (Coteprol, 1991, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Segundo Luzia, R. C, 1998, foram recolhidas trinta amostras de material xisto-grauvacóide, dos poços de reconhecimento, sobre as quais foram efetuados ensaios de caracterização e obtiveram-se os resultados que constam na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Resultados dos ensaios de caracterização obtidos em fase de projeto (Coteprol, 1991, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Classificação para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970)	N.º de amostras	γ_d máx (kN/m ³)	W _{opt} (%)	CBR (%)	
				W _{opt} 88<GC<100	95% γ_d máx
A-1-a	1	-	-	-	-
A-2-4 (0)	6	21,5; 19,7	8,0; 9,0	5-25	10
A-2-6	8	19,0	12,0	3;6;25	6
A-2-7	6	18,7-19,2	11,0-15,0	2-13	5-7
A-4 (5)	2	18,3	15,0	5; 11; 21	7-8
A-7-5	2	-	-	-	-
A-7-6	5	17,3-18,1	15,0-16,0	3-11	4-5

De acordo com os resultados obtidos pode concluir-se que os materiais poderiam ser usados na execução de aterros. Os que revelaram maior alteração deveriam ser colocados em zonas do corpo dos aterros ou, simplesmente, ser recusados.

Na sequência das características do material existente ao longo do traçado, seguindo as indicações de projeto, os materiais foram escavados somente recorrendo a equipamento mecânico, e foram apenas utilizados na construção de aterros, embora apenas no corpo do aterro e não no leito do pavimento. Para a execução do leito do pavimento foram utilizados solos selecionados (Luzia, R. C., 1998).

Para análise dos materiais provenientes da escavação, com vista à sua utilização em aterro, recorreu-se a ensaios laboratoriais de caracterização. Os resultados desses ensaios apresentam-se na tabela 2.2, e referem-se a dezassete amostras, provenientes, essencialmente, dos materiais usados em aterros nas variantes de Chamadouro e Rojão Grande (Luzia, R. C., 1998).

Luzia, R. C. em 1998, refere que das amostras ensaiadas, apenas foi possível clarificar doze, uma vez que para algumas delas não se realizaram ensaios de identificação. Segundo a Classificação para Fins Rodoviários (LNEC E 240, 1970), uma foi classificada como A-4-1 (0), três como A-2-4 (0), duas como A-6, com um índice de grupo de 0 e 2, quatro como A-7-5, com índices de grupo de 4, 10 e 19 e duas como A-7-6 (1).

A espessura média adotada para as camadas na construção dos aterros foi de 40 cm. A compactação das mesmas foi executada com recurso a cilindros vibradores de rasto liso e, por vezes, a cilindros de pneus (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.2 - Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização realizados no decorrer da obra (Luzia, R. C., 1998)

Ensaio		Máx.	Min.	E(x)	D.P.
w _L (%)		64	27	43,6	13,0
w _p (%)		43	17	27,9	8,3
IP (%)		28	8	15,7	6,4
EA (%)		14	3	11,3	3,9
GRANULOMETRIA	P _{2"} (%)	100,0	100,0	100,0	-
	P _{1" ½} (%)	100,0	91,3	98,76	3,29
	P _{1"} (%)	100,0	77,7	91,99	6,78
	P _{¾"} (%)	100,0	64,4	88,07	10,32
	P _{½"} (%)	100,0	50,7	82,83	18,15
	P _{¾"} (%)	100,0	46,2	82,35	16,14
	P ₄ (%)	99,7	34,7	71,82	20,13
	P ₁₀ (%)	100,0	25,5	66,47	23,17
	P ₂₀ (%)	97,9	18,6	61,09	24,24
	P ₄₀ (%)	95,6	15,3	56,55	24,30
	P ₆₀ (%)	87,9	13,6	48,72	20,74
	P ₁₀₀ (%)	89,4	12,0	48,18	21,23
	P ₂₀₀ (%)	83,2	10,7	43,68	19,40
	COMP.	γ _{dmáx} (kN/m ³)	20,4	16,6	19,19
w _{ot} (%)		17,8	9,4	11,85	2,61
CBR (%)		15	10	12,5	3,54
Expansibilidade (%)		3	0	1,5	1,6

Segundo Luzia, R. C. em 1998, durante a execução dos aterros, o controlo de compactação foi efetuado através do nucleodensitómetro, sendo que os resultados obtidos apresentam-se na tabela 2.3. Estes resultados, referem-se, essencialmente, a materiais usados em aterros nas variantes de Chamadouro e Rojão Grande.

Tabela 2.3 - Valores médios dos resultados do controlo de compactação realizados no decorrer da obra (Luzia, R. C., 1998)

Ensaio	Máx.	Min.	E (x)	D.P.
Cota (m)	-0,2	-9,4	-2,68	2,18
γ (kN/m ³)	22,1	19,1	20,75	0,62
W (%)	16,4	7,8	11,97	1,99
γ _{dmáx} (kN/m ³)	20,4	18,0	19,32	0,71
γ _{dinsitu} (kN/m ³)	20,0	16,7	18,53	0,73
GC (%)	100	90	95,9	1,9
γ _s (kN/m ³)	22,3	19,5	21,05	0,59
e	0,20	0,08	0,137	0,026

As inclinações adotadas para os taludes de escavação obtidos nestes materiais foram de 1:1; 1,5:1 e 1:1,5 (V:H), em função da altura e desenvolvimento dos taludes, da atitude das discontinuidades, xistosidade e diaclases e do grau de alteração do material. Para os taludes

com altura superior a 10 metros executaram-se banquetas, de modo a diminuir-se a inclinação média dos mesmos (Luzia, R. C., 1998).

Para a execução dos taludes de aterro adotaram-se, de um modo geral, inclinações de 1:1,5 (V:H) (Luzia, R. C., 1998).

2.3 IP5 - Troço Albergaria-a-Velha / Viseu

O traçado do troço Albergaria-a-Velha – Viseu, do IP5, desenvolve-se, em grande parte, dentro do complexo xisto-grauváquico.

Dado que, nos primeiros cinco quilómetros, junto a Albergaria-a-Velha, se detetaram diferentes materiais xistosos, procedeu-se, ao estudo dos mesmos (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Os elementos que se apresentam incluem resultados da fase de projeto, da fase de obra e obtidos em ensaios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil no âmbito de um projeto de investigação (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Os estudos geotécnicos realizados durante a elaboração do projeto de execução, consistiram num reconhecimento de superfície ao longo do traçado, seguido de prospeção geotécnica, na qual foram desenvolvidos perfis sísmicos de refração, sondagens por trado e à percussão e ainda ensaios laboratoriais de caracterização sobre as amostras recolhidas em sondagens efetuadas. Os resultados destes ensaios encontram-se referidos na tabela 2.4 (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados durante a fase de projeto (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Trado / Sond. à Percussão	km	Prof. (m)	Matéria Orgânica (%)	Granulometria (%)			Limites de consistência			Class. Fins Rodoviários (Espec. LNEC E 240, 1970)
				< n°10	< n°40	< n°200	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	
T ₁	0+450	0,0-0,3	3,9	81,7	69,2	57,6	54	42	12	A-7-5 (7)
T ₆	1+680	0,0-0,6	-	85	71,5	65,5	55	41	14	A-7-5 (10)
SP ₆	1+760	2,0-2,3	-	-	-	-	35	19	16	-
SP ₇	1+760	2,0-2,3	-	-	-	-	35	21	14	-
T ₁₁	4+450	0,0-0,3	2,5	73,5	47,5	31,3	39	21	18	A-2-6 (1)
		0,3-1,1	-	84	58,3	38,4	37	23	14	A-6 (2)
T ₁₂	4+930	0,0-1,5	-	76,5	60,6	46,4	51	35	16	A-7-5 (5)

O Complexo Xisto-Grauváquico ante-ordovícico foi definido, até ao km 5+225 do traçado, como uma formação xisto-argilosa, uma vez que evidenciava um acentuado metamorfismo e se encontrava, à superfície, bastante alterado e fraturado.

Com base nos resultados obtidos nos vários trabalhos de prospeção realizados, o projetista apresentou as conclusões e recomendações que a seguir se indicam (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998):

- As formações xistosas, quer in situ, quer utilizando-as como material de aterro, são na sua generalidade satisfatórias para servir de leito do pavimento – a análise revela a existência de materiais predominantemente classificados como A-6 e A-7, o que não corresponde à realidade, visto terem sido previamente triturados para permitirem a realização de ensaios como se de solos se tratasse;
- O valor obtido para o teor de matéria orgânica ronda os 3%, limite a partir do qual é aconselhável a decapagem. É aconselhável a utilização deste material como revestimento de taludes;
- Todos os solos são reutilizáveis, desde que se verifiquem as seguintes especificações, relativamente ao ensaio de *Proctor* Modificado (Luzia, R.C., 1998):
 - Compactação relativa mínima de 90%, exceto no último quilómetro que deverá ser de 95%;
 - Desvios máximos do teor em água em relação ao ótimo entre -2% e +2%.

Segundo Luzia, R. C, 1998, todos os materiais xistosos disponíveis foram, tal como sugerido no projeto de execução, utilizados na construção de aterros.

Aquando da construção, e tendo em vista um melhor conhecimento das características dos materiais xistosos que iriam ser utilizados, procedeu-se à recolha de amostras sobre as quais foram realizados ensaios de caracterização (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998). Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados durante a obra (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Ensaio		Localização (km)		
		0+400	1+780	4+400
w _L (%)		41	45	35
w _p (%)		28	27	26
IP (%)		13	18	9
GRANUL.	P ₄ (%)	72	82	59
	P ₁₀ (%)	60	75	45
	P ₄₀ (%)	44	66	29
	P ₂₀₀ (%)	35	57	20
COMP.	γ _{dmáx} (kN/m ³)	18,8	17,9	20,1
	w _{ot} (%)	14,2	16,0	13,2
CBR (%)		5 - 10	2 - 5	20 - 25
Expansibilidade (%)		2	9	-
Class. Fins Rodov. (Espec. LNEC E 240, 1970)		A-7-5 (2)	A-7-6 (8)	A-2-4 (0)

Luzia, R.C. em 1998, refere que devido a algumas das características apresentadas, nomeadamente no que diz respeito à plasticidade e expansibilidade, os materiais xistosos escavados para utilização em leito do pavimento foram sujeitos a tratamento com cal, tendo-se, em alguns locais, recorrido à utilização de solos selecionados, de acordo com o indicado na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Constituição do leito do pavimento (espessuras) nos cinco quilómetros iniciais do IP 5 (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Localização (km)	Material tratado com cal (% de cal)	Solos selecionados (m)	Areia (m)
0+100 – 0+275	-	0,25	0,10
0+275 – 0+700	4,0	-	0,10
0+700 – 1+000	-	0,35	-
1+000 – 1+350	4,0	-	0,10
1+350 – 1+650	-	0,35	-
1+650 – 1+900	-	0,30	0,10
1+900 – 2+770	-	0,35	-
2+770 – 3+100	3,5	-	0,10
3+100 – 3+650	-	0,25	0,10
3+650 – 3+950	3,5	-	0,10
3+950 – 5+000	3,5	-	0,05

Na construção dos aterros, as camadas com espessuras da ordem de 0,50 m, foram compactadas com recurso a cilindros motorizados vibradores com pesos estáticos de 147,2 kN e 116,7 kN e, no fundo de caixa e coroamento, com cilindros de pneus com peso estático de 343,4 kN. De acordo com este equipamento de compactação foram efetuadas seis, oito e oito a dez passagens, respetivamente (Luzia, R.C., 1998).

O controlo das características de compactação dos aterros, em fase de construção é apresentado na tabela 2.7.

Ao longo dos cinco quilómetros, a estrutura do pavimento adotada é a seguinte (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998):

- camada de desgaste (betão betuminoso) – 0,05 m;
- camada de regularização (binder)- 0,06 m;
- macadame betuminoso – 0,11 m;
- base (agregado britado de granulometria extensa) – 0,20 m;
- sub-base (saibro granítico) – 0,15 m.

Segundo Luzia, R. C, em 1998, inserido no projeto de investigação anteriormente mencionado, foram realizados, no LNEC, ensaios sobre três materiais diferentes para caracterização e análise da evolução granulométrica dos mesmos com as operações de colocação em obra.

Na tabela 2.8, apresenta-se a localização da recolha de duas amostras para cada um dos materiais.

Tabela 2.7 - Características de compactação exibidas pelos aterros (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Material utilizado (km)	Localização (km)	Características do aterro		Valores de obra			
		Altura aproximada (m)	Nº camadas controladas	$\sigma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w _{ot} (%)	(CR) _{méd} (%) (Δ Cr)	w _{méd} (%) (Δ w)
0+300	0+075	4	3	18,4	13	97,3 (2,2)	11,1 (1,3)
	0+925	21	20	19,3	12,6	94,3 (2,1)	12,7 (1,3)
1+800	1+500	11	10	17,7	17	96,1 (2,5)	16,4 (3,3)
	2+300	5	4	18,4	14,5	93,9 (1,0)	15,4 (1,5)
4+450	4+000	3	4	20	12,2	92,7 (1,2)	12,9 (0,8)
	4+850	7	5	20	12,2	95,4 (2,4)	12,7 (0,9)

Tabela 2.8 - Localização dos materiais do IP5 ensaiados (Luzia, R.C., 1998)

Material	Localização (km)	Profundidade (m)
272	0+250	1,5
269	1+800	2
271	4+400	1

De cada um dos materiais referidos, como atrás mencionado, foram recolhidas duas amostras, correspondendo a material da jazida no talude e a material do leito de pavimento em zona de aterro. Dadas as características do material a seguir mencionadas, verificou-se que, na sua maioria, pertencem à jazida no talude (Luzia, R. C., 1998).

Dos ensaios realizados, na tabela 2.9, apresentam-se os resultados para a análise granulométrica, limites de consistência e/ou equivalente de areia, Slake-Durability Test, ensaio de carga pontual, ensaio de compactação e ensaio de CBR (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Segundo *Gamble*, em 1971, os materiais foram classificados (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998) como indicado na tabela 2.10.

Em relação à espessura das camadas, de acordo com o recomendado por Lutton R. J., 1977 e adotando os critérios de limitar os assentamentos do aterro, os valores obtidos foram os referenciados na tabela 2.11 (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998).

Tabela 2.9 - Resumo dos principais resultados dos ensaios realizados sobre os materiais 272, 269 e 271 (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Ensaio		Amostra		
		272	269	271
w _L (%)		41	54	39
IP (%)		18	26	Não Plástico
EA (%)		-	-	15
GRANUL.	D _{máx} (mm)	76,2	76,2	76,2
	P ₄ (%)	56	72	47
	P ₄₀ (%)	42	61	27
	P ₂₀₀ (%)	34	58	20
COMP.	γ _{dmáx} (kN/m ³)	18,8	17,9	18,6
	w _{ot} (%)	12,5	13,4	14
CBR (%)		12	2	23
Expansibilidade (%)		4	13	2
SLAKE	Meio seco (Id ₂) _s (%)	74,1	72	93,9
	Meio aquoso (Id ₂) _i (%)	46,6	35,6	75,2
I _{r méd} (MPa)*	Paralelo Xistosidade	-	-	0,36
	Perpend. Xistosidade	-	-	0,26
CLAS.	Unificada (Norma ASTM D 2487 - 93, 1997)	GC - Cascalho argiloso	CH - Argila gorda cascalhenta	GM - Cascalho com silte
	Fins Rodovi. (LNEC E 240, 1970)	A-7-6 (2)	A-7-6 (14)	A-2-4 (0)

*Resistência à carga pontual média

Tabela 2.10 - Classificação dos materiais segundo *Gamble* (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998)

Amostra	Id ₂ (%)	IP (%)	Classificação
272	47	18	Material de baixa durabilidade e média plasticidade
269	36	26	Material de baixa durabilidade e alta plasticidade
271	75	Não Plástico	Material de média durabilidade e plasticidade nula

Tabela 2.11 - Espessura de camadas para a construção dos aterros segundo Lutton (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R.C., 1998)

Amostra	Id ₂ (%)	Espessura máxima (m)	
		Total	Segundo o critério de assentamento
272	47	0,76	0,54
269	36	0,71	0,45
271	75	0,76	0,73

Uma vez que se concluiu estar perante um material de baixa a média durabilidade, logo desagregável, as recomendações práticas de Strohm et al (Strohm Jr., W. E.; Bragg Jr., G. H.; Ziegler, T. W., 1978, ref. por Luzia, R.C., 1998) indicam, para os taludes dos aterros, inclinações não superiores a 1:2 (V:H), reduzindo para 1:3 (V:H) junto às obras de arte (Lucas, F. J. F., 1981, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Foram, ainda, realizados outro tipo de ensaios e análise para este material, mas não irão ser abordados neste trabalho.

2.4 IC8 - Troço Sertã / Proença-a-Nova

No troço Sertã / Proença-a-Nova do IC8, com cerca de dezanove quilómetros, a principal formação geológica intersectada é o “complexo xisto-grauváquico” ante-ordovícico. Embora não sejam, aqui, analisados, sobre esta formação encontram-se materiais mais recentes de origem sedimentar, solos residuais e depósitos coluvionares, os quais são também intersectados, mas numa menor extensão (Luzia, R. C., 1998).

Os estudos, com vista à caracterização geotécnica do material a ser atravessado pelo traçado deste troço, consistiram, na fase de projeto, na execução de perfis sísmicos de refração, poços e sondagens mecânicas de furação à percussão e/ou rotação (Coba, 1990, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Dos poços abertos foram recolhidas 14 amostras sobre as quais se realizaram ensaios laboratoriais de identificação. Sobre oito dessas amostras foram, ainda, realizados ensaios de compactação (*Proctor* Modificado) e CBR. Os resultados desses ensaios encontram-se na tabela 2.12 (Luzia, R. C., 1998).

O valor CBR dos solos ensaiados, para um grau de compactação próximo dos 100% e teores em água entre -1,9% e +1,5% do ótimo, variou entre 16% e 48%. Para cerca de 95% da compactação pesada e teores em água compreendidos entre -0,6% e +0,8% do ótimo, o valor CBR variou entre 13% e 34% (Luzia, R. C., 1998).

Segundo Luzia, R. C., 1998, das catorze amostras ensaiadas verificou-se que, de acordo com a classificação unificada (ASTM, 1997), dez foram classificadas como GC – cascalho argiloso, quase sempre com a presença de areia, duas foram classificadas como SC – areia argilosa, e as restantes duas como ML-CL – Silte cascalhento com areia e GM – cascalho siltoso. Segundo a classificação para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970), oito amostras pertencem ao grupo A-2-6, com índices de grupo a variar de 0 a 1, duas ao grupo A-6, uma ao grupo A-7-6 e a última ao grupo A-1-a.

Luzia, R. C., em 1998, refere que ao longo do traçado, nalguns núcleos de material menos alterado, entre o km 11+300 e o km 15+500, foi necessário recorrer a desmonte com explosivos, tendo todo o restante desmonte sido efetuado com o equipamento mecânico usual.

Tal como o indicado no projeto de execução, todos os materiais escavados foram utilizados na construção de aterros, embora apenas no corpo do aterro, pelo que, para leito do pavimento se utilizaram solos selecionados (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.12 - Valores médios dos resultados dos ensaios de laboratório realizados na fase de projeto (Coba, 1990, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Ensaio	Máx.	Min.	E(x)	D.P.	
w _L (%)	49	25	32,0	5,9	
w _p (%)	28	11	19,3	4,7	
IP (%)	21	4	12,7	4,0	
GRANUL.	P ₄ (%)	100,0	16,0	51,5	22,5
	P ₁₀ (%)	100,0	24,0	46,5	20,4
	P ₄₀ (%)	70,0	18,0	36,4	14,9
	P ₂₀₀ (%)	55,0	15,0	28,3	10,8
COMP.	w _{ot} (%)	13,8	7	11,44	2,15
	σ _{dmáx} (kN/m ³)	19,7	18,2	18,81	0,48

A tabela 2.13 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização efetuados para estes materiais, aquando da sua utilização em aterros (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.13 - Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização realizados durante a obra (Luzia, R. C., 1998)

Ensaio	Máx.	Min.	E(x)	D.P.	
w _L (%)	45	21	31,1	3,6	
w _p (%)	29	10	19,9	3,2	
IP (%)	25	4	11,3	2,9	
EA (%)	38	6	18,3	3,9	
GRANUL.	P _{2"} (%)	100,0	68,0	87,06	7,82
	P _{1"} (%)	100,0	48,0	70,59	10,29
	P _{3/4"} (%)	100,0	38,0	65,54	13,06
	P _{3/8"} (%)	100,0	29,0	53,18	13,06
	P ₄ (%)	98,0	20,0	43,46	12,52
	P ₁₀ (%)	94,0	6,0	34,35	12,00
	P ₄₀ (%)	91,0	8,0	24,63	11,33
	P ₂₀₀ (%)	77,0	4,0	17,00	9,95
COMP.	σ _{dmáx} (kN/m ³)	22	15,8	19,42	0,93
	w _{ot} (%)	16,5	6,8	11,53	2,07

Segundo Luzia, R. C., 1998, das 205 amostras, das quais se apresentam os resultados, verifica-se, de acordo com a classificação para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970), que a maioria pertence ao grupo A-2-4 (0).

Do controlo de compactação realizado durante a construção da obra, obtiveram-se os resultados que constam na tabela 2.14 (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.14 - Valores médios dos resultados do controlo de compactação realizado durante a obra (Luzia, R. C., 1998)

Ensaio	Máx.	Min.	E(x)	D.P.
γ (kN/m ³)	22,8	18,8	20,84	0,61
W (%)	18,6	4,8	11,74	2,25
$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	20,4	18,0	19,36	0,53
$\gamma_{dinsitu}$ (kN/m ³)	20,4	17,1	18,66	0,60
GC (%)	105	89	96,4	2,6
γ_s (kN/m ³)	23,2	19,0	21,15	0,65
e	0,23	0,05	0,134	0,029

Ao longo do traçado, as inclinações adotadas para os taludes de escavação foram, em geral, de 1:1,5 ou 1:1 (V:H), sendo que, apenas na escavação entre o km 8+975 e o km 9+275, se adotou uma inclinação de 1,5:1 (V:H). Estas inclinações foram adotadas de acordo com o grau de alteração e descontinuidades do material, xistosidade e diaclases. Com vista à diminuição da inclinação média do talude, para os taludes com alturas superiores a 10-11 metros, executaram-se banquetas (Luzia, R. C., 1998).

Nos taludes de aterro, as inclinações foram diferentes em função da sua altura. Assim, de um modo geral, adotaram-se, para taludes superiores a 10 – 11 metros, inclinações de 1:2 (V:H) e para taludes com alturas inferiores inclinações de 1:1,5 (V:H) (Luzia, R. C., 1998).

Foram, ainda, realizados outro tipo de ensaios e análise para este material, mas não irão ser abordados no presente trabalho.

2.5 E.N.238 Sertã (IC8) / Cernache do Bonjardim

Relativamente à E.N. 238, os dados que se apresentam dizem respeito apenas ao projeto de execução.

A zona onde se desenvolve o traçado é constituída, quase exclusivamente, por materiais do “complexo xisto-grauváquico”, os quais se encontram recortados por horizontes de terra vegetal ou depósitos coluvionares.

Para a elaboração do projeto (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998), foram realizados trabalhos de campo, nomeadamente o reconhecimento geológico da superfície,

sondagens mecânicas, poços de reconhecimento, ensaios de penetração dinâmica ligeira e perfis sísmicos. Com vista à caracterização dos materiais, sobre amostras remexidas recolhidas nos poços, foram realizados alguns ensaios de laboratório.

Os resultados obtidos a partir de seis sondagens geotécnicas realizadas, encontram-se na tabela 2.15 (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.15 - Resultados das sondagens realizadas na fase de projeto (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998)

Sond. nº	Local. (km)	Furação (m)		Litologia
		Perc.	SPT	
SP ₁	1+175	10,61	7	xistos argilosos muito alterados a decompostos (W4-5), resistentes
SP ₂	2+050	7,62	5	xistos argilosos, algo carbonosos, muito alterados a decompostos (W4-5)
SP ₃	3+425	9,11	6	xistos argilosos, com passagens de xistos carbonosos, muito alterados (W4), decompostos no topo (W5-4), cinzentos a acastanhados. Tratam-se de materiais resistentes (N=60) global ou parcialmente transformados em solo, mas com comportamento de transição rocha branda/solo rijo
SP ₄		9,15	6	
SP ₅		9,08	6	
SP ₆		9,08	6	

Dos poços realizados, foram recolhidas amostras sobre as quais se realizaram ensaios de laboratório. Além dos ensaios de caracterização usuais, foi realizado o ensaio de adsorção de azul de metileno e, sobre os materiais rochosos, os ensaios de fragmentabilidade e de degradabilidade, os quais permitiram classificar o solo através do Guia Técnico para Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992, ref. por Luzia, R. C., 1998). Os resultados de alguns ensaios realizados encontram-se na tabela 2.16.

Sobre quatro das onze amostras pertencentes ao “complexo xisto-grauváquico” ensaiadas, foram também realizados ensaios de CBR. Para valores de teor em água próximos do ótimo e compactações relativas entre 90% e 100%, os valores de CBR obtidos variam entre 18% e 45% e a expansibilidade entre 0,2% e 2,5%. Para o CBR a 95% da compactação obtiveram-se valores variáveis entre 11% e 35% (Luzia, R. C., 1998).

Segundo Luzia, R. C., em 1998, no que diz respeito ao coeficiente de fragmentabilidade, encontraram-se valores superiores a 40%.

As amostras ensaiadas foram classificadas através da classificação unificada (ASTM, 1997), da classificação para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970) e da classificação adotada no Guia Técnico para Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992), tendo-se obtido os resultados apresentados na tabela 2.17 (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.16 - Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização realizados na fase de projeto (Luzia, R. C., 1998)

Ensaio	Máx.	Min.	E(x)	D.P.	
W (%)	30	15	19,8	4,2	
w _L (%)	48	31	36,6	6,3	
w _p (%)	36	22	28,5	4,4	
IP (%)	13	1	8,2	3,6	
Vam (g/100g)	0,55	0,07	0,270	0,192	
GRANUL.	P ₁₀ (%)	69,0	10,0	34,64	20,19
	P ₄₀ (%)	64,0	7,0	31,36	19,33
	P ₂₀₀ (%)	55,0	6,0	27,09	17,19
COMP.	w _{ot} (%)	19,9	14,2	17,13	2,35
	σ _{dmáx} (kN/m ³)	17,8	16,3	17,10	0,62

Tabela 2.17 - Classificação unificada (ASTM, 1997), para fins rodoviários (LNEC E 240, 1970) e LCPC/SETRA dos materiais (LCPC/SETRA, 1992) (Luzia, R. C., 1998)

Unificada (ASTM, 1997)		Fins rodoviários (LNEC E 240, 1970)		LCPC/SETRA (LCPC/SETRA, 1992)	
Grupo	Frequência	Grupo	Frequência	Classe	Frequência
GP	1	A-1-a	1	A ₁	2
GM	4	A-1-b	1	A ₂	1
GP-GM	2	A-2-4	3	B ₅	2
GC	1	A-2-5	1	C ₁ B ₁	4
ML	3	A-2-7	2	C ₂ B ₁	2
-	-	A-4	2	-	-
-	-	A-7-5	1	-	-

Uma vez que as características do maciço nas zonas em que é necessário proceder a escavações permitem, o mesmo é 100% ripável, não sendo assim necessário recorrer a explosivos (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998).

Quanto aos materiais a escavar, e tendo em conta os resultados apresentados na tabela 2.17, é proposto no projeto de execução (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998) a utilização de todos eles na construção dos aterros, sendo que, os das classes A₁, A₂ e B₅ apenas usados no núcleo de aterros com alturas até 5 metros e após tratamento, por exemplo, com ligantes hidráulicos.

Para as camadas a compactar Luzia, R. C., 1998, recomenda espessuras na ordem dos 40 cm e a utilização de cilindros vibradores pés de carneiro, uma vez que está em presença de materiais xistosos ou deles derivados, podendo, no entanto, também ser usados vibradores de rasto liso.

As inclinações recomendadas (Estrutovia, 1997, ref. por Luzia, R. C., 1998) para os taludes de escavação variam entre 1:1,5 e 1:2 (V:H), recorrendo a banquetas sempre que o

desenvolvimento do maciço o justifique. Para os taludes de aterro recomendaram inclinações de 1:2 (V:H).

Foram, ainda, realizados outro tipo de ensaios, mas não irão ser apresentados neste estudo.

2.6 Troço Raiva - Catraia dos Poços, do atual IC6

O troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6, por se encontrar em construção em 1998, foi objeto de estudo para o trabalho de dissertação de mestrado “Fundação de pavimentos rodoviários. Estudo da utilização de materiais xisto-grauvácicos” elaborado por Luzia, R. C..

O estudo experimental foi realizado sobre materiais dali provenientes, os quais foram analisados para a sua aplicabilidade em leito do pavimento, bem como em camadas granulares dum pavimento, à luz das especificações e recomendações portuguesas, francesas e norte americanas.

O material foi caracterizado, essencialmente, quanto à sua durabilidade, dureza, plasticidade, limpeza e deformabilidade, recorrendo a ensaios de laboratório e ensaios in situ.

Segundo Luzia, R. C. em 1998, no que diz respeito ao grau de alteração, o material encontrado durante a fase de construção, e de acordo com o projeto de execução, divide-se em dois grupos. Assim, do km 0+000, coincidente com o nó da Raiva, até às proximidades do km 0+600, o material apresentou-se menos alterado e com uma coloração acinzentada, enquanto que, a partir do km 0+600 e até às proximidades do km 8+425, apresentou um grau de alteração mais elevado e uma coloração acastanhada. Ao longo dos oito quilómetros em causa, apenas no nó da Raiva houve necessidade de efetuar o desmonte recorrendo a explosivos e no restante troço o desmonte foi feito utilizando meios mecânicos correntes.

Em função do grau de alteração apresentado pelo material, da atitude da xistosidade e das diáclases que o mesmo apresentou, as inclinações dos taludes de escavação adotadas foram de 1:1, 1,5:1 e 2:1 (V:H). Ainda assim, ocorreram alguns problemas de estabilidade, nomeadamente na parte inicial da obra, o que levou a correções nas inclinações de alguns taludes (Luzia, R. C., 1998).

Luzia, R. C., 1998 refere que foi decidido, apesar do seu grau de alteração, de acordo com as indicações do projeto de execução, utilizar todo o material escavado na construção de aterros, uma vez que o material apresentou características granulométricas e de plasticidade adequadas, não sendo contudo, utilizado em leito do pavimento. Na construção deste, embora o projeto previsse para parte do traçado o tratamento dos materiais locais com cal, esta solução não foi adotada, tendo sido utilizados, ao longo de todo o traçado, solos selecionados com uma espessura aproximada de vinte centímetros.

Luzia, R. C., 1998 refere que o pavimento flexível construído apresenta a estrutura que se segue, a qual, ao contrário do que estava inicialmente previsto, foi mantida ao longo de todo o traçado:

- betão betuminoso: 5 cm
- macadame betuminoso: 12 cm
- base granular: 20 cm

- sub-base granular (material semelhante ao utilizado em leito do pavimento): 20 cm

Dado que o material ao longo do traçado apresenta algumas variações nas suas características, procedeu-se à seleção de aterros que, em princípio, essas características fossem diferentes. Foram escolhidos os aterros entre o km 5+175 e km 5+400 e o km 8+560 e km 8+700 (Luzia, R. C., 1998).

O primeiro aterro tem uma altura aproximada de cinco metros, sendo o material usado na sua construção proveniente das escavações em linha efetuadas nas suas proximidades. A classificação destes materiais pela especificação LNEC E 240 (LNEC, 1970) varia entre A-2-4(0) e A-6(5), variando o seu limite de liquidez entre 28% e 40% e o índice de plasticidade entre 9% e 16% (Luzia, R. C., 1998).

O segundo aterro tem uma altura aproximada de nove metros, sendo o material usado na sua construção proveniente das escavações em linha efetuadas entre o km 0+000 e o km 0+600. A classificação destes materiais pela especificação LNEC E 240 (LNEC, 1970) varia entre A-2-4(0) e A-2-6(1), variando o seu limite de liquidez entre 26% e 40% e o índice de plasticidade entre 7% e 13% (Luzia, R. C., 1998).

Segundo Luzia, R. C. em 1998, os ensaios de laboratório, efetuados no âmbito da dissertação de mestrado, realizaram-se sobre sete amostras, com exceção do ensaio triaxial cíclico que se realizou apenas sobre duas, tendo sido uma delas recolhida numa zona de escavação, ao km 5+100, e as restantes seis recolhidas nos dois aterros selecionados. Na tabela 2.18 apresentam-se a designação e a respetiva localização das sete amostras.

Tabela 2.18 - Designação e localização das amostras sobre as quais se realizaram os ensaios de laboratório (Luzia, R. C., 1998)

Designação	Localização	Escavação / Aterro
391	km 5+100	Escavação
392	km 5+225	Aterro
393	km 5+275	Aterro
394	km 5+300	Aterro
395	km 8+575	Aterro
396	km 8+600	Aterro
397	km 8+625	Aterro

Os resultados da análise granulométrica realizada sobre cada uma das amostras encontram-se na tabela 2.19 (Luzia, R. C., 1998).

Os valores correspondentes aos limites de consistência e índice de plasticidade respetivo encontram-se na tabela 2.20 (Luzia, R. C., 1998).

A tabela 2.21 apresenta os resultados do ensaio de compactação pesada ou ensaio *proctor* modificado. Nas amostras 392 e 397 o ensaio realizou-se apenas sobre quatro provetes e nas restantes sobre cinco provetes (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.19 - Resultados da análise granulométrica, coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura do material (Luzia, R. C., 1998)

Peneiro		Abert. (mm)	Amostra							E(x)	D.P.
			391	392	393	394	395	396	397		
% Passados	P _{3"} (%)	76,20	100,0	79,7	72,3	76,1	73,7	73,0	77,9	78,96	9,66
	P _{2"} (%)	50,80	80,7	73,4	58,6	65,2	64,9	64,7	59,4	66,70	7,85
	P _{1"1/2} (%)	38,10	78,5	67,4	52,2	61,6	56,0	61,3	53,0	61,43	9,24
	P _{1"} (%)	25,40	74,4	59,7	48,7	55,9	50,2	52,1	39,6	54,37	10,84
	P _{3/4"} (%)	19,10	64,1	54,9	44,7	51,7	44,2	47,7	34,0	48,76	9,47
	P _{1/2"} (%)	12,70	53,8	47,5	39,3	47,6	36,2	40,7	26,4	41,64	9,00
	P _{3/8"} (%)	9,520	50,5	43,9	36,7	43,4	31,9	36,2	23,3	37,99	8,93
	P _{nº4} (%)	4,760	39,3	36,0	30,1	35,8	21,8	26,3	15,9	29,31	8,49
	P _{nº10} (%)	2,000	27,4	27,9	23,8	27,7	14,3	17,7	10,2	21,29	7,22
	P _{nº20} (%)	0,840	18,1	21,4	18,3	2,0	9,9	11,8	7,1	12,66	6,95
	P _{nº40} (%)	0,420	11,0	15,5	14,1	13,4	8,3	7,7	5,1	10,73	3,83
	P _{nº80} (%)	0,177	4,1	8,4	9,4	7,6	7,5	4,0	3,1	6,30	2,50
P _{nº200} (%)	0,074	1,1	5,2	4,0	2,2	6,8	1,2	1,4	3,13	2,24	
Maior dimensão (mm)			162	190	147	182	163	200	142	169,4	21,9
C _u			44	119	260,0	140,0	48	58	28,0	99,6	82
C _c			1,0	1,2	2,1	0,7	1,9	1,7	2,8	1,63	0,72

Tabela 2.20 - Resultados dos limites de consistência (Luzia, R. C., 1998)

Limites	Amostra							E(x)	D.P.
	391	392	393	394	395	396	397		
w _L (%)	45	41	39	45	38	38	37	40,4	3,36
w _p (%)	26	23	23	25	24	19	23	23,3	2,21
IP (%)	19	18	16	20	14	19	15	17,3	2,29

Luzia, R. C., 1998 refere que o ensaio de CBR, para cada amostra, foi realizado sobre os provetes do ensaio de compactação, sem embebição. Os resultados do ensaio de CBR com embebição, realizado sobre provetes compactados para o teor em água ótimo, com algumas variações, e posteriormente sujeitos a embebição, apresentam-se na tabela 2.22.

Tabela 2.21 - Resultados do ensaio Proctor modificado (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w _{ot.} (%)
391	19,6	9,5
392	res. não credível	res. não credível
393	19,9	9,6
394	19,8	10,3
395	19,9	10,0
396	20,2	10,5
397	20,0	10,7
E(x)	19,90	10,10
D.P.	0,20	0,49

Tabela 2.22 - Resultados do ensaio CBR com embebição (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	CR (relação entre o peso volúmico obtido e o peso volúmico seco máximo)	Expansibilidade (%)	CBR (%)	CBR (%) (95% $\gamma_{dm\acute{a}x}$) (ramo húmido)	CBR (%) (95% $\gamma_{dm\acute{a}x}$) (ramo seco)
391	99	2	6	< 8	56
392	-	2	11	-	-
393	98	0	15	4	52
394	97	2	17	< 6	60
395	96	0	35	< 8	40
396	96	1	8	< 5	76
397	96	0	8	< 25	24
E(x)	97,3	1,0	14,3	-	51,3
D.P.	1,21	1,0	9,96	-	17,8

Os resultados do ensaio de equivalente de areia apresentam-se na tabela 2.23 e verifica-se que, todas elas, apresentam um valor inferior a 20%, pelo que o solo é plástico (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.23 - Resultados do ensaio de equivalente de areia (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	EA (%)
391	14
392	12
393	11
394	12
395	17
396	16
397	17
E(x)	14,1
D.P.	2,5

Na tabela 2.24 apresentam-se os resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno, correspondentes a três frações granulométricas (Luzia, R. C., 1998).

Os resultados do ensaio de fragmentabilidade, realizado segundo a norma francesa P 94-066 (AFNOR, 1992) para as granulometrias 10/20 e 40/80, apresentam-se na tabela 2.25 (Luzia, R. C., 1998).

Tabela 2.24 - Resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	Vam (0/0,074) (g/100g)	f na fr. 0/50 mm (%)	Vam (0/50) (g/100g)	f na fr. 0/76,2 mm (%)	Vam (0/76,2) (g/100g)
391	1,1	0,73	0,01	1,1	0,01
392	0,9	3,47	0,03	5,2	0,05
393	0,8	2,67	0,02	4,0	0,03
394	1,1	1,47	0,02	2,2	0,02
395	0,7	4,53	0,03	6,8	0,05
396	1,0	0,80	0,01	1,2	0,01
397	0,6	0,93	0,01	1,4	0,01
E(x)	0,89	-	0,02	-	0,03
D.P.	0,195	-	0,011	-	0,017

Tabela 2.25 - Resultados do ensaio de fragmentabilidade (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	FR (%)	
	G (10/20)	G (40/80)
391	8	20*
392	6	15*
393	3	7
394	5	8
395	2	2
396	2	5
397	2	3
E(x)**	4,0	5,0
D.P.**	2,4	2,5

* Valor obtido fora da série de peneiros recomendada na NF 94-066 (AFNOR, 1992)

** Para a granulometria 40/80, estes parâmetros foram obtidos excluindo as amostras 391 e 392

Na tabela 2.26 apresentam-se os resultados do ensaio de degradabilidade, realizado segundo a norma francesa P 94-067 (AFNOR, 1992), correspondente a duas frações granulométricas 10/20 e 40/80 (Luzia, R. C., 1998).

Segundo Luzia, R. C. em 1998, na realização do ensaio de desgaste pela máquina de *Los Angeles*, de acordo com a especificação LNEC E 237 (LNEC, 1970), foi usada na preparação dos provetes a composição granulométrica A, visto ser a mais representativa das composições granulométricas das amostras em análise. Os resultados do ensaio encontram-se na tabela 2.27.

Tabela 2.26 - Resultados do ensaio de degradabilidade (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	DG (%)	
	G (10/20)	G (40/80)
391	1	1
392	1	1
393	1	1
394	1	1
395	1	1
396	1	1
397	1	1
E(x)	1,0	1,0
D.P.	0,0	0,0

Tabela 2.27 - Resultados do ensaio de desgaste pela máquina de *Los Angeles* (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	Composição granulométrica	LA (%)
391	A	78
392	A	77
393	A	58
394	A	67
395	A	43
396	A	44
397	A	42
E(x)	-	58,4
D.P.	-	15,9

Para a realização do ensaio de desgaste em meio húmido foi seguido o procedimento sugerido em 1981, pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas ISRM,1981). Os resultados deste ensaio apresentam-se na tabela 2.28, como valores médios.

Tabela 2.28 - Resultados do ensaio de desgaste em meio húmido (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	Id _{1(méd)} (%)	Id _{2(méd)} (%)
391	90	84
392	91	86
393	94	90
394	93	89
395	99	98
396	98	97
397	99	97
E(x)	94,9	91,6
D.P.	3,8	5,7

Foram, ainda, realizados outro tipo de ensaios, nomeadamente o ensaio triaxial cíclico, ensaio de carga com o deflectómetro de impacto e ensaio de carga com placa de carregamentos repetidos, os quais não irão ser apresentados neste trabalho.

Face aos resultados obtidos, Luzia, R. C., em 1998, efetuou a análise dos materiais tendo em conta algumas especificações e recomendações portuguesas. Esta análise apresenta-se nos parágrafos seguintes.

Segundo a classificação para fins rodoviários (LNEC, 1970), pode considerar-se o comportamento do material em leito do pavimento como regular. Na tabela 2.29, apresentam-se os resultados das classificações unificada (ASTM, 1997) e para fins rodoviários (LNEC, 1970).

Tabela 2.29 - Classificações unificada e para fins rodoviários (Luzia, R. C., 1998)

Amostra	Classificação	
	Unificada (ASTM D 2487-93 (ASTM, 1997))	Fins rodoviários (LNEC E240 (LNEC, 1970))
391	GW - cascalho bem graduado com areia	A-2-7 (0)
392	GW - GC cascalho bem graduado com argila	A-2-7 (0)
393	GW - cascalho bem graduado com areia	A-2-6 (0)
394	GP - cascalho mal graduado	A-2-7 (0)
395	GW - GC cascalho bem graduado com argila	A-2-6 (0)
396	GW - cascalho bem graduado com areia	A-2-6 (0)
397	GW - cascalho bem graduado	A-2-6 (0)

Segundo as especificações portuguesas mais genéricas, LNEC E 240 (LNEC, 1970) e LNEC E 241 (LNEC, 1971), qualquer das amostras dos materiais estudados poderia ser utilizada em leito do pavimento (Luzia, R. C., 1998).

Segundo o caderno de encargos da Junta Autónoma de Estradas (JAE, 1998), a reutilização dos materiais é mais restrita, dado que a mesma não é possível como leito do pavimento ou sub-base, sendo-o apenas em aterro, embora com restrições quanto à localização dentro do mesmo, nomeadamente para as amostras 393 e 396, as quais apenas poderiam ser utilizadas no corpo do aterro (Luzia, R. C., 1998).

Segundo o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995), no que diz respeito à reutilização do material, para o CBR a 95% da compactação, o material de qualquer das amostras poderia ser utilizado em aterro. Em leito do pavimento seria possível utilizar o das amostras 391, 394 e 395, sendo o da amostra 397 admissível para essa utilização (Luzia, R. C., 1998).

Considerando o CBR obtido a partir do ensaio com embebição, verifica-se que, segundo o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995), todos os materiais são admissíveis para aterro e para leito do pavimento é possível a utilização dos materiais das amostras 391, 396 e 397, sendo a mesma utilização admissível para as restantes amostras (Luzia, R. C., 1998).

Relativamente a material granular não britado e solo selecionado, verifica-se que não seria possível utilizar nenhum dos materiais estudados como sub-base (Luzia, R. C., 1998), de acordo com as exigências do Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995).

Quando se faz uma análise da possível reutilização dos materiais, através do Guia Técnico para a Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992), o qual baseia a

caracterização e consequente classificação dos materiais, nas suas características de resistência mecânica por desgaste e fragmentação e de argilosidade, nomeadamente através de ensaios de fragmentabilidade, desgaste de *Los Angeles* e adsorção de azul de metileno, as conclusões que se tiram são um pouco diferentes. Verifica-se que qualquer das amostras dos materiais estudados poderia ser utilizada em aterro sem qualquer restrição, sob quaisquer condições meteorológicas, e em leito do pavimento, sendo, no entanto, necessário recorrer ao tratamento com ligantes hidráulicos dos materiais das amostras 391, 392, 393 e 394, ou seja, as amostras correspondentes aos materiais mais degradáveis (Luzia, R. C., 1998).

2.8 Considerações finais

Após a exposição efetuada, relativa a um conjunto de obras realizadas com materiais xistosos pertencentes ao complexo xisto-grauváquico, verifica-se que, de um modo geral, na caracterização do material quer com vista à elaboração do projeto de execução, quer na fase de construção, apenas são realizados ensaios correntes, com exceção do estudo efetuado no Troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6 no qual foram executados outro tipo de ensaios na fase de obra.

No geral, estes materiais apresentam elevada plasticidade, pelo que, dependendo do tipo de argila presente, podem ocorrer alterações no seu comportamento.

As recomendações são, quase sempre, no sentido da utilização, apenas, dos materiais de melhor qualidade, uma vez que por falta de ensaios específicos se consideram degradáveis e, quase sempre, são utilizados apenas em aterro e raramente nas zonas mais esforçadas do pavimento ou nas suas camadas granulares.

3. Especificações aplicáveis em Portugal

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo pretende efetuar-se a compilação de algumas normas, especificações e indicações usualmente utilizadas em Portugal, relativas a aplicação de material natural na construção de pavimentos rodoviyários.

A abordagem será feita sobre especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012), manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviyária nacional (JAE, 1995) e a norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001), os quais dão indicação das características dos materiais a utilizar em aterro, leito do pavimento, sub-base e base de pavimentos rodoviyários.

3.2 Especificação LNEC E 240 - 1970: “Solos. Classificação para fins rodoviyários” (LNEC, 1970b)

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização, nomeadamente, análise granulométrica e limites de consistência e tendo em conta o seu comportamento em estradas, a especificação LNEC E 240 (LNEC, 1970b) destina-se a classificar os solos e as suas misturas em grupos e subgrupos.

A classificação inicia-se pela percentagem de material que passa no peneiro de 0,074 mm ASTM, efetuando uma separação entre solos granulares e solos silto-argilosos para uma percentagem de passados no referido peneiro de 35%.

Para cada um destes tipos de solos, definem-se grupos e subgrupos que são função da granulometria, percentagens de passados nos peneiros de 0,420 mm e de 2,00 mm ASTM e da plasticidade do material, limite de liquidez e índice de plasticidade.

Finaliza-se a classificação com a determinação do índice de grupo (IG), calculado a partir da fórmula empírica ou dos ábacos presentes na referida especificação (LNEC, 1970b), os quais são função da percentagem de material passado no peneiro de 0,074 mm ASTM e dos limites de consistência. O índice de grupo dá indicação sobre a capacidade de suporte do material sob o pavimento, variando esta na razão inversa daquele, isto é, quanto mais elevado o IG menor a resistência do material. O valor pode variar entre 0 e 20.

3.3 “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. Norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001)

A classificação unificada tem por base a estabelecida por *Arthur Casagrande*, nos anos 40 para construção de aeroportos, a qual classifica os solos de origem mineral ou orgânico –

mineral para fins de engenharia com base nas características granulométricas, no limite de liquidez e no índice de plasticidade dos mesmos.

Com base nas características referidas é possível definir quinze grupos diferentes, os quais são representados por um símbolo. No entanto, a classificação do solo só fica completa quando apresentados quer o símbolo quer o nome do grupo.

Nesta classificação começa por fazer-se uma primeira divisão do material em solos grossos e solos finos, com base na percentagem de material que passa no peneiro nº 200 ASTM. Assim, se mais de 50% do material fica retido nesse peneiro será um solo grosso, se 50% ou mais passa naquele peneiro será um solo fino. Poderá, no entanto, não se enquadrar em nenhum dos casos referidos, quando o mesmo for, essencialmente, constituído por matéria orgânica, solo altamente orgânico, como é o caso da turfa.

Os solos grossos podem ainda classificar-se como cascalhos ou areias, dependendo da percentagem da fração grossa que passa através do peneiro nº 4 ASTM, sendo o limite de 50%. Quer os cascalhos quer as areias, dependendo da percentagem de finos presentes no solo, poderão ainda ser classificados como limpos ou com finos, sendo limpos no caso de estarem presentes menos de 5% de finos e com finos no caso de essa percentagem ser superior a 12%. No caso de cascalhos ou areias limpos é ainda possível fazer uma subdivisão com base nas características granulométricas do material, isto é, usando os coeficientes de uniformidade, C_u , e curvatura, C_c , os quais permitem avaliar se o material é bem ou mal graduado. Se estiverem presentes mais de 12% de finos procede-se à classificação dos finos o que permite posteriormente classificar a fração grossa. No caso da fração fina ser superior a 5% mas inferior a 12%, a classificação é feita usando dois símbolos, como indicado na norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001).

Os solos finos são classificados com base na carta de plasticidade de *Casagrande* (ASTM, 2001), construída com base no limite de liquidez, eixo horizontal, e no índice de plasticidade, eixo vertical. Nesta carta encontram-se quatro campos distintos, limitados na horizontal pelo limite de liquidez de 50% e na vertical pela denominada linha "A". Em cada um destes campos estão também incluídos os solos orgânicos, verificando-se se é um solo orgânico ou não através da relação $[w_L(\text{seco em estufa}) / (w_L(\text{sem secagem}))] < 0,75$ (ASTM, 2001). Projetando os valores do limite de liquidez e do índice de plasticidade vai cair-se num desses campos, obtendo deste modo a classificação do solo.

3.4 Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995)

O manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995) tem como objetivo apoiar e orientar a concepção das estruturas de pavimentos e respetivas fundações a adotar na construção de novas estruturas viárias.

As estruturas propostas foram definidas com base em métodos empírico – analíticos de dimensionamento de pavimentos, recorrendo a modelos de comportamento e elementos existentes resultantes da observação do comportamento de pavimentos construídos nos anos que antecederam a criação do manual.

Para definir uma estrutura de pavimento é necessário dispor de dados relativos:

- Tráfego;
- Condições climatéricas;
- Condições de fundação;
- Materiais de pavimentação.

Dentro dos limites referidos no presente manual (JAE, 1995) é possível aceitar diferentes condições para os pavimentos.

Para efeitos de dimensionamento são considerados, principalmente, dois fenômenos, o efeito do tráfego e as condições de fundação.

Quanto ao efeito do tráfego, apenas se considera o tráfego pesado, com base no tráfego médio diário anual de veículos pesados, por sentido, na via mais solicitada, (TMDA)_p, a partir do qual se definem oito classes de tráfego, T₀ a T₇.

Para as condições de fundação e sabendo qual o solo a usar em leito do pavimento é definida a classe de fundação, com base no solo presente na fundação e no solo disponível para efetuar o leito do pavimento. Assim, define-se a classe de terreno de fundação, em função da classificação unificada (ASTM, 2001a) do mesmo e do CBR, variando de S₀, para CBR < 3% a S₅, para CBR ≥ 40%.

Após a definição da classe de terreno de fundação e sabendo qual o solo a utilizar no leito do pavimento, define-se a classe de fundação, que varia de F₁ a F₄ para pavimentos cujo leito do pavimento é constituído por materiais não tratados e de F₂ a F₄ para pavimentos cujo leito do pavimento é constituído por solos tratados com ligantes hidráulicos.

A estrutura dos pavimentos rodoviários é definida a partir do conjunto de possibilidades presente neste manual (JAE, 1995), com base na classe de fundação e na classe de tráfego previamente encontradas.

As características a respeitar pelos materiais granulares britados não tratados a utilizar em camada de sub-base (SbG) e camada de base (BG), são as seguintes:

- Sub-base (SbG):
 - Granulometria: extensa;
 - Dimensão máxima do agregado: 50,0 mm;
 - Equivalente de areia mínimo: 50%;
 - *Los Angeles* máximo: 40% (granulometria B).

- Base (BG):
 - Granulometria: extensa;
 - Dimensão máxima do agregado: 37,5 mm;
 - Equivalente de areia mínimo: 50%;
 - *Los Angeles* máximo: 35% (granulometria F).

3.5 Caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012)

3.5.1 Considerações iniciais

Neste subcapítulo, segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009, EP, 2012) apresentam-se os requisitos a cumprir para utilização do material em estudo em aterro, leito do pavimento, sub-base e base de pavimentos rodoviários.

3.5.2 Vol. 14.01 - Terraplenagem. Características dos materiais (EP, 2009)

No caderno de encargos tipo obra da EP (EP, 2009) encontram-se as exigências relativamente às características dos materiais a usar em terraplenagens, nas diversas camadas, como sejam aterros e leito do pavimento, bem como os métodos construtivos para cada uma das situações.

3.5.2.1 Materiais para aterro

Os materiais a utilizar em aterros são os definidos no projeto de execução e os mesmos são provenientes da escavação na própria linha ou de empréstimos aprovados pela fiscalização.

Na parte inferior dos aterros, os materiais devem ser, de preferência, insensíveis à água.

No corpo do aterro poderão ser utilizados todo o tipo de materiais, desde que garantam e assegurem a estabilidade da obra e as deformações pós-construtivas que se venham a verificar para as condições de serviço.

Os materiais utilizados em aterro devem ter características geotécnicas que permitam atingir, logo após a sua colocação em obra, as resistências, especialmente a mecânica, que garanta a estabilidade, quase imediata, dos mesmos. Assim sendo, pressupõe-se que os materiais possam ser corretamente espalhados e compactados pelo que, é necessários que a dimensão máxima dos seus elementos permita o nivelamento das camadas e que a sua espessura seja compatível com a potência dos cilindros utilizados bem como o respetivo teor em água natural seja adequado às condições de colocação em obra.

Para a construção do corpo dos aterros, os materiais ou solos devem estar isentos de ramos, folhas, troncos, raízes, ervas, lixo ou quaisquer detritos orgânicos e a dimensão máxima dos seus elementos será, em regra, não superior a 2/3 da espessura da camada compactada.

Na parte superior dos aterros os materiais a utilizar devem ser os de melhor qualidade, de entre os provenientes da própria escavação e/ou de empréstimos.

Sempre que, por razões económicas e/ou ambientais, seja imprescindível, reutilizar solos coerentes (finos e sensíveis à água), com elevados teores em água no seu estado natural, é admissível recorrer a técnicas de tratamento com cal ou ligantes hidráulicos.

Os materiais a utilizar na construção de aterros são, do ponto de vista granulométrico, solos, materiais rochosos (enrocamento) e solo-enrocamento.

- Solos

Segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), denominam-se solos os materiais que cumpram as características granulométricas e de plasticidade.

A possível utilização dos solos em função da zona do aterro em que irão ser aplicados deverá obedecer às regras que constam na tabela 3.1, baseadas na classificação unificada de solos, de acordo com a especificação ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001).

De acordo com o definido no caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), a utilização dos solos no seu estado natural, em função da zona do aterro em que irão ser utilizados, deve cumprir com os seguintes pontos:

- Na parte inferior dos aterros, devem, de preferência, ser utilizados solos pouco sensíveis à água, pertencentes às classes S2, S3, S4 e S5 da tabela 3.1. Sempre que os aterros se situem em zonas muito húmidas ou inundáveis, ou integrem camadas drenantes, estas ou a parte inferior dos aterros, devem ser construídas com recurso a materiais com menos de 5% passados no peneiro 0,074 mm (nº 200) ASTM;
- No corpo dos aterros podem ser utilizados os solos de pior qualidade;
- Não se podem utilizar materiais rochosos para construção de terraplenos e não é permitido o recurso à utilização de materiais diferentes alternadamente de forma contínua, de modo a poder garantir-se um comportamento uniforme e contínuo do aterro;
- Na parte superior dos aterros, numa espessura entre 40 a 85 cm, devem utilizar-se os solos com melhores características geotécnicas. Nomeadamente, os materiais que satisfizerem simultaneamente as classes S2, S3, S4 e S5, da tabela 3.1 e aos grupos A-1, A-2 e A3 da classificação para fins rodoviários de acordo com o procedimento indicado na especificação E 240 (LNEC, 1970b).

Na tabela 3.2, apresenta-se o resumo das características a que os solos devem obedecer para a sua utilização em aterros.

Tabela 3.1. - Regras gerais, baseadas na classificação unificada, para utilização de solos em aterros (EP, 2009)

Classe	CBR (%)	Tipo de solo	Descrição	Reutilização		
				PIA	Corpo	PSA
S 0	< 3	OL	siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade. (1)	N	N	N
		OH	argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltes orgânicos. (2)	N	P	N
		CH	argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas. (3)	N	P	N
		MH	siltes inorgânicos; areias finas micáceas; siltes micáceos. (4)	N	P	N
S 1	≥ 3 a < 5	OL	idem (1)	N	S	N
		OH	idem (2)	N	S	N
		CH	idem (3)	N	S	N
		MH	idem (4)	N	S	N
S 2	≥ 5 a < 10	CH	idem (3)	N	S	N
		MH	idem (4)	N	S	N
		CL	argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média; argilas com seixo, argilas arenosas, areias siltosas e argilas magras.	S	S	P
		ML	siltes inorgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltes argilosos de baixa plasticidade.	S	S	P
		SC	areia argilosa; areia argilosa com cascalho. (5)	S	S	P
S 3	≥ 10 a < 20	SC	idem (5)	S	S	S
		SM-d	areia siltosa;	S	S	S
		SM-u	areia siltosa;	P	S	N
		SP	areias mal graduadas; areias mal graduadas com cascalho.	S	S	S
S 4	≥ 20 a < 40	SW	areias bem graduadas; areias bem graduadas com cascalho.	S	S	S
		GC	cascalho argiloso; cascalho argiloso com areia.	S	S	S
		GM-u	cascalho siltoso; cascalho siltoso com areia. (6)	P	S	P
		GP	cascalho mal graduado; cascalho mal graduado com areia. (7)	S	S	S
S 5	≥ 40	GM-d	idem (6)	S	S	S
		GP	idem (7)	S	S	S
		GW	cascalho bem graduado; cascalho bem graduado com areia.	S	S	S

S – admissível; N – não admissível; P – possível

PIA – parte inferior do aterro

PSA – parte superior do aterro

Tabela 3.2 - Solo para aterro: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)
Material retido no peneiro 19 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤ 30%
Classificação unificada (ASTM, 2001)	De acordo com a tabela 6.2, equivalente ao quadro 1 do CE da EP (EP, 2009)
Classificação para fins rodoviários (LNEC, 1970b)	Pertencente aos grupos A-1, A-2 e A-3

- Materiais rochosos (enrocamentos)

De acordo com o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), do ponto de vista da utilização de materiais rochosos na construção de aterros e da definição de aplicação, estes podem ser caracterizados quanto à resistência, fragmentabilidade e alterabilidade, podendo-se dividir em diversos grupos. O material em estudo pertence ao grupo das rochas magmáticas e metamórficas, o qual pode ser classificado do seguinte modo:

- Rochas duras, se a percentagem de desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC, 1970a) for inferior a 45%;
- Rochas de dureza média, se a percentagem de desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC, 1970a) for superior a 45% e o índice de fragmentabilidade (AFNOR, 1992b) for inferior a 7.
- Rochas fragmentáveis ou alteráveis, se o índice de fragmentabilidade (AFNOR, 1992b) for superior a 7.

O material a utilizar em pedraplenos deverá ser homogéneo, de boa qualidade, isento de detritos, matéria orgânica ou quaisquer substâncias nocivas, o qual deverá cumprir com as seguintes características:

- Com granulometria contínua e cumprir com as seguintes condições:
 - A percentagem máxima passada no peneiro de 25 mm (1") ASTM é de 30%;
 - A percentagem máxima passada no peneiro de 0,074 mm (nº 200) ASTM é de 12%;
 - A dimensão máxima dos blocos não pode ser superior a 2/3 da espessura da camada depois de compactada, nem a 0,80 m.
- A percentagem, em peso, das partículas lamelares ou alongadas terá que ser inferior a 30%. Para este efeito, consideram-se partículas lamelares ou alongadas as que apresentem uma dimensão máxima superior a três vezes a mínima.

Na tabela 3.3 apresentam-se, em resumo, as características a respeitar pelos materiais rochosos a utilizar em aterro segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009).

Tabela 3.3 - Materiais rochosos para aterro: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)
Desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (LNEC, 1970a)	<45%
Índice de fragmentabilidade (AFNOR, 1992b)	Não requerido, uma vez que se trata de uma rocha dura
Material passado no peneiro 25 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤30%
Material passado no peneiro 0,074 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤12%
Índice de lamelação (BSI, 1989)	<30%
Índice de alongamento (BSI, 1990)	<30%

O caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) refere que para aterros com alturas superiores a 20 metros se deve dar especial importância, entre outros, ao ensaio de desgaste em meio húmido (ISRM, 1981; Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, 1994). Refere ainda que, na parte inferior dos aterros de enrocamento, devem ser utilizados materiais pouco sensíveis à água, de dureza alta ou média e não fragmentáveis, compatíveis com as condições de utilização, e não é permitida a utilização de materiais de enrocamento provenientes de rochas argilosas fragmentáveis e alteráveis (evolutivas).

No caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) também é referido que na parte superior dos aterros de enrocamento, devem ser utilizados materiais que permitam fazer a transição entre os materiais utilizados no corpo do aterro e os materiais do leito do pavimento. Tal pode ser conseguido à custa da utilização de materiais com menor granulometria provenientes do próprio desmonte dos materiais rochosos.

- Materiais do tipo solo-enrocamento

De acordo com o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), do ponto de vista granulométrico, serão considerados materiais do tipo solo-enrocamento, os materiais de granulometria contínua e que obedeçam ao seguinte:

- A percentagem de material retido no peneiro de 19 mm (3/4") ASTM tem que estar compreendido entre 30% e 70%;
- A percentagem de material passado no peneiro de 0,074 mm (nº200) ASTM tem que estar compreendido entre 12% e 40%;
- A dimensão máxima dos blocos não pode ser superior a 2/3 da espessura da camada depois de compactada, nem a 0,40 m.

Na tabela 3.4 apresentam-se, em resumo, as características a respeitar pelos materiais do tipo solo-enrocamento a utilizar em aterro segundo o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2009).

Tabela 3.4 - Materiais do tipo solo-enrocamento para aterro: características o requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)
Material retido no peneiro 19 mm ASTM (LNEC, 1966a)	>30% e <70%
Material passado no peneiro 0,074 mm ASTM (LNEC, 1966a)	>12% e <40%

O caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) refere, que para aterros com alturas superiores a 15 metros se deve dar especial importância, entre outros, ao ensaio de desgaste em meio húmido (ISRM, 1981; Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, 1994) e ao desgaste na máquina de *Los Angeles* (LNEC, 1970a).

3.5.2.2 Materiais para leito do pavimento

Os materiais naturais a utilizar na construção do leito do pavimento são os referidos na tabela 3.1 e terão que obedecer às características que constam neste subcapítulo.

Em leito do pavimento, sempre que as condições técnico-económicas e ambientais o justifiquem, são admitidos solos tratados com cimento e/ou cal.

Os materiais a utilizar na construção do leito do pavimento são, do ponto de vista granulométrico, solos, materiais granulares não britados e materiais granulares britados. Neste estudo, uma vez que o material é britado, apenas se analisam como solo e material granular britado.

- Solos

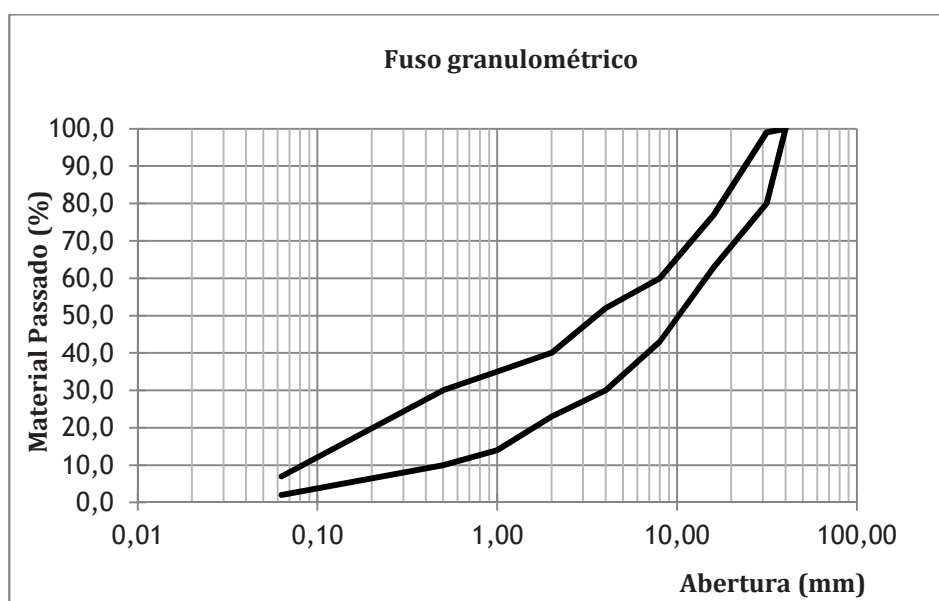
Segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), as camadas de leito do pavimento em solos, deverão ser constituídas por solos de boa qualidade, isentos de detritos, matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas, bem como deverão obedecer às características que constam na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Solo para leito de pavimento: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)
Dimensão máxima (LNEC, 1966a)	≤75 mm
Material passado no peneiro n.º200 ASTM (LNEC, 1966a)	≤20%
Limite de liquidez (IGPAI, 1969)	≤25%
Índice de plasticidade (IGPAI, 1969)	≤6%
Equivalente de areia (LNEC, 1969)	≥30%
Valor do azul de metileno (AFNOR, 1990)	≤2,0g/100g
CBR a 95% de comp. relativa e teor ótimo em água (LNEC, 1967)	≥10%
Expansibilidade (ensaio CBR) (LNEC, 1967)	≤1,5%

- **Materiais granulares britados**

Em conformidade com o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), os materiais granulares britados para leito do pavimento devem ser constituídos pelo produto de britagem de material explorado em formações homogêneas e serem isentos de argilas, de matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas, possuir uma granulometria do tipo contínuo, 0/31,5 mm (IPQ, 2000a) e deve integrar-se no fuso granulométrico que se apresenta na figura 3.1.

**Figura 3.1** - Fuso granulométrico previsto no caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009)

As restantes exigências do caderno de encargos tipo obra da EP (EP, 2009) para estes materiais são as apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Materiais granulares britados para leito de pavimento: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2009)
Desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	>35% e ≤ 40% (LA ₄₀)
Coefficiente micro- <i>Deval</i> (IPQ, 2002d)	>35% e ≤ 50% (M _{DE50})
Forma das partículas (achatamento) (IPQ, 2000b)	>20% e ≤ 35% (FI ₃₅)
Teor de finos (material que passa no peneiro de 0,063 mm) (IPQ, 2000a)	>3% e ≤ 7% (f ₇)
Equivalente de areia (IPQ, 2002a) (se a % de material passado no peneiro 0,063mm > 3%)	≥ 35%
Valor do azul de metileno (IPQ, 2002b) (Se SE≤35 o valor de Azul de metileno MB≤2,5 g/kg)	≤ 2,50 g/kg

3.5.3 Vol. 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais (EP, 2012)

No caderno de encargos tipo obra da EP (EP, 2012) encontram-se as exigências relativamente às características dos materiais a usar em camadas de pavimentos, nomeadamente as camadas granulares, base e sub-base, bem como os métodos construtivos para cada uma das situações.

Os materiais para camadas não ligadas, nomeadamente para a camada de sub-base incluem solos selecionados, agregado britado de granulometria extensa e agregado reciclado. Neste estudo, uma vez que o material é britado, apenas se irão analisar como agregado britado de granulometria extensa.

Para a camada de base os materiais indicados incluem agregado britado de granulometria extensa e agregado reciclado. Neste estudo, uma vez que o material é britado, a análise só será realizada como agregado britado de granulometria extensa.

3.5.3.1 Camada de Sub-base

- Agregado britado de granulometria extensa

Na tabela 3.7 apresentam-se as características a respeitar pelos agregados de granulometria extensa a utilizar em sub-base segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2012).

Tabela 3.7 - Agregado britado de granulometria extensa para sub-base: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2012)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2012)
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento (IPQ, 2000b)	FI ₃₅
Qualidade dos finos – Valor do equivalente de areia mínimo (IPQ, 2002a), e Valor do ensaio de azul de metileno, máximo (IPQ, 2002b)	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3% os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3%, então SE \geq 40. Caso SE<40, então MB \leq 2,5
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	45% ^{a)}
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro- <i>Deval</i> (IPQ,2002d)	M _{DE} 35

a) Como a Norma NP EN 13242 não possui a categoria LA₄₅ é indicado o valor requerido.

3.5.3.2 Camada de Base

- Agregado britado de granulometria extensa

Na tabela 3.8 apresentam-se as características a respeitar pelos agregados de granulometria extensa a utilizar na camada de base de um pavimento rodoviário segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2012).

Tabela 3.8 - Agregado britado de granulometria extensa para base: características requeridas pelo CE da EP (EP, 2012)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2012)
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento (IPQ, 2000b)	30% ^{a)}
Qualidade dos finos – Valor do equivalente de areia mínimo (IPQ, 2002a), e Valor do ensaio de azul de metileno, máximo (IPQ, 2002b)	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3% os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3%, então SE \geq 50. Caso SE<50, então MB \leq 2,0
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	LA ₄₀
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro- <i>Deval</i> (IPQ,2002d)	M _{DE} 25

a) Como a Norma NP EN 13242 não possui a categoria FI₃₀ é indicado o valor requerido.

4. Apresentação dos ensaios realizados

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se os ensaios realizados em laboratório sobre o material em estudo com vista, essencialmente, à avaliação da sua granulometria, resistência, esmagamento, achatamento, durabilidade, dureza, compactação, plasticidade e limpeza. Os ensaios que se apresentam permitem avaliar o comportamento geotécnico daqueles materiais, após britagem, com vista à sua utilização na fundação e nas camadas granulares de pavimentos rodoviários, à luz de especificações portuguesas.

4.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966a) e segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a). Este ensaio permite determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas que constituem um determinado solo.

4.3 Limites de consistência

Para a obtenção dos limites de consistência, limite de liquidez e limite de plasticidade, seguiu-se o procedimento indicado na norma portuguesa NP 143 (IGPAI, 1969).

4.4 Ensaio de compactação pesada tipo *Proctor*

O ensaio de compactação pesada em molde grande foi realizado segundo a especificação LNEC E 197 (LNEC, 1966b).

Segundo aquela especificação na compactação em molde grande apenas se deve utilizar o material passado no peneiro de 19 mm. Caso a percentagem de material retido naquele peneiro seja superior a 20% o ensaio não tem significado, caso contrário substitui-se a percentagem retida por igual massa de material passado no peneiro de 19 mm e retido no peneiro de 4,76 mm.



Figura 4.1 - Equipamento de compactação mecânica Proctor

4.5 Ensaio CBR (*California Bearing Ratio*)

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) foi realizado de acordo com o procedimento apresentado na especificação E 198 (LNEC, 1967).

4.6 Ensaio de azul de metileno

O ensaio de azul de metileno foi realizado segundo a norma NP EN 933-9 (IPQ, 2002b) e segundo o procedimento apresentado na norma AFNOR P 18 – 592 (AFNOR, 1990). O valor de adsorção de azul de metileno é um parâmetro que exprime globalmente a quantidade e qualidade de argila presente num dado solo. Na figura 4.2, pode ver-se o equipamento usado para a execução deste ensaio.



Figura 4.2 - Equipamento para ensaio do azul de metileno

O valor de azul de metileno foi obtido pelo método da mancha, realizando-se o “teste da mancha”, conforme figura 4.3, que consiste em colocar uma gota do preparado num papel de filtro normalizado e verificar se existe uma auréola azul claro no bordo da mancha.



Figura 4.3 - Gotas de preparação no papel de filtro, teste da mancha (AFNOR, 1990)

A presença da auréola azul claro traduz a existência de azul de metileno livre na preparação, indicando que todas as partículas com capacidade de adsorção estão cobertas por uma camada de moléculas daquela substância.

De acordo com a norma NP EN 933-9 (IPQ, 2002b), pretende calcular-se o valor de azul de metileno, MB. O princípio do ensaio consiste em introduzir na preparação composta por cerca de 200 g de material fino, com fração granulométrica 0/2 mm, 30 g de caulinite de MB conhecido e 500 ml de água destilada, quantidades crescentes de solução de azul de metileno na preparação até se obter a auréola azul clara no teste da mancha, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio.

O valor de MB, expresso em g de corante por kg da fração 0/2 mm, é dado pela equação 4.1.

$$MB = \frac{V_1 - V}{M_1} \cdot 10 \quad (4.1)$$

Em que:

V_1 é o volume de solução corante adicionada;

V' é o volume de solução adsorvida pela caulinite;

M_1 é a massa seca do provete de ensaio da fração granulométrica 0/2 mm.

De acordo com a norma AFNOR P 18 - 592 (AFNOR, 1990), pretende calcular-se o valor de adsorção de azul de metileno, V_{am} . O princípio do ensaio consiste em introduzir na preparação composta por cerca de 30 g de material fino, 30 g de caulinite de V_{am} conhecido e 500 ml de água destilada, quantidades crescentes de solução de azul de metileno na preparação, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio.

O valor de V_{am} , expresso em g/100g, é dado pela equação 4.2.

$$V_{am} = \frac{V_1 - V}{q} \quad (4.2)$$

Em que:

V_1 é o volume total de azul de metileno adsorvido;

V' é o volume de azul de metileno adsorvido por 30 g de caulinite;

q é a massa real de finos que se ensaia.

Pelo Guia Técnico para a Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992) o material pode classificar-se de acordo com a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação do material com base no “Vam” (adapt. De Pereira e Picado-Santos, 2002, ref. por Luzia, R.C., 1998)

<i>Vam</i> (g/100g de solo)	Classificação
$Vam \leq 0,1$	Solos insensíveis à água
$0,1 < Vam \leq 0,2$	Solos muito pouco sensíveis à água
$0,2 < Vam < 1,5$	Solos com sensibilidade à água
$Vam = 1,5$	Valor que distingue os solos areno-siltosos dos areno-argilosos
$Vam = 2,5$	Valor que distingue os solos siltosos pouco plásticos dos medianamente plásticos
$Vam = 6,0$	Valor que distingue os solos siltosos dos argilosos
$Vam = 8,0$	Valor que distingue os solos argilosos dos muito argilosos

4.7 Ensaio equivalente de areia

Neste trabalho, o ensaio Equivalente de Areia foi realizado segundo a especificação E 199 (LNEC, 1967) e segundo o procedimento apresentado na norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002a). Este ensaio tem por objetivo avaliar a quantidade dos elementos finos existentes num agregado, ou seja, avaliar o seu estado de limpeza.

O ensaio, segundo a especificação E 199 (LNEC, 1967), consiste em fazer uma suspensão aquosa de 120 g de material passado no peneiro de 4,76 mm da série ASTM, agitar-se com o auxílio de um agitador mecânico, manual ou elétrico, conforme figura 4.4, e deixar a proveta em repouso durante 20 minutos, ocorrendo uma rápida deposição do material de maiores dimensões, enquanto o mais fino fica em suspensão.



Figura 4.4 - Agitador mecânico de provetas

O valor do Equivalente de Areia, EA, é expresso em % e é dado pela equação 4.3.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} 100 \quad (4.3)$$

Em que:

h_1 é a altura desde a base da proveta até ao nível superior do material fino (mm);

h_2 é a altura desde a base da proveta até ao nível superior do material grosseiro (mm).

Com base no equivalente de areia é frequente classificar um solo de acordo com a tabela 4.2, onde se apresentam os valores usuais do caderno de encargos da EP (EP, 2009).

Tabela 4.2 - Classificação do material com base no EA

EA (%)	Classificação
$EA < 20$	Solo plástico
$20 \leq EA \leq 30$	Ensaio não conclusivo
$EA > 30$	Solo não plástico

O ensaio, segundo a norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002a), consiste em fazer uma suspensão aquosa de 120 g de material com fração granulométrica 0/2 mm e deixar a proveta em repouso durante 20 minutos, conforme figura 4.5, ocorrendo uma rápida deposição do material de maiores dimensões, enquanto o mais fino fica em suspensão. O valor do Equivalente de areia, SE, é expresso em % e é dado pela equação 4.4.

$$SE = \frac{h_2}{h_1} 100 \quad (4.4)$$

Em que:

h_1 é a distância entre a camada superior do floculado e a base da proveta (mm);

h_2 é a distância entre a face inferior da cabeça do mergulhador e a face superior do anel (mm).



Figura 4.5 - Provetas cilíndricas com o preparado

4.8 Ensaio de *Los Angeles*

O ensaio de desgaste pela máquina de *Los Angeles* foi realizado segundo os procedimentos apresentados na especificação E 237 (LNEC, 1970a) e na norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c).

Segundo a especificação E 237 (LNEC, 1970a), pretende determinar-se a perda por desgaste sofrida por um agregado quando submetido, juntamente com a carga abrasiva, a 500 ou 1000 rotações, consoante a composição granulométrica do provete. A perda por desgaste na máquina de *Los Angeles*, D , expressa em percentagem, é dada pela equação 4.5.

$$D = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100 \quad (4.5)$$

Em que:

m_1 é a massa do provete;

m_2 é a massa do material retido no peneiro de 1,68 mm (nº 12).

O ensaio, segundo a norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c), determina a resistência à fragmentação de um agregado grosso, passado no peneiro 14 mm e retido no de 10 mm,

quando submetido, juntamente com a carga abrasiva, a 500 voltas, a uma velocidade constante de 31 r/min a 33 r/min. A curva granulométrica do agregado deve corresponder a um dos seguintes requisitos:

- a) 60% a 70% passando no peneiro 12,5 mm, ou;
- b) 30% a 40% passando no peneiro de 11,2 mm.

O coeficiente de *Los Angeles*, LA, expresso em percentagem, é dado pela equação 4.6.

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (4.6)$$

Em que:

m é a massa retida no peneiro de 1,60 mm, em gramas.

4.9 Ensaio micro-Deval

Na realização do ensaio de micro-*Deval* seguiu-se o procedimento indicado na norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002d). Com este ensaio pretende caracterizar-se o agregado em relação ao desgaste provocado no mesmo quando submetido, juntamente com uma determinada carga abrasiva e água, $2,5 \pm 0,05$ l, ou apenas com a carga abrasiva, a 12000 rotações num tambor sob condições definidas.

O ensaio é realizado sobre material passado no peneiro de 14 mm e retido no peneiro de 10 mm. Adicionalmente, a distribuição granulométrica do provete deve respeitar um dos seguintes requisitos:

- a) Entre 30% e 40% passando no peneiro 11,2 mm, ou;
- b) Entre 60% e 70% passando no peneiro 12,5 mm.



Figura 4.6 - Provete e esferas no cilindro de ensaio

De um modo geral, o procedimento do ensaio, consiste em submeter uma massa de 5000 ± 5 g, composta por um provete de 500 ± 2 g de agregado e o restante por carga abrasiva, constituída por esferas de aço com diâmetro de $10 \pm 0,5$ mm, como mostra a figura 4.6, num tambor e máquina adequados, a 12000 rotações, com uma velocidade de 100 ± 5 rpm.



Figura 4.7 - Provetes com carga abrasiva nos cilindros para ensaio

Após o ensaio peneira-se o material e avalia-se a quantidade retida no peneiro de 1,6 mm.

Por cada amostra, devem ser ensaiados dois provetes, conforme figura 4.7. Uma vez que a máquina tem quatro tambores, podem ser ensaiadas duas amostras em simultâneo, como ilustra a figura 4.8.



Figura 4.8 - Equipamento micro-Deval

Para cada provete, determina-se o coeficiente micro-Deval, MDE ou MDS, consoante o ensaio tenha sido realizado com agregados húmidos ou secos, respetivamente, conforme as equações 4.7 e 4.8.

$$MDE = \frac{500 - m}{5} \quad (4.7)$$

$$MDS = \frac{500 - m}{5} \quad (4.8)$$

Em que:

MDE é o coeficiente micro-*Deval* com agregados húmidos;

MDS é o coeficiente micro-*Deval* com agregados secos;

m é a massa das partículas de dimensão superior a 1,6 mm, em gramas.

O coeficiente micro-*Deval* da amostra é dado pelo valor médio dos coeficientes de micro-*Deval* calculados para cada um dos provetes.

4.10 *Slake durability test*

O *Slake durability test* ou ensaio de desgaste em meio húmido destina-se a avaliar a resistência ao enfraquecimento ou desintegração de uma amostra de rocha, quando submetida a dois ciclos padrão de desgaste em meio húmido.

O ensaio consiste, de um modo geral e de acordo com o procedimento sugerido pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM,1981), em submeter dez fragmentos de rocha, cada um com massa de 40 a 60 g, que dará um total de 400 a 600 g, a dois ciclos de molhagem – secagem.

A fase da molhagem consiste na colocação da amostra num tambor metálico, o qual se coloca dentro de uma tina que se enche de água até 20 mm abaixo do eixo do cilindro, conforme figura 4.9. O tambor sofre 200 rotações durante um período de 10 minutos, correspondente a um ciclo padrão.

A fase da secagem é feita em estufa, a uma temperatura de 105°C, durante um período de 16 a 24 horas.



Figura 4.9 - Equipamento *Slake Durability Test*

O índice de desgaste em meio húmido, Id_2 , expresso em percentagem, é dado pela relação entre o peso da amostra seca após o segundo ciclo de molhagem – secagem e o seu peso inicial.

Com base no índice de desgaste em meio húmido, Id_2 (%), apresenta-se, na tabela 4.3, o critério de durabilidade proposto por *Gamble* (*Gamble*, 1971) a partir do segundo ciclo de desgaste em meio húmido, para o material retido no tambor.

Tabela 4.3 - Critério de durabilidade para rochas segundo *Gamble* (*Gamble*, 1971)

Id_2 (%) material retido	Durabilidade
> 98	Muito alta
98 - 95	Alta
95 - 85	Média alta
85 - 60	Média baixa
60 - 30	Baixa
< 30	Muito baixa

4.11 Índices de forma

A forma das partículas de agregado a utilizar nas camadas de pavimentos rodoviários deverá ser aproximadamente cúbica, pelo que as partículas não devem ser lamelares ou alongadas, por serem mais frágeis (Pereira e Picado-Santos, 2002, ref. por Luzia, R.C., 2008).

A forma das partículas caracteriza-se pelos índices de lamelação e alongamento (BSI, 1989; BSI, 1990).

O índice de lamelação de uma amostra de agregado é encontrado através da separação das partículas lamelares, expressando a sua massa como percentagem da massa da amostra ensaiada. (BSI, 1989).

O índice de alongamento de uma amostra de agregado encontra-se separando as partículas alongadas, expressando a sua massa como percentagem da massa da amostra ensaiada. (BSI, 1990).

4.12 Índice de achatamento

Para a determinação do índice de achatamento foi seguido o procedimento apresentado na norma NP EN 933-3 (IPQ, 2000b).

O ensaio consiste em duas operações de peneiração. Primeiro, usando os peneiros de ensaio, a amostra é separada em várias frações de partículas d_i / D_i . Cada uma destas frações d_i / D_i é, de seguida, peneirada utilizando peneiros de barra que têm ranhuras paralelas, conforme ilustra a figura 4.10, com um diâmetro de $D_i / 2$, conforme se indica na tabela 4.4.



Figura 4.10 - Peneiro de barra

Tabela 4.4 - Peneiros de barra a utilizar de acordo com a fração granulométrica a ensaiar

Fração da partícula d_i / D_i (mm)	Diâmetro da ranhura nos peneiros de barra (mm)
63/80	$40 \pm 0,3$
50/63	$31,5 \pm 0,3$
40/50	$25 \pm 0,2$
31,5/40	$20 \pm 0,2$
25/31,5	$16 \pm 0,2$
20/25	$12,5 \pm 0,2$
16/20	$10 \pm 0,1$
12,5/16	$8 \pm 0,1$
10/12,5	$6,3 \pm 0,1$
8/10	$5 \pm 0,1$
6,3/8	$4 \pm 0,1$
5/6,3	$3,15 \pm 0,1$
4/5	$2,5 \pm 0,1$

O índice de achatamento total, FI, é calculado a partir da equação 4.9.

$$FI = \frac{M_2}{M_1} 100 \quad (4.9)$$

Em que:

M_1 é a soma das massas das partículas de cada fração da partícula d_1 / D_1 , em gramas;

M_2 é a soma das massas das partículas em cada uma das frações granulométricas que passa pelo peneiro de barra correspondente, com ranhura de $D_i / 2$, em gramas.

4.13 Ensaio de degradabilidade

O ensaio de degradabilidade foi efetuado segundo a NF P 94-067 (AFNOR, 1992a), sobre provetes das frações granulométricas 10/20 e 40/80. O coeficiente de degradabilidade (DG), obtém-se da relação entre o D_{10} antes do primeiro ciclo ($D_{10 A. 1^o} \text{ Ciclo}$) e o D_{10} após o quarto ciclo ($D_{10 D. 4^o} \text{ Ciclo}$), de acordo com a equação 4.10.

$$DG = \frac{D_{10 A. 1^o} \text{ Ciclo}}{D_{10 D. 4^o} \text{ Ciclo}} \quad (4.10)$$

4.14 Ensaio de fragmentabilidade

O ensaio de fragmentabilidade foi efetuado segundo a NF P 94-066 (AFNOR, 1992b), sobre provetes das frações granulométricas 10/20 e 40/80. O coeficiente de fragmentabilidade (FR), obtém-se da relação entre o D_{10} antes da compactação ($D_{10 A. Compact.}$) e o D_{10} depois da compactação ($D_{10 D. Compact.}$), de acordo com a equação 4.11.

$$FR = \frac{D_{10 A. 1^o} \text{ Ciclo}}{D_{10 D. 4^o} \text{ Ciclo}} \quad (4.11)$$

5. Trabalho experimental

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma breve apresentação do material em estudo, bem como dos resultados dos ensaios realizados, com vista à caracterização e análise do mesmo para utilização na fundação e nas camadas granulares de pavimentos rodoviários.

Como se verá à frente apenas foi recolhida e ensaiada uma amostra de material britado o que se ficou a dever ao facto de o tempo disponível para o desenvolvimento do trabalho ser limitado e não permitir realizar toda a caracterização prevista em mais do que uma amostra. No entanto, entende-se que as limitações que daqui poderiam advir terão sido colmatadas pelo número de ensaios realizados e pelo facto de ter havido o cuidado de realizar dois provetes por ensaio, os quais, em alguns casos, foram realizados por diferentes normas.

5.2 Material em estudo

Neste trabalho avalia-se o comportamento geotécnico de materiais xistosos, pertencentes ao complexo xisto-grauváquico, provenientes das escombreyras do denominado núcleo de pedreiras do Poio, Vila Nova de Foz Côa, interior centro de Portugal, com vista à sua utilização na fundação e camadas granulares de pavimentos rodoviários, à luz de especificações portuguesas.

O objetivo é contribuir para o aproveitamento deste tipo de material e consequentemente para a redução dos impactes ambientais na zona envolvente à exploração das pedreiras.

Assim, foi ensaiada uma amostra de material xistento, de cor castanho acinzentado, como se pode verificar na figura 5.1 e figura 5.2. Este material, identificado na zona como “oxidado”, devido à sua cor, foi britado sob a responsabilidade da empresa que explora a pedreira na qual se procedeu à recolha do mesmo.



Figura 5.1 - Amostra de material utilizado



Figura 5.2 - Amostra de material utilizado

5.3 Apresentação dos resultados

5.3.1 Análise granulométrica

Os resultados da granulometria do material, segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966a), foram os que se apresentam na tabela 5.1 e na figura 5.3.

Tabela 5.1 - Valores médios dos resultados da análise granulométrica segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966a)

Peneiro	Abertura (mm)	Material Passado (%)
3"	76,2	100,0
2"	50,8	94,3
1" 1/2	38,1	62,1
1"	25,4	42,6
3/4"	19,1	34,2
1/2"	12,7	28,5
3/8"	9,5	23,9
nº4	4,8	17,2
nº10	2,0	11,9
nº20	0,84	8,9
nº40	0,42	7,4
nº80	0,177	6,1
nº200	0,074	4,9

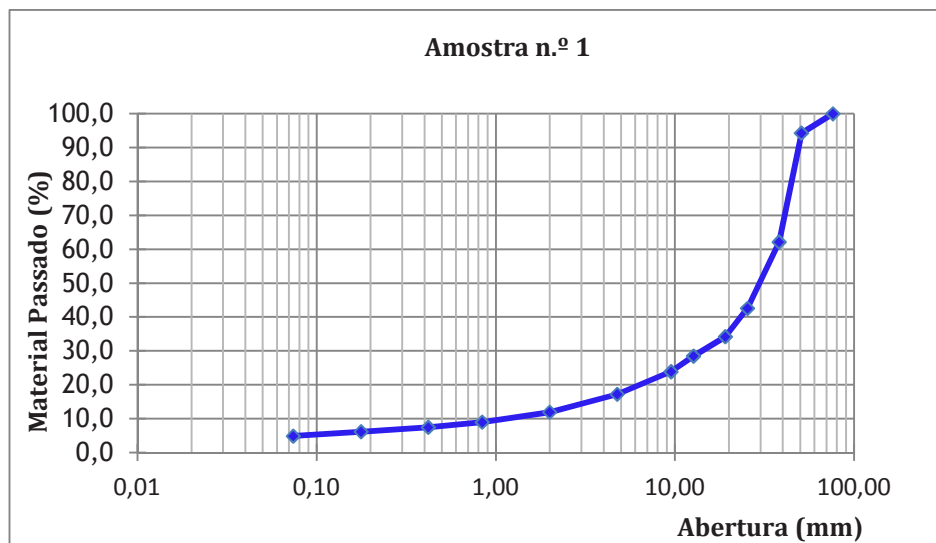


Figura 5.3 - Curva granulométrica resultante da análise granulométrica segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966)

Os resultados da granulometria do material, segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a), foram os que se apresentam na tabela 5.2 e na figura 5.4.

Tabela 5.2 - Valores médios dos resultados da análise granulométrica segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a)

Abertura (mm)	Material Passado (%)
80,0	100,0
60,0	97,2
40,0	79,2
31,5	64,3
22,4	50,3
16,0	39,9
8,0	26,0
6,3	24,1
5,6	23,0
4,0	19,0
2,0	14,6
1,0	11,2
0,5	9,0
0,25	6,6
0,125	4,9
0,063	4,3

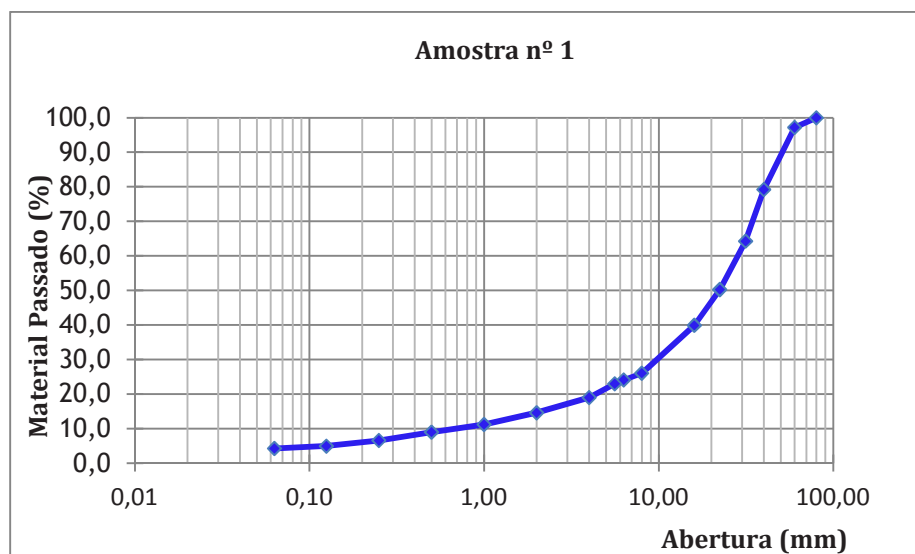


Figura 5.4 - Curva granulométrica resultante da análise granulométrica segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a)

5.3.2 Limites de consistência

Os resultados obtidos nos limites de consistência, limite de liquidez e limite de plasticidade, incluindo o índice de plasticidade, foram os que se apresentam na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados dos limites de consistência e índice de plasticidade, norma NP 143 (IGPAI, 1969)

Parâmetro	Resultados (%)
Limite de liquidez	23
Limite de plasticidade	18
Índice de plasticidade	5

5.3.3 Ensaio de compactação pesada tipo *Proctor*

O ensaio de compactação pesada em molde grande, foi realizado segundo a especificação LNEC E 197 (LNEC, 1966b).

Segundo aquela especificação, como referido na secção 4.4, na compactação em molde grande apenas se deve utilizar o material passado no peneiro de 19 mm. Caso a percentagem de material retido naquele peneiro seja superior a 20% o ensaio não tem significado, caso contrário substitui-se a percentagem retida por igual massa de material passado no peneiro de 19 mm e retido no peneiro de 4,76 mm.

O material em estudo apresenta uma percentagem de material retido no peneiro de 19 mm superior a 20 %, pelo que não se pode aplicar aquela especificação do LNEC. No entanto, entendeu-se realizar o ensaio do mesmo modo e proceder à substituição do material retido

por igual massa de material passado no peneiro de 19 mm e retido no peneiro de 4,76 mm, tendo-se obtido a curva de compactação apresentada na figura 5.5.

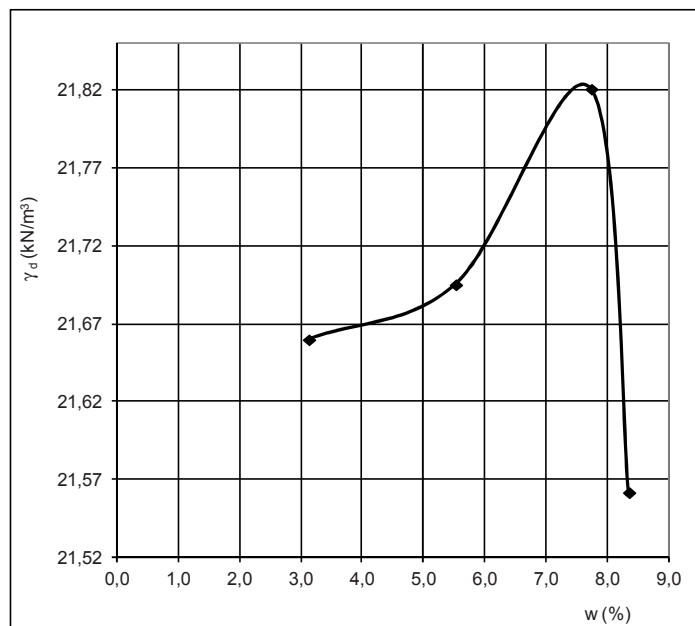


Figura 5.5 - Curva de compactação

Analisando a curva obtida naquelas condições verifica-se que para um teor em água ótimo de 7,6 % se obteve um peso específico seco máximo de 21,82 kN/m³.

5.3.4 Ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*)

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) foi realizado de acordo com o procedimento apresentado na especificação E 198 (LNEC, 1967).

Para o CBR imediato a 95% da compactação obteve-se um valor inferior a 10%.

O valor de CBR com embebição encontrado foi de 15% e para a expansibilidade obteve-se o valor de 0,43%.

5.3.5 Ensaio de azul de metileno

Segundo a norma NF P18-592 (AFNOR, 1990), obteve-se um valor de adsorção de azul de metileno de 0,40 g/100g, e segundo a norma NP EN 933-9 (IPQ, 2002b) o valor de azul de metileno (MB) obtido foi de 2,25 g/kg.

5.3.6 Ensaio de equivalente de areia

No ensaio de equivalente de areia, realizado segundo a especificação LNEC E199 (LNEC, 1967) e segundo a norma NP EN 933-8 (IPQ, 2002a), obtiveram-se os valores médios de 42% e 56%, respetivamente.

5.3.7 Ensaio de *Los Angeles*

O ensaio de desgaste pela máquina de *Los Angeles* foi efetuado segundo a especificação LNEC E 237 (LNEC, 1970a), com a composição granulométrica tipo F e segundo a norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c), sobre a fração granulométrica 10/14 mm, com truncagem no peneiro 12,5 mm e 60% de passados no mesmo.

Os resultados obtidos nos dois ensaios foram de 42% e 40%, respetivamente.

Segundo a norma NP EN 13242 (IPQ 2005), o material, quando ensaiado pela norma NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c) classifica-se como LA₄₀.

5.3.8 Ensaio micro-*Deval*

Os valores obtidos através do ensaio de resistência ao desgaste (micro-*Deval*), efetuado segundo a norma NP EN 1097-1 (IPQ, 2002d), sobre a fração granulométrica 10/14 mm, com truncagem no peneiro 12,5 mm e 70% de passados no mesmo, foram de 60% com o agregado em meio húmido e de 6% com o agregado em meio seco.

5.3.9 *Slake durability test*

Os resultados do ensaio de desgaste em meio húmido, seguindo o procedimento da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981) e o procedimento sugerido por Monteiro (Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, 1994), foram os que se encontram descritos na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados do ensaio de desgaste em meio húmido

Id ₁ (méd) (%)	Id ₂ (méd) (%)	Id ₇ (méd) (%)
99	98	96

5.3.10 Índices de forma

Os valores médios encontrados para os índices de lamelação (BSI, 1989) e alongamento (BSI, 1990) foram de 30% e 41%, respetivamente.

5.3.11 Índice de achatamento

O índice de achatamento foi efetuado segundo a norma NP EN 933-3 (IPQ, 2000b), no qual se obteve o valor de 19%. Segundo a norma NP EN 13242 (IPQ 2005) o material classifica-se como FI₂₀.

5.3.12 Ensaio de degradabilidade

O coeficiente de degradabilidade (DG) encontrado para qualquer das granulometrias ensaiadas 10/20 e 40/80, foi de 1%.

5.3.13 Ensaio de fragmentabilidade

O coeficiente de fragmentabilidade (FR) encontrado, para ambas as granulometrias ensaiadas, 10/20 e 40/80, foi de 2%.

6. Análise de Resultados

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo irá proceder-se a uma análise global dos resultados apresentados tendo como base as especificações e classificações apresentadas no capítulo 4, pretendendo avaliar-se, à luz das mesmas, a possibilidade do material em estudo poder ser utilizado em fundação e camadas granulares de pavimentos rodoviários.

Na parte final do presente capítulo faz-se a comparação dos resultados obtidos com os dos trabalhos apresentados no capítulo 2.

6.2 Especificação LNEC E 240 - 1970: “Solos. Classificação para fins rodoviários”

No que diz respeito à especificação LNEC E 240 (LNEC, 1970b), o material em estudo classifica-se como A-1-a (0), pelo que pode, de acordo com aquela norma, considerar-se possível a sua utilização na camada sob o pavimento.

6.3 “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. Norma ASTM D 2487-00 (ASTM, 2001)

No que diz respeito à classificação unificada (ASTM, 2001), o material em estudo classifica-se como GW - cascalho bem graduado.

6.4 Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995)

As características a respeitar pelos materiais britados não tratados, a utilizar em camada de sub-base (SbG) e camada de base (BG), segundo o manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995), são as que se apresentam na tabela 6.1. Na mesma tabela apresentam-se essas mesmas características para a amostra ensaiada.

Tabela 6.1 - Características a apresentar pelos materiais granulares britados segundo o manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (JAE, 1995) e características apresentadas para a amostra em estudo

Parâmetros	MACOPAV		Amostra em estudo	Análise
	BG	SbG		
D. máxima	37,5 mm	50 mm	75 mm	Não verifica para BG Não verifica para SbG
EA mínimo	50%	50%	42%	Não verifica para BG Não verifica para SbG
LA máximo	35% (F)	40% (B)	42% (F)	Não verifica para BG Não verifica para SbG
Classificação segundo MACOPAV	--	--	S ₂	--

6.5 Caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012)

6.5.1 Vol. 14.01 - Terraplenagem. Características dos materiais (EP, 2009)

6.5.1.1 Materiais para Aterro

- Solos

Na tabela 6.2 apresentam-se as características a respeitar pelos solos a utilizar em aterro segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) e as mesmas características para o material em estudo.

Tabela 6.2 - Solo para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	Resultados obtidos	Análise
Material retido no peneiro 19 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤ 30%	>30%	Não verifica
Classificação unificada (ASTM, 2001)	De acordo com quadro 1 do CE da EP (EP, 2009)	GW-Cascalho bem graduado	Verifica em todos os locais do aterro
Classificação para fins rodoviários (LNEC, 1970b)	Pertencente aos grupos A-1, A-2 e A-3	A-1-a (0)	Verifica para a parte superior dos aterros

- Materiais rochosos (enrocamentos)

Na tabela 6.3 apresentam-se as características a respeitar pelos materiais rochosos a utilizar em aterro segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) e as mesmas características para o material em estudo.

Tabela 6.3 - Materiais rochosos para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	Resultados obtidos	Análise
Desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (LNEC, 1970a)	<45%	42%	Verifica, rocha dura
Índice de fragmentabilidade (AFNOR, 1992b)	Não requerido, uma vez que se trata de uma rocha dura	2%	-
Material passado no peneiro 25 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤30%	42,6%	Não verifica
Material passado no peneiro 0,074 mm ASTM (LNEC, 1966a)	≤12%	4,9%	Verifica
Índice de lamelação (BSI, 1989)	<30%	30%	Não verifica
Índice de alongamento (BSI, 1990)	<30%	41%	Não verifica

O caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) refere, ainda, que para aterros com alturas superiores a 20 metros se deve dar especial importância, entre outros, ao ensaio de desgaste em meio húmido (ISRM, 1981; Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, 1994). Para o material em estudo obteve-se um Índice de Desgaste em Meio Húmido para o 2º ciclo, Id2 (%), de 98 %, podendo, assim, classificar-se, segundo *Gamble* (*Gamble*, 1971), como material de durabilidade alta.

- Materiais do tipo solo-enrocamento

Na tabela 6.4 apresentam-se as características a respeitar pelos materiais do tipo solo-enrocamento a utilizar em aterro segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) e as mesmas características para o material em estudo.

Tabela 6.4 - Materiais do tipo solo-enrocamento para aterro: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	Resultados obtidos	Análise
Material retido no peneiro 19 mm ASTM (LNEC, 1966a)	>30% e <70%	65,8%	Verifica
Material passado no peneiro 0,074 mm ASTM (LNEC, 1966a)	>12% e <40%	4,9%	Não verifica

O caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009) refere, ainda, que para aterros com alturas superiores a 15 metros se deve dar especial importância, entre outros, ao ensaio de desgaste em meio húmido (ISRM, 1981; Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, 1994). Para o material em estudo obteve-se um Índice de Desgaste em Meio Húmido para o 2º ciclo, Id_2 (%), de 98 %, podendo, assim, classificar-se, segundo *Gamble* (*Gamble*, 1971), como material de durabilidade alta.

6.5.1.2 Materiais para leito do pavimento

- Solos

Os materiais para camadas de leito do pavimento com solos, deverão, segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), obedecer às características que constam na tabela 6.5. Nesta tabela apresentam-se, também, os resultados obtidos para os materiais em estudo.

Tabela 6.5 - Solo para leito de pavimento: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP, 2009)	Resultados obtidos	Análise
Dimensão máxima (LNEC, 1966a)	≤75 mm	75mm	Verifica
Material passado no peneiro n.º200 ASTM (LNEC, 1966a)	≤20%	4,9%	Verifica
Limite de liquidez IGPAI, 1969)	≤25%	23%	Verifica
Índice de plasticidade IGPAI, 1969)	≤6%	5%	Verifica
Equivalente de areia (LNEC, 1967)	≥30%	42%	Verifica
Valor do azul de metileno (AFNOR, 1990)	≤2,0g/100g	0,4g/100g	Verifica
CBR a 95% de comp. relativa e teor ótimo em água	≥10%	<10%	Não verifica
Expansibilidade (ensaio CBR) (LNEC,1967)	≤1,5%	0,43%	Verifica

- Materiais granulares britados

No que respeita à granulometria dos materiais granulares britados a utilizar em leito do pavimento, o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), define um fuso granulométrico, o qual se apresenta na figura 6.1. Na mesma figura apresenta-se a curva granulométrica obtida para os materiais em estudo recorrendo à norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a).

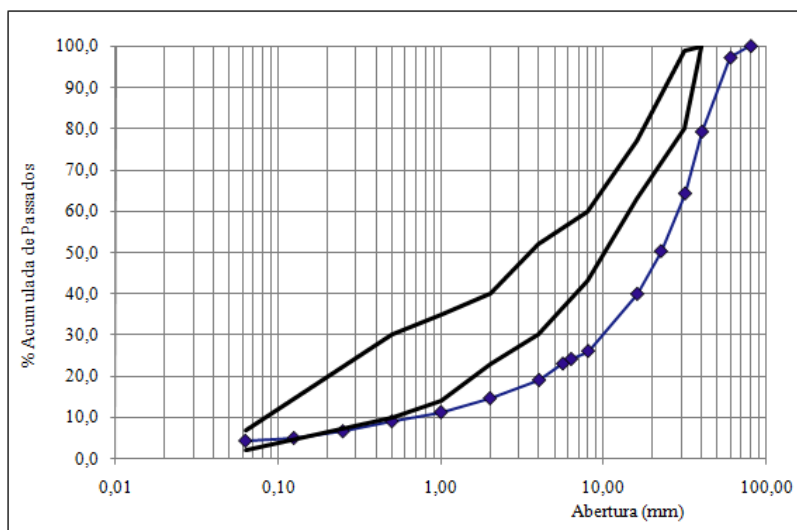


Figura 6.1 - Curva granulométrica do material, norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a), comparação com fuso granulométrico previsto Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2009)

Analisando a figura 6.1 verifica-se que a curva granulométrica do material em estudo se encontra, quase toda ela, fora do fuso definido.

Os restantes requisitos do caderno de encargos tipo obra da EP (EP,2009) são apresentados na tabela 6.6. No mesmo quadro apresentam-se os resultados obtidos para o material em estudo.

Tabela 6.6 - Materiais granulares britados para leito de pavimento: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2009)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2009)	Resultados obtidos	Análise
Desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	>35% e ≤ 40% (LA ₄₀)	LA ₄₀	Verifica
Coefficiente micro- <i>Deval</i> (IPQ, 2002d)	>35% e ≤ 50% (M _{DE 50})	60%	Não verifica
Forma das partículas (achatamento) (IPQ, 2000b)	>20% e ≤ 35% (FI ₃₅)	19% (FI ₂₀)	Verifica
Teor de finos (material que passa no peneiro de 0,063 mm) (IPQ, 2000a)	>3% e ≤ 7% (f ₇)	4,3% (f ₇)	Verifica
Equivalente de areia (IPQ, 2002a) (se a % de material passado no peneiro 0,063mm > 3%)	≥ 35%	56%	Verifica
Valor do azul de metileno (IPQ, 2002b) (Se SE≤35 o valor de Azul de metileno MB≤2,5 g/kg)	≤ 2,50 g/kg	2,25 g/kg	Verifica

6.5.2 Vol. 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais (EP, 2012)

6.5.2.1 Camada de Sub-base

- Agregado britado de granulometria extensa

Na tabela 6.7 apresentam-se as características a respeitar pelos agregados de granulometria extensa a utilizar em sub-base segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2012) e as mesmas características para o material em estudo.

Tabela 6.7 - Agregado britado de granulometria extensa para sub-base: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2012)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2012)	Resultados obtidos	Análise
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento (IPQ, 2000b)	FI ₃₅	FI ₂₀	Verifica
Qualidade dos finos – Valor do equivalente de areia mínimo (IPQ, 2002a), e Valor do ensaio de azul de metileno, máximo (IPQ, 2002b)	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3% os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3%, então SE≥40. Caso SE<40, então MB≤2,5	Percentagem de passados no peneiro 0,063 mm = 4,25%. SE=56	Verifica
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	45%	40%	Verifica
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro- <i>Deval</i> (IPQ,2002d)	M _{DE} 35	M _{DE} >50	Não verifica

6.5.2.2 Camada de Base

- Agregado britado de granulometria extensa

Na tabela 6.8 apresentam-se as características a respeitar pelos agregados de granulometria extensa a utilizar em base segundo o caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2012) e as mesmas características para o material em estudo.

Tabela 6.8 - Agregado britado de granulometria extensa para base: comparação de resultados com o requerido pelo CE da EP (EP, 2012)

Parâmetros	Requerido pelo CE da EP (EP,2012)	Resultados obtidos	Análise
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento (IPQ, 2000b)	30%	19%	Verifica
Qualidade dos finos – Valor do equivalente de areia mínimo (IPQ, 2002a), e Valor do ensaio de azul de metileno, máximo (IPQ, 2002b)	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3% os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3%, então $SE \geq 50$. Caso $SE < 50$, então $MB \leq 2,0$	Percentagem de passados no peneiro 0,063 mm = 4,25%. SE=56	Verifica
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente <i>Los Angeles</i> (IPQ, 2002c)	LA ₄₀	LA ₄₀	Verifica
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente <i>micro-Deval</i> (IPQ,2002d)	M _{DE} 25	M _{DE} >50	Não verifica

6.6 Comparação com os resultados de outros trabalhos

6.6.1 Considerações iniciais

Nesta secção irá proceder-se à comparação das propriedades dos materiais de estudos anteriores referidos no capítulo 2, em fase de obra, com o material em estudo.

6.6.2 Construção do lanço IP3 - Raiva / Gestosa - Lanço Nó da Raiva - Santa Comba Dão

A tabela 6.9 apresenta os resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no lanço IP3 - Raiva / Gestosa – Lanço Nó da Raiva – Santa Comba Dão em fase de obra, bem como os resultados dos ensaios realizados para amostra do presente estudo.

Pode verificar-se que existem diferenças bastante consideráveis nas propriedades dos materiais apresentados nesta secção e nos materiais em estudo, nomeadamente no que respeita à granulométricas e à plasticidade.

Tabela 6.9 - Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no lanço IP3 - Raiva / Gestosa - Lanço Nó da Raiva - Santa Comba Dão em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo

Peneiro	Abertura (mm)	Material em estudo	Valores médios referidos
3"	76,20	100,0%	100,0%
2"	50,80	94,3%	100,0%
1" 1/2	38,10	62,1%	98,8%
1"	25,40	42,6%	92,0%
3/4"	19,10	34,2%	88,1%
1/2"	12,70	28,5%	82,8%
3/8"	9,520	23,9%	82,4%
nº4	4,760	17,2%	71,8%
nº10	2,000	11,9%	66,5%
nº20	0,840	8,9%	61,1%
nº40	0,420	7,4%	56,6%
nº80	0,177	6,1%	48,7%
nº200	0,074	4,9%	43,7%
Limite de liquidez		23,0%	43,6%
Limite de plasticidade		18,0%	27,9%
Índice de plasticidade		5,0%	15,7%
w _{opt.} (%)		7,6	11,85
σ _{dmáx} (kN/m ³)		21,82	19,9
CBR (%)		15	12,5
Expansibilidade (%)		0,43	1,5

6.6.3 IP5 - Troço Albergaria-a-Velha / Viseu

A comparação dos resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no troço Albergaria-a-Velha / Viseu em fase de obra e os resultados dos ensaios realizados para a amostra do presente estudo são apresentados na tabela 6.10.

Pode verificar-se que os referidos materiais apresentam características diferentes, essencialmente, granulométricas, resistência ao enfraquecimento e desintegração, teor em água ótimo e teor em finos. Ambos apresentam capacidade de suporte baixa.

Tabela 6.10 - Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Albergaria-a-Velha / Viseu em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo

Peneiro	Abertura (mm)	Material em estudo	Valores médios referidos (%)					
			km 0+400	km 1+780	km 4+400	Amostra 272	Amostra 269	Amostra 271
nº4	4,76	17,2%	72,0%	82,0%	59,0%	56,0%	72,0%	47,0%
nº10	2,00	11,9%	60,0%	75,0%	45,0%	-	-	-
nº40	0,42	7,4%	44,0%	66,0%	29,0%	42,0%	61,0%	27,0%
nº200	0,074	4,9%	35,0%	57,0%	20,0%	34,0%	58,0%	20,0%
Dmáx (mm)		75	-	-	-	76,2	76,2	76,2
Limite de plasticidade		18%	28,0%	27,0%	26,0%	-	-	-
Índice de plasticidade		5%	13,0%	18,0%	9,0%	18,0%	26,0%	Não plástico
wopt. (%)		7,6	14,2	16,0	13,2	12,5	13,4	14,0
σdmáx (kN/m3)		21,82	18,8	17,9	20,1	18,8	17,9	18,6
CBR (%)		15	5-10	2-5	20-25	12	2	23
Expansibilidade (%)		0,43	2,0	9,0	----	4,0	13,0	2,0
Equivalente de areia		42%	----	----	----	----	----	15%
Slake (Id ₂)		98%	----	----	----	47%	36%	75%
Clas. Fins rodoviários		A-1-a (0)	A-7-5 (2)	A-7-6 (8)	A-2-4 (0)	A-7-6 (2)	A-7-6 (14)	A-2-4 (0)
Clas. Unificada		GW - Cascalho bem graduado	----	----	----	GC - Cascalho argiloso	CH - Argila gorda cascalhenta	GM - Cascalho com silte

6.6.4 IC8 - Troço Sertã / Proença-a-Nova

A comparação dos resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no Troço Sertã / Proença-a-Nova em fase de obra e os resultados dos ensaios realizados para amostra do presente estudo são apresentados na tabela 6.11.

Pode comprovar-se que os referidos materiais apresentam características diferentes, essencialmente, granulométricas.

Tabela 6.11 - Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Troço Sertã / Proença-a-Nova em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo

Peneiro	Abertura	Material em estudo	Valores médios das amostras em fase de obra
2"	50,80	94,3%	87,1%
1"	25,40	42,6%	70,6%
3/4"	19,10	34,2%	65,5%
3/8"	9,520	23,9%	53,2%
nº4	4,760	17,2%	43,5%
nº10	2,000	11,9%	34,4%
nº40	0,420	7,4%	24,6%
nº200	0,074	4,9%	17,0%
Limite de liquidez		23%	31,1%
Limite de plasticidade		18%	19,9%
Índice de plasticidade		5%	11,3%
wopt. (%)		7,6	11,3
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)		21,82	19,42
Equivalente de areia		42%	18%
Clas. Fins rodoviários		A-1-a (0)	A-2-4 (0)

6.6.5 Troço Raiva - Catraia dos Poços, do atual IC6

A tabela 6.12 apresenta os resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas no Troço Raiva – Catraia dos Poços, do atual IC6 em fase de obra, bem como os resultados dos ensaios realizados para amostra do presente estudo.

Analisando a tabela 6.12 pode verificar-se que as propriedades do material em estudo e das 7 amostras apresentadas nesta secção apresentam diferenças, em alguns casos, significativas. No entanto, alguns dos parâmetros apresentam valores da mesma ordem de grandeza, sendo que o material em estudo apresenta melhores valores no que respeita à plasticidade e limpeza do material.

Tabela 6.12 - Comparação de resultados dos ensaios realizados a amostras recolhidas troço Raiva - Catraia dos Poços, do atual IC6 em fase de obra e resultados dos ensaios efetuados para a amostra do presente estudo

Peneiro	Abertura (mm)	Material em estudo	Amostras em fase de obra						
			391	392	393	394	395	396	397
3"	76,2	100,0%	100,0%	79,7%	72,3%	76,1%	73,7%	73,0%	77,9%
2"	50,8	94,3%	80,7%	73,4%	58,6%	65,2%	64,9%	64,7%	59,4%
1" 1/2	38,1	62,1%	78,5%	67,4%	52,2%	61,6%	56,0%	61,3%	53,0%
1"	25,4	42,6%	74,4%	59,7%	48,7%	55,9%	50,2%	52,1%	39,6%
3/4"	19,1	34,2%	64,1%	54,9%	44,7%	51,7%	44,2%	47,7%	34,0%
1/2"	12,7	28,5%	53,8%	47,5%	39,3%	47,6%	36,2%	40,7%	26,4%
3/8"	9,52	23,9%	50,5%	43,9%	36,7%	43,4%	31,9%	36,2%	23,3%
nº4	4,76	17,2%	39,3%	36,0%	30,1%	35,8%	21,8%	26,3%	15,9%
nº10	2	11,9%	27,4%	27,9%	23,8%	27,7%	14,3%	17,7%	10,2%
nº20	0,84	8,9%	18,1%	21,4%	18,3%	2,0%	9,9%	11,8%	7,1%
nº40	0,42	7,4%	11,0%	15,5%	14,1%	13,4%	8,3%	7,7%	5,1%
nº80	0,177	6,1%	4,1%	8,4%	9,4%	7,6%	7,5%	4,0%	3,1%
nº200	0,074	4,9%	1,1%	5,2%	4,0%	2,2%	6,8%	1,2%	1,4%
Limite de liquidez		23%	45,0%	41,0%	39,0%	45,0%	38,0%	38,0%	37,0%
Limite de plasticidade		18%	26%	23%	23%	25%	24%	19%	23%
Índice de plasticidade		5%	19%	18%	16%	20%	14%	19%	15%
D _{máx.} (mm)		75	162	190	147	182	163	200	142
w _{opt.} (%)		7,60%	9,5	não credível	9,6	10,3	10,0	10,5	10,7
σ _{dmáx} (kN/m ³)		21,82	19,6	não credível	19,9	19,8	19,9	20,2	20,0
CBR 95% σ _{dmáx}		< 10	< 8 - 56	-	4 - 52	< 6 - 60	< 8 - 40	< 5 - 76	< 25 - 24
CBR (%)		15	6	11	15	17	35	8	8
Expansibilidade (%)		0,43	2	2	0	2	0	1	0
Azul de metileno (g/100g)		0,4	1,1	0,9	0,8	1,1	0,7	1	0,6
Equivalente de areia (%)		42	14	12	11	12	17	16	17
Los Angeles (%)		42	78	77	58	67	43	44	42
Degradabilidade (%)		1	1	1	1	1	1	1	1
Fragmentabilidade (%)		2	8	6	3	5	2	2	2
Slake Id ₂ (%)		98	84	86	90	89	98	97	97
Clas. Fins rodoviários		A-1-a (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-6 (0)	A-2-7 (0)	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)
Clas. Unificada		GW - Cascalho bem graduado	GW - cascalho bem graduado com areia	GW - GC cascalho bem graduado com argila	GW - cascalho bem graduado com areia	GP - cascalho mal graduado	GW - GC cascalho bem graduado com argila	GW - cascalho bem graduado com areia	GW - cascalho bem graduado

7. Conclusões

No trabalho realizado procedeu-se à caracterização geotécnica de um material xistoso, britado, proveniente das escombrelras de uma das pedreiras do denominado núcleo de pedreiras do Poio, Vila Nova de Foz Côa, com vista à sua utilização em pavimentos rodoviários, fundação e camadas não ligadas, tendo como objetivo contribuir para o aproveitamento deste tipo de material e sucessivamente para a redução do impacto ambiental na zona envolvente das pedreiras.

Analisando os resultados pode concluir-se que o material em estudo é não plástico e, segundo o Guia Técnico para a Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992) pode mesmo considerar-se que os finos são insensíveis à água, de acordo com os valores de adsorção de azul de metileno obtidos.

No que diz respeito ao desgaste em meio húmido, obteve-se um índice de desgaste após o 2º ciclo, Id2 (%), de 98 %, podendo o material ser classificado, segundo *Gamble* (*Gamble*, 1971), como tendo durabilidade alta.

Segundo a especificação LNEC E 240 (LNEC, 1970b), o material em estudo classifica-se como A-1-a (0) e segundo a classificação unificada (ASTM, 2001), o material em estudo classifica-se como GW – cascalho bem graduado.

Segundo os critérios exigidos no manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária Nacional (JAE, 1995) pode verificar-se que, no que diz respeito às condições de fundação, face a um valor de CBR inferior a 10% se obtém a classe S₂, pelo que é admissível a utilização do material em estudo em aterro. No entanto, para as camadas de base e sub-base não é possível a utilização deste material, visto que não cumpre os requisitos da granulometria, valor do equivalente de areia e *Los Angeles*.

Analisando os resultados à luz do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2009), com vista à aplicação do material em aterro para pavimentos rodoviários, verificou-se que o mesmo não poderia ser utilizado devido à sua granulometria e forma das partículas (índice de lamelação e índice de alongamento). Não é possível a utilização deste material em leito do pavimento face ao valor de CBR a 95% de compactação relativa, à granulometria e à resistência ao desgaste por atrito verificados.

Feita a análise para aplicação do material nas camadas não ligadas de pavimentos rodoviários pelo caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2012), verificou-se que o mesmo não poderia ser utilizado em camada de sub-base nem em camada de base devido à resistência ao desgaste por atrito.

Conclui-se assim, segundo as condições impostas pelo caderno de encargos tipo obra da Estradas de Portugal (EP, 2009; EP, 2012), que o material não pode ser utilizado nem na fundação nem nas camadas não ligadas de pavimentos rodoviários devido à granulometria, forma das partículas, CBR a 95% da compactação relativa e resistência ao desgaste por atrito no primeiro caso e devido à resistência ao desgaste por atrito, no caso das camadas não ligadas.

No entanto, caso neste trabalho se tivessem considerado os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por atrito em meio seco as conclusões seriam completamente diferentes, já que sendo o M_{DE} em meio seco de 6%, concluir-se-ia que o material poderia ser

utilizado nas camadas granulares de pavimentos rodoviários não o podendo ser na fundação, apenas devido à granulometria e à forma das partículas.

Pode concluir-se que outros materiais usados em estudos anteriores, relativos a pavimentos rodoviários atualmente em serviço, possuem algumas propriedades idênticas à amostra em estudo.

Tendo em conta estes trabalhos e o facto de os materiais terem, de facto, sido utilizados sem que os pavimentos em causa tenham sofrido danos, pensa-se que o material em estudo, após nova britagem adequada e/ou através de mistura com outros materiais para correção da curva granulométrica, por forma a aproximar a granulometria do fuso granulométrico requerido, poderão ser utilizados, pelo menos, em aterro, sem que isso ponha em causa o desempenho futuro dos pavimentos.

Bibliografia

AFNOR (1990). Granulats. Essai au bleu de méthylène. Méthode à la tache. NF P 18-592, Association Française de Normalisation, France.

AFNOR (1992a). Sols: Reconnaissance et Essais. Coefficient de Dégradabilité des matériaux Rocheux. NF P 94-067, Association Française de Normalisation, France.

AFNOR (1992b). Sols: Reconnaissance et Essais. Coefficient de Fragmentabilité des matériaux Rocheux. NF P 94-066, Association Française de Normalisation, 1992.

ASTM (2001). Standard Classification of Soils for Engineering Purposes [Unified Soil Classification System. D 2487-00, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, American Society for Testing and Materials, USA.

BSI (1989). Testing aggregates. Methods for determination of particle shape-Flakiness index. BS 812-105.1. British Standards Institution, London.

BSI (1990). Testing aggregates. Methods for determination of particle shape-Elongation index of coarse aggregate. BS 812-105.2. British Standards Institution, London.

EP (2009). Caderno de Encargos Tipo Obra, Cap. 14.01-Terraplenagem Características dos Materiais. Estradas de Portugal, S. A., Lisboa.

EP (2012). "Caderno de encargos tipo obra. 14.03 - Pavimentos. Características dos materiais." Estradas de Portugal, S.A., Lisboa.

Gamble, J. C. (1971). Durability – Plasticity classification of shale and other argillaceous rocks. Phd. Thesis, University of Illinois, USA.

IGPAI (1969). Determinação dos Limites de Consistência. NP-143, Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa.

IPQ (2005). Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. NP EN 13242, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2000a). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2000b). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento. NP EN 933-3, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2002a). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do Teor de finos. Ensaio do Equivalente de Areia. NP EN 933-8, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2002b). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Determinação do Teor de Finos. Ensaio do Azul de Metileno. NP EN 933-9, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2002c). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. NP EN 1097-2, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2002d). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste [micro-Deval]. NP EN 1097-1, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

ISRM (1981). Suggested Method for Determination of the Slake – Durability Index". Rock Characterization Testing & Monitoring. ISRM Suggested Methods. Ed. E.T. Brown, Pergamon Press.

LNEC (1966a). Análise Granulométrica. E 196, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1966b). Ensaio de Compactação. E 197, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1967). Determinação do CBR. E 198 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1967). Ensaio de Equivalente de Areia. E 199 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1970a). Ensaio de Desgaste pela Máquina de *Los Angeles*. E 237, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1970b). Classificação para Fins Rodoviários. E 240, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Luzia, R.C. (1998). Fundação de Pavimentos Rodoviários: Estudo da Utilização de Materiais Xisto-Grauváquicos. Universidade de Coimbra, Coimbra.

Luzia, R.C. (2008). Camadas não Ligadas em Pavimentos Rodoviários: Estudo do Comportamento. Livraria Almedina, Coimbra.

Monteiro, B. e Delgado Rodrigues, J. (1994). Método sugerido para a determinação do ensaio de desgaste em meio húmido (Slake - Durability Test). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.