

O LANÇO A E B DA AUTOESTRADA DO BAIXO ALENTEJO

Terraplenagens e controlo laboratorial

MANUEL JOAQUIM SÁ LOPES TAVARES CALÓ

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

Coorientador: Engenheiro João Pedro Carvalho Cabral

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Em memória da nossa mãe e à Leonor

A lion chased me up a tree and I greatly enjoyed the view from the top.

Confucius

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente e não docente da FEUP que de alguma forma e ao longo dos anos contribuíram para a minha conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Em especial, agradeço ao Senhor Professor Jaime Queirós Ribeiro pela ajuda na procura de uma empresa onde realizar a dissertação e pelo acompanhamento sempre atento da sua escrita. Sem as suas diligências, a minha primavera de 2017 não teria sido especial, como foi. Ao Senhor Professor Adalberto França, o meu agradecimento pela atitude generosa com que transmite nas aulas o seu imenso saber. Muito se deve a ele ter decidido seguir a opção de Vias de Comunicação. Ao Senhor Professor António Abel Henriques e à Senhora Professora Ana Sofia Guimarães que cumprindo as suas funções, souberam como me ajudar num momento difícil. Registo ainda a Senhora Professora Carla Santos, a Senhora Professora Maria do Carmo Coimbra, a Senhora Professora Ana Maria Faustino, o Senhor Professor Martim Ulrich, o Senhor Professor Miguel Mendes, o Senhor Professor João Macedo, o Senhor Professor João Sá, o Senhor Professor Francisco Piqueiro e o Senhor Professor Alberto Moreira. Lembro-me com nitidez das horas que me receberam nos seus gabinetes, muito além das suas obrigações, sempre disponíveis.

Ainda os colaboradores do CICA e da secretaria do Departamento de Engenharia Civil o meu agradecimento pela forma impecável de como fui sempre atendido.

Na TECNOVIA fico grato a todos os colaboradores pela forma amistosa de como fui recebido e de onde saio enriquecido.

Saliento o Senhor Engenheiro João Cabral que desde o primeiro dia se mostrou atento à minha integração e pelo profissionalismo com que soube assumir o seu papel. Agradeço também ao Engenheiro Hugo Augusto, ao Engenheiro Sérgio Pote, ao Engenheiro Nuno Fernandes, ao dr. Tiago Romanga, ao Telmo Piedade, ao Jorge Cobra e ao Henrique Neves. Uma palavra de especial agradecimento ao Jorge Ribeiro e ao Miguel Proença pelos exemplos de competência e de saber-fazer uma autoestrada.

À Arquiteta Andreia Coutinho pelos conselhos e encorajamento.

Ao nosso querido pai, ao Luis e à Mariana por tudo.

RESUMO

O acompanhamento laboratorial e controlo de qualidade de uma obra rodoviária é condição essencial, mas não suficiente, para que essa obra esteja de acordo com os patamares de qualidade que se pretende de uma rede viária presente e futura. Sendo as autoestradas elementos fundamentais dessa rede viária e estando ela sujeita a um aumento do volume de tráfego e correspondentes cargas aplicadas, o comprometimento por parte das entidades executantes na qualidade e longevidade dessas autoestradas só pode ser assegurada, portanto, com um suporte atento e rigoroso dos laboratórios que as acompanham.

A presente dissertação é dedicada ao tema da execução das obras rodoviárias, mais concretamente ao capítulo das terraplenagens, e ao seu acompanhamento laboratorial. Resulta do acompanhamento da execução do lanço A e B da autoestrada do Baixo Alentejo e, em simultâneo, dos ensaios laboratoriais que foram levados a cabo durante parte da sua construção. A escrita que se segue foi feita num período de tempo limitado e substancialmente menor daquele que será necessário para a conclusão da totalidade da extensão dos referidos lanços, daí que os ensaios efetuados foram aqueles que se mostraram os indicados à situação particular da evolução dos trabalhos.

O acompanhamento laboratorial e controlo de qualidade percorre os procedimentos correntes de avaliação das características físicas e mecânicas dos materiais e ainda no estudo de solo-cimento em leito de pavimento.

Esta dissertação de perfil eminentemente empresarial foi escrita nas instalações da TECNOVIA – Sociedade de Empreitadas S.A. mais concretamente na central de produção de Ferreira do Alentejo e no laboratório da central de produção de Ourique durante os meses de março, abril e maio de 2017.

PALAVRAS-CHAVE: Obra rodoviária, acompanhamento laboratorial, controlo de qualidade, terraplenagem.

ABSTRACT

Laboratorial testing and quality control in road construction is an essential condition so that construction tasks are accomplished per the standards needed for the present and future road networks. Being highways the fundamental elements within those networks and the fact that those networks are meeting continuously an increase of traffic loads, the commitment by the contractors towards quality, can be only assured by an attentive and rigorous support by the laboratories.

The present dissertation is focused on highway construction, especially on earthwork operations, and their support by laboratorial control. It is the result of construction observation and laboratorial testing observations and readings concerning the A and B sections belonging to the Baixo Alentejo Highway. The following text was written between a considerable shorter period in relation to the period needed to construct the entire two sections. This implies that the laboratorial test which were observed were those required by the construction situation and not those which are required for the entire section.

Laboratory testing and quality control follows the normal procedures for evaluating the physic and mechanical material characteristics and for a study of a soil-cement mixture for the sub grade.

This dissertation was written at TECNOVIA – Sociedade de Empreitadas S.A. and more accurately at its production sites near Ferreira do Alentejo and Ourique between March, April and May 2017.

KEYWORDS: Road construction, laboratorial testing, quality control, earthworks.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. DESCRIÇÃO DA OBRA	3
2.1. OBJETIVOS E LOCALIZAÇÃO	3
2.2. TIPO DE CONTRATO E ENTIDADES ENVOLVIDAS	4
2.3. TRAÇADO GEOMÉTRICO	11
3. ORGANIZAÇÃO E EXECUÇÃO DA OBRA	13
3.1. OPERAÇÕES DE TERRAPLENAGEM	13
3.1.1. TIPOS DE MÁQUINAS USADAS EM TERRAPLENAGENS	14
3.2. ORGANIZAÇÃO DO ESTALEIRO	15
3.3. EXECUÇÃO DE PLATAFORMAS JUNTO À A2	17
3.3.1. LOCALIZAÇÃO	18
3.3.2. NOTAS SOBRE ESCAVAÇÕES SEGUNDO O CADERNO DE ENCARGOS DAS EP	18
3.4. EXECUÇÃO DE ATERRO TÉCNICO	19
3.4.1. LOCALIZAÇÃO	19
3.4.2. NOTAS SOBRE ATERROS TÉCNICOS SEGUNDO O CADERNO DE ENCARGOS DAS EP	20
3.4.3. NOTAS SOBRE AS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM ATERROS SEGUNDO O LCPC- SETRA	20
3.5. APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM LEITO DE PAVIMENTO E CAMADA DE BASE	24
3.5.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS	24

3.5.2. LOCALIZAÇÃO.....	25
3.5.3. PROCESSO CONSTRUTIVO.....	26
3.5.4. NOTAS SOBRE AS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM LEITO DE PAVIMENTO SEGUNDO o LCPC-SETRA	28

4. ACOMPANHAMENTO LABORATORIAL E CONTROLO DE QUALIDADE.....

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	37
4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	37
4.1.2. LIMITES DE ATTERBERG.....	41
4.1.2.1 Atividade das argilas	41
4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	41
4.2.1. CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA OU ASTM.....	43
4.2.2. CLASSIFICAÇÃO PARA FINS RODOVIÁRIOS OU AASHO	47
4.2.2.1. O Índice de Grupo	48
4.2.3. CLASSIFICAÇÃO LCPC-SETRA	49
4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS.....	52
4.3.1. TEOR DE HUMIDADE NATURAL.....	52
4.3.2. EQUIVALENTE DE AREIA	52
4.3.3. COMPACTAÇÃO E ENSAIO PROCTOR.....	53
4.3.4. ENSAIO CBR.....	56
4.3.5. ENSAIO DE CARGA COM PLACA	59
4.3.6. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO COM GAMADENSÍMETRO	61
4.3.7. ENSAIO DE DEGRADABILIDADE LOS ANGELES.....	61
4.3.8. ENSAIO MICRO-DEVAL EM PRESENÇA DA ÁGUA (MDE)	62
4.3.9. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO VALOR DE AZUL DE METILENO	62
4.3.10. ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DA FRIABILIDADE DAS AREIAS.....	62
4.4. ESTUDO PARA APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO.....	64
4.4.1. REQUISITOS APLICÁVEIS AOS MATERIAIS E À MISTURA DE SOLO-CIMENTO.....	65
4.4.2. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	66
4.4.3. CARATERIZAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO	67
4.4.4. CONCLUSÕES.....	69

5. CONCLUSÃO	70
BIBLIOGRAFIA	72
ANEXOS	71
ANEXO A – REGISTO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DA OBRA	73
ANEXO B - ANÁLISE PARA A IDENTIFICAÇÃO DE UMA AMOSTRA DE SOLO	91
ANEXO C - RESULTADOS DE UM ENSAIO DE CARGA COM PLACA	102
ANEXO D - ELEMENTOS DE ESTUDO DE UM SOLO-CIMENTO	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 - Localização da obra em território nacional continental.....	6
Fig.2.2 - Localização do lanço A	7
Fig.2.3 - Localização do lanço B	7
Fig.2.4 - Localização do traçado do lanço A	8
Fig.2.5 - Localização do traçado do lanço B	8
Fig.2.6 - Traçado geral do lanço A e B	9
Fig.2.7 - Nó de Grândola Sul.....	10
Fig.2.8 - Ligação da A26 com o IP8.....	10
Fig.2.9 - Perfil Transversal em plena via.....	12
Fig.3.1 - Organograma da empreitada	15
Fig.3.2 - Locais de apoio à produção	16
Fig.3.3 e 3.4 – Modos de atuação da escavadora-giratória.....	18
Fig.3.5 - Local de construção das plataformas e de vazadouro de terras	18
Fig.3.6 - Localização do aterro técnico e local de origem do material.....	20
Fig.3.7 - Nó de Grândola Sul e localização do ramo 2	21
Fig.3.8 - Zonamento de um aterro.....	24
Fig.3.9- Locais de tratamento de solos com cimento.....	25
Fig.3.10 - Área de aplicação de solo-cimento nos ramos do nó de Grândola Sul.....	25
Fig.3.11 - Área de aplicação do solo-cimento nas proximidades do nó de ligação com o IP8	26
Fig.3.12. Soluções A e B tidas como hipóteses de estrutura de pavimento em função do módulo de deformabilidade da fundação	27
Fig.3.13 - Esquema do camião cisterna para aplicação da rega de colagem	28
Fig.3.14 - Definição de termos usados no LCPC-SETRA	28
Fig.3.15 - Classificação dos materiais tratados segundo as suas características mecânicas	32
Fig.4.1 - Fotografia do interior de um laboratório da Tecnovia	34
Fig.4.2 - Curva granulométrica.....	38
Fig.4.3 - Resumo de classificação dos solos pelo LCPC-SETRA	51
Fig.4.4 - Curva de compactação e de saturação	54
Fig.4.5 - Momentos de aplicação das pancadas no ensaio Proctor	56
Fig.4.6 - Pesagem a volume constante para determinação da baridade máxima seca	56
Fig.4.7 - Curva CBR que relaciona carga (KN)/ penetração(mm)	58
Fig.4.8 - Determinação do valor final do CBR.....	59
Fig.4.9 - Gráfico da relação tensões/assentamentos dos sucessivos ciclos de carga e descarga.....	60

Fig.4.10 - Material necessário para o ensaio de carga com placa	60
Fig.4.11 - Esquema de funcionamento de um gamadensímetro	61
Fig.4.12 - Utilização do gamadensímetro para leitura do grau de compactação de uma camada de aterro	61
Fig.4.13 - Tambor rotativo usado no ensaio de degradabilidade Los Angeles.....	62
Fig.4.14 - Local de recolha do pó de pedra a aplicar nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul	64
Fig.4.15 - Local de empréstimo da areia siltosa mal graduada a aplicar nos ramos de acesso ao nó de ligação com o IP8.....	65
Fig. A.1.1 - Aspeto geral antes do início da construção das plataformas.....	76
Fig.A.1.2 - Início da desmatação e renovação de vedações	76
Fig.A.1.3 - Aspeto adiantado de uma das plataformas.....	77
Fig.A.1.4 - Vista geral da plataforma poente.....	77
Fig.A.1.5 - Extração frontal de terras e colocação no camião para transporte.....	78
Fig.A.1.6 - Aspeto do local de vazadouro	78
Fig.A.1.7 - Extração frontal de terras e colocação no camião para transporte.....	79
Fig.A.1.8 - Nivelamento do fundo de caixa da plataforma	79
Fig.A.1.9 - Colocação do geotêxtil sobre o fundo de caixa.....	80
Fig.A.1.10 - Aspeto após colocação da primeira camada de agregado britado	80
Fig.A.1.11 - Início do espalhamento da segunda camada de agregado britado	81
Fig.A.1.12 - Gruas em operação	81
Fig.A.2.1 - Humidificação da camada antes da compactação	82
Fig.A.2.2 - Operações de espalhamento e compactação da camada do aterro técnico	82
Fig.A.2.3 - Descarga do material britado para espalhamento	83
Fig.A.2.4 - Espalhamento com Bulldozer.....	83
Fig.A.2.5 - Aspeto geral do aterro em construção	84
Fig.A.3.1 - Deposição do cimento sobre a PSA.....	84
Fig.A.3.2 - Mistura do cimento com o material granular britado	85
Fig.A.3.3 - Nivelamento da camada do Leito de Pavimento	85
Fig.A.3.4 - Verificação da quantidade depositada por m ²	86
Fig.A.3.5 - Aspeto da superfície da PSA antes da aplicação do solo-cimento.....	86
Fig.A.3.6 - Transferência do cimento do camião cisterna para a espalhadora	87
Fig.A.3.7 - Conjunto cisterna de água, máquina misturadora, cilindro, niveladora	87
Fig.A.3.8 - Rega de impregnação para impermeabilização do LP	88
Fig.A.3.9 - Aspeto final da camada de LP numa das faixas da plataforma	88

Fig.A.3.10 - Nivelamento das camadas granulares para base do pavimento	89
Fig.A.3.11 - Processo de varrimento da base após compactação	89
Fig.A.3.12 - Aplicação da rega de colagem por impregnação betuminosa de rotura lenta	90
Fig.A.3.13 - Aspeto final da camada de base após rega de colagem	90

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 3.1 – Condições de utilização de materiais da classe D em aterro	22
Quadro 3.2 - Medidas a tomar para a utilização de solos em aterro segundo o manual LCPC	23
Quadro 3.3 - Medidas a tomar para a utilização de solos em LP segundo o manual LCPC.....	30
Quadro 3.4 – Valores de cálculo para o módulo de Young a usar como hipóteses na fundação de pavimento	30
Quadro 3.5 – Condições de utilização dos materiais da classe D em leito de pavimento	31
Quadro 3.6 – Condições de sobreclassificação da capacidade das plataformas com camadas de leito de pavimento em materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos	32
Quadro 4.1 - Documentos normativos aplicáveis na execução de aterros segundo o CE das EP	36
Quadro 4.2 - Organização das partículas dos solos pelas suas dimensões	37
Quadro 4.3 - Tabela de percentagem de material retido e acumulada passada em cada peneiro ASTM	38
Quadro 4.4 - Características granulométricas dos materiais em aterro	42
Quadro 4.5 - Classificação Unificada dos Solos	44
Quadro 4.6 - Quadro de classificação utilizada no CE das EP.....	46
Quadro 4.7 - Quadro de classificação dos solos para fins Rodoviários ou AASHO.....	48
Quadro 4.8 - Quadro de equivalências entre as duas classificações (Unificada e AASHO).....	49
Quadro 4.9 - Caracterização da areia mal graduada siltosa e do pó de pedra a utilizar na mistura solo-cimento (dados Tecnovia)	66
Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de compactação Proctor sobre as misturas solo-cimento com a areia mal graduada siltosa (dados Tecnovia)	67
Quadro 4.11 - Resultados do ensaio de compactação Proctor sobre as misturas solo-cimento com o pó de pedra (dados Tecnovia)	67
Quadro 4.12 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas solo-cimento com a areia mal graduada siltosa (dados Tecnovia)	68
Quadro 4.13 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas solo-cimento com a areia mal (dados Tecnovia).....	68
Quadro 4.14 - Resultados dos ensaios CBR imediato das misturas solo-cimento com areia mal graduada siltosa e com o pó de pedra (dados Tecnovia)	68
Quadro 4.15 - Percentagem de areia bem graduada siltosa, cimento e teor de humidade a aplicar in situ (dados Tecnovia)	69
Quadro 4.16 - Percentagem de pó de pedra, cimento e teor de humidade a aplicar in situ (dados Tecnovia).....	69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

E - Módulo de elasticidade [GPa]

Ef - Módulo de elasticidade da fundação[GPa]

ρ_{mv} – Baridade Máxima Teórica

γ_d – Peso volúmico seco

Wo – Teor de humidade

Wop – Teor de humidade ótimo

ABGE – Agregado Britado de Granulometria Extensa

AR – Arase Terrassement

PST – Partie Supérieure des terrassements

ASTM – American Society for Testing Materials

BS – Norma British Standard

CBR – California Bearing Ratio

C.E. – Caderno de Encargos das Estradas de Portugal

EA – Equivalente de Areia

EN – Norma Europeia

EP – Estradas de Portugal

FEUP – Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto

ISO – International Organization for Standardization

JAЕ - Junta Autónoma de Estradas

LCPC - Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NF – Norma Francesa

NP – Norma Portuguesa

NP EN – Norma Portuguesa baseada em Norma Europeia

PSA – Parte Superior do Aterro

SETRA – Service D’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

EU – União Europeia

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O presente documento resulta do acompanhamento da execução da obra do lanço A e B da autoestrada do Baixo Alentejo (futura A26), e do seu controlo laboratorial. Esse acompanhamento decorreu durante os meses de março, abril e maio de 2017, teve lugar nos locais de execução da obra e também no laboratório de apoio da Tecnovia.

O referido lanço A e B tem uma extensão de aproximadamente 12km em perfil de autoestrada e desenvolve-se desde o nó de Grândola Sul até ao nó de ligação com o IP8 e é produto do redimensionamento da Concessão do Baixo Alentejo que previa ainda a execução dos lanços A, B, C e D entre Sines e Beja, mas que, por motivos de ordem económica, ainda não foi possível executar. A construção deste pequeno troço de autoestrada foi reiniciada em 2015 após 5 anos dos trabalhos serem interrompidos.

A obra, assim resumida, engloba um conjunto de operações de grau de dificuldade de execução variável e consiste, sumariamente, em escavações, construção de aterros, tratamento de leito de pavimento com solo-cimento, aplicação de bases de pavimentos e construção de órgãos de drenagem e que, em simultâneo, funcionam como foco do acompanhamento laboratorial que se considerou ser oportuno levar a cabo.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

O objetivo central da dissertação é sintetizar num documento o conjunto de operações típicas que são postas em prática numa obra desta natureza, em fase de terraplenagens, e de, em paralelo, o registar dos passos que possibilitem o assegurar do controlo de qualidade da mesma fase através do seu acompanhamento laboratorial.

Recorre, naturalmente, à observação presencial dos procedimentos sequenciais de uma obra rodoviária, da execução de alguns ensaios laboratoriais e de consulta bibliográfica essencial.

Julga-se também pertinente fazer uma ressalva. O objetivo maior do autor na realização de uma dissertação de caráter empresarial é o da consolidação de conhecimentos adquiridos nos anos do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil e em especial das unidades curriculares da opção de Vias de Comunicação. Julgou-se ser urgente a observação *in loco* da execução de uma via procurando essencialmente uma renovação do saber através da prática.

Este documento procura ser uma aproximação à direção de obra, que abarque os domínios mais relevantes de uma obra rodoviária, numa fase intermédia da sua execução, num local, num período de tempo determinado, com as condições meteorológicas encontradas e com os meios possíveis.

Obviamente sem desprimor pelo rigor que se exige de um trabalho de nível universitário, não será tanto na especialização ou na análise detalhada de um determinado tema no domínio das vias de comunicação que será dado o enfoque. Reconhece-se, todavia, o risco de superficialidade, própria de um alargamento do espectro de observação.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação desenvolve-se em cinco capítulos e resulta da leitura de alguma bibliografia disponível, do acompanhamento presencial dos trabalhos em obra e dos respetivos estudos de laboratório nas instalações de Ourique da TECNOVIA.

Segue o procedimento próprio de um trabalho académico, mas de carácter mais próximo da execução e de articulação com os conhecimentos adquiridos nas unidades curriculares da opção de Vias de Comunicação. Parte da recolha de informação relativa à obra nomeadamente, do seu projeto de execução, da recolha de informação relativa aos ensaios laboratoriais, nas condições de aplicação dos materiais e como estes enquadram no controlo de qualidade.

O documento inicia-se com um capítulo introdutório onde são explicados os aspetos gerais da obra tais como a sua localização espacial e temporal, objetivos e metodologia adotada.

Segue-se um capítulo de descrição pormenorizada da obra e onde se reproduzem os elementos de projeto de uma obra rodoviária e que resultam essencialmente da leitura do projeto de execução aprovado. Aqui são descritos os elementos do traçado, dimensionamento, cláusulas técnicas e entidades envolvidas.

O terceiro capítulo é dedicado à organização da execução da obra. Pretende explicar aspetos de gestão do estaleiro, da localização e gestão das empreitadas, das máquinas para transporte de materiais, de escavação, espalhamento e compactação de solos, da execução de aterros e tratamento de camada de leito de pavimento com solo-cimento.

O quarto capítulo é dedicado ao acompanhamento laboratorial e de controlo de qualidade que é assegurado durante a execução da obra. Engloba o conjunto de ensaios que permitem a classificação dos solos segundo a classificação Unificada, AASHO e LCPC e ainda os ensaios que permitem avaliar a qualidade dos aterros em fase de execução. No final deste capítulo é descrito um estudo de aplicação de solo-cimento em leito de pavimento.

O último capítulo é de conclusão e procura refletir acerca do trabalho efetuado e das dificuldades surgidas no encadeamento das fases projeto/execução/controlo de qualidade.

No final estão incluídos em Anexo um registo fotográfico das etapas descritas no capítulo 3 (Anexo A), uma análise para a identificação de uma amostra de solo (Anexo B), um conjunto de resultados de um ensaio de carga com placa (Anexo C) e um conjunto de elementos de estudo de uma mistura de solo-cimento (Anexo D).

2

DESCRIÇÃO DA OBRA

2.1. OBJETIVOS E LOCALIZAÇÃO DA OBRA

O presente trabalho é fruto do acompanhamento da execução da obra do lanço A e B da futura Autoestrada do Baixo Alentejo, denominada A26, e que ligará Sines a Beja desenvolvendo-se paralelamente ao atual IP8.

Na sua totalidade, o estudo para a concessão do Baixo Alentejo localiza-se no interior sul do país, atravessando os distritos de Setúbal, Évora e Beja, e abrangendo os municípios de Sines, Santiago do Cacém, Grândola, Alcácer do Sal, Évora, Portel e Beja, Vidigueira, Ferreira do Alentejo e Castro Verde (Fig.2.1, 2.2 e 2.3).

A obra, foco do presente trabalho, atravessa unicamente os distritos de Setúbal e Beja numa extensão de aproximadamente 12km, entre o nó de Grândola Sul e o cruzamento do IP8 com a EM525 perto da povoação de Canhestros. Por outras palavras, desenvolve-se aproximadamente 5km para Oeste e 7km para Este da nova ponte sobre o rio Sado perto da localidade de Santa Margarida. (Fig.2.6, 2.7 e 2.8).

A terminologia utilizada “Lanço A e B” decorre já do projeto de execução apresentado em 2010 e é fruto da necessidade de se fracionar uma obra de grandes extensões em segmentos menores. (Fig.4 e 5). A obra inclui a parte final do lanço A até ao viaduto VI00.01 sobre a autoestrada do Algarve (A2) numa extensão de 566m, entre os PK 22+265 e 23+191, e também os 11200m seguintes, já pertencentes ao lanço B, entre os PK 0+000 e 11+200 da referida Sub-Concessão.

Os seus objetivos são claramente definidos na Memória Descritiva do Projeto de Execução:

“De um modo geral, verifica-se que dos traçados apresentados advêm impactes positivos em termos, nomeadamente, socioeconómicos, mobilidade, acessibilidade, segurança e conforto, à custa da boa compatibilização de um conjunto de critérios, condicionamentos e parâmetros, inseridos num contexto global do estudo.

Esta compatibilização traduz uma otimização da fluidez de circulação (nível de serviço B até ao ano horizonte 2032) e a garantia de uma velocidade base de 120 km/h para a A26, que irá substituir o atual I.P.8, entre Sines e Beja, que não apresenta características compatíveis com a de um eixo fundamental da rede viária nacional.

Ainda neste âmbito, as soluções apresentadas, garantem o contacto entre os grupos populacionais locais, ao mesmo tempo que procura salvaguardar as zonas mais sensíveis do ponto de vista ambiental.

Com a construção da A26 cria-se uma ligação privilegiada do interior do país com o litoral e com os grandes eixos de tráfego internacional, através da ligação à A2, ao I.C.33, I.C.1 e ao I.P.8, potenciando desta forma o desenvolvimento das trocas comerciais da região com o resto do território e a mobilidade de pessoas e bens.”

Segue-se uma breve descrição da totalidade dos lanços A e B, elementos também retirados da Memória Descritiva do Projeto de Execução:

Lanço A:

“O presente lanço, tem início no Nó de Roncão de ligação ao IC33 e actual N120 após o final do lanço D) - (IP8) - Sines / Nó de Roncão (IC33) e termina no Nó de Grândola Sul que estabelece a ligação ao IP1 (A2), ao IC1, e à EN259, a sudeste de Grândola.” (Fig.2.4).

“Com uma extensão de 23.191,582 m, tem uma orientação predominante Oeste / Este. Inclui 4 Viadutos e 32 Restabelecimentos, aos quais se associam 23 Obras de Arte Correntes (14 Passagens Superiores, 4 Passagens Inferiores, 5 Passagens agrícolas), e ainda a PS para transposição da via ferroviária – Linha do Sul a km 21+560 (P.S.C F+PI 21.01) e uma passagem de fauna no km 7+345 (P.F + P.H.07.02)”

Lanço B:

“Este lanço inicia-se ao km 0+000, sendo coincidente com o final do Lanço a) Nó de Roncão (I.C.33) / Nó de Grândola Sul (I.P.1), e termina ao km 18+550,000.” (Fig.2.5).

“Com uma orientação predominante Oeste / Este, inclui 1 Pontão, 3 Viadutos, entre os quais se encontra a Ponte do Sado, 6 Passagens Superiores, 5 Passagens Agrícolas e 1 muro.”

É de referir também que durante o estrito período de contrato entre a FEUP, a TECNOVIA e o estudante, ou seja entre 2 de março de 2017 e 31 de maio de 2017, os trabalhos executados e matéria de estudo no presente trabalho são:

No lanço A:

- Construção de plataformas junto à A2;
- Construção de aterros de ramos de acesso ao nó de Grândola Sul;
- Tratamento com solo-cimento em leito do pavimento nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul.

No lanço B:

- Tratamento com solo-cimento em leito do pavimento na ligação da A26 com o IP8;
- Execução de camada de base de pavimento na ligação da A26 com o IP8.

2.2. TIPO DE CONTRATO E ENTIDADES ENVOLVIDAS

Uma obra de natureza rodoviária pode tomar várias formas. Entre elas podem enumerar-se:

- a construção de uma nova via (que pode incluir um alargamento de via ou melhoramentos no alinhamento);
- uma reabilitação de via (repavimentação por ex.);
- uma obra de manutenção (ocasional ou periódica);
- a gestão operacional de uma rede de estradas.

Paralelamente, para a execução de uma obra, uma ou várias entidades (públicas e/ou privadas) estabelecem um acordo em que é determinado o papel de cada uma delas.

No caso de ser apenas uma entidade a desenvolver o projeto, trata-se de um projeto de natureza interna, ou seja, todos os aspetos associados ao planeamento assim como à execução do projeto e fiscalização da execução da obra são da responsabilidade de uma única entidade, normalmente uma empresa pública (JAE, REFER por ex.). No passado, este formato era o mais comum para todas as obras rodoviárias, estando atualmente a ser menos utilizado.

Este formato tem a vantagem de não serem gerados desacordos inter entidades assim como os trabalhadores envolvidos na obra estão normalmente familiarizados com os procedimentos a tomar. Uma desvantagem prende-se normalmente com o controlo de custos que se pode revelar inadequado ou ainda o risco de um certo laxismo no controlo da qualidade já que a entidade executante e a entidade fiscalizadora são uma só.

A Autoestrada do Baixo Alentejo é, ao invés, regida por um contrato de sub-concessão. A existência de um contrato para a execução de um projeto com esta natureza pressupõe portanto, a existência de várias entidades que chegam a acordo para a sua implementação. Neste caso é a empresa pública Estradas de Portugal que concessiona/delega as funções de Dono de Obra a uma entidade privada e esse direito vai vigorar durante um certo período de tempo de exploração. Sob o mesmo contrato, existem entidades que são as autoras do projeto, outras que são as executantes da obra e outra que é a entidade fiscalizadora. Os contratos entre várias entidades procuram a eficiência de operações através da redução de custos quer na execução, quer na exploração.

As concessões podem ser uma oportunidade para se expandir a infraestrutura rodoviária sem recurso ao financiamento público sendo que os custos serão financiados futuramente pelo pagamento de portagens de quem vai utilizar a autoestrada. Quando o tempo a que uma empresa tem direito a explorar uma determinada via de comunicação cessa, esta via passa para o domínio público.

Como vantagens das concessões pode referir-se que os projetos implementados ao seu abrigo tendem a ser executados mais rapidamente do que aqueles que são dinamizados apenas pelo estado; os custos são suportados por quem utiliza a autoestrada e não pelos contribuintes e, além disso, existe uma procura na eficiência e inovação durante a execução da obra. Desvantagens prendem-se com o tempo requerido para o estudo do projeto e, a longo prazo, na falta de regulação do valor das portagens a pagar pelos utentes.

Desde o início da adjudicação para a Autoestrada do Baixo Alentejo foram as seguintes as entidades envolvidas:

Entidade adjudicatária: EP – Estradas de Portugal

Dono de Obra: SPER – Sociedade Portuguesa para a Construção e Exploração Rodoviária, S.A.

Autores do Projeto: IDOM – Serviços de Engenharia e Consultoria, Lda.

EDGAR CARDOSO – Laboratório de Estruturas, Lda.

PROCESL – Engenharia Hidráulica e Ambiental, Lda.

Entidades executantes: Edifer, Dragados, Tecnovia, Conduril, Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

Entidade fiscalizadora: Norvia

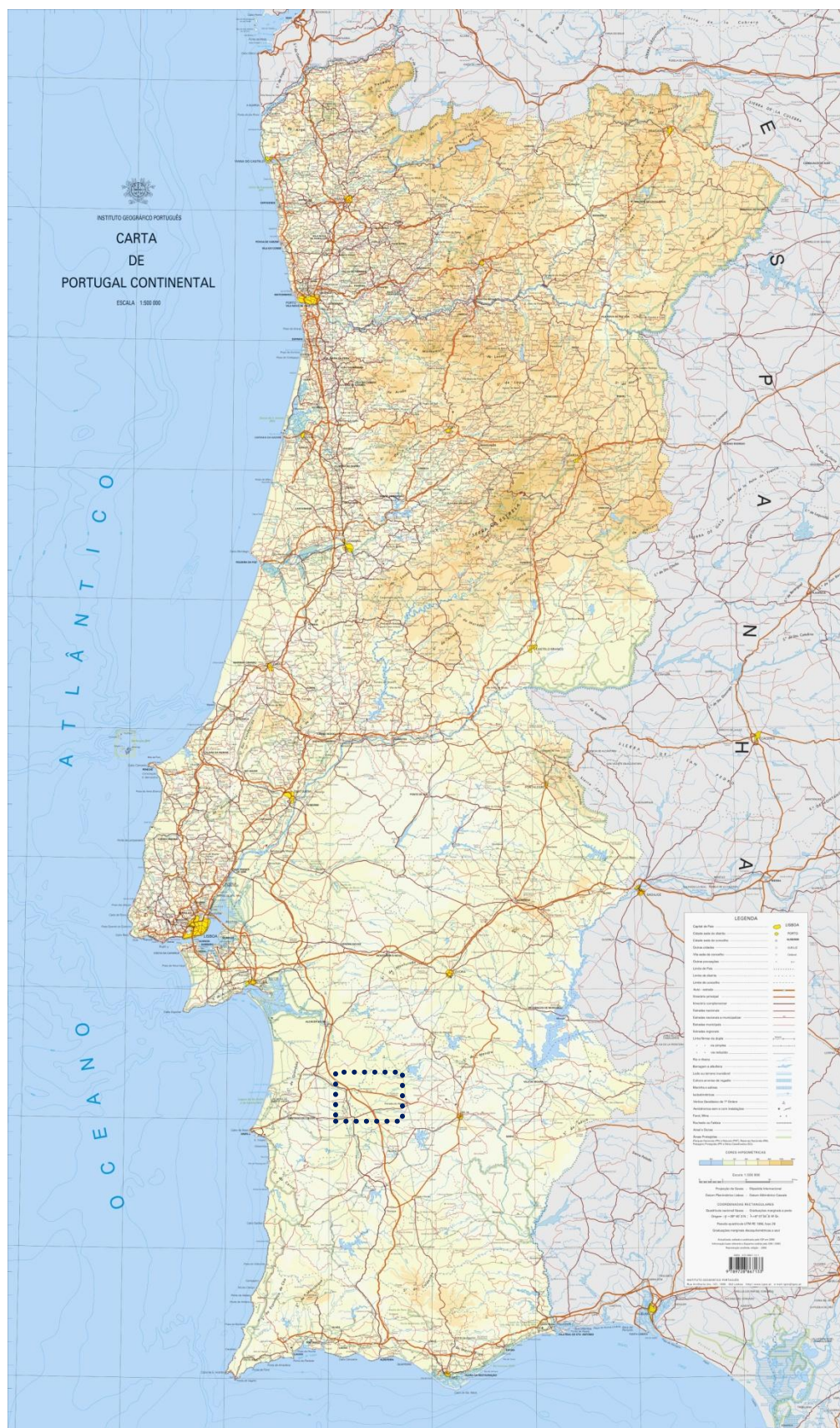


Fig.2.1 – Localização do lanço A e B em Portugal continental

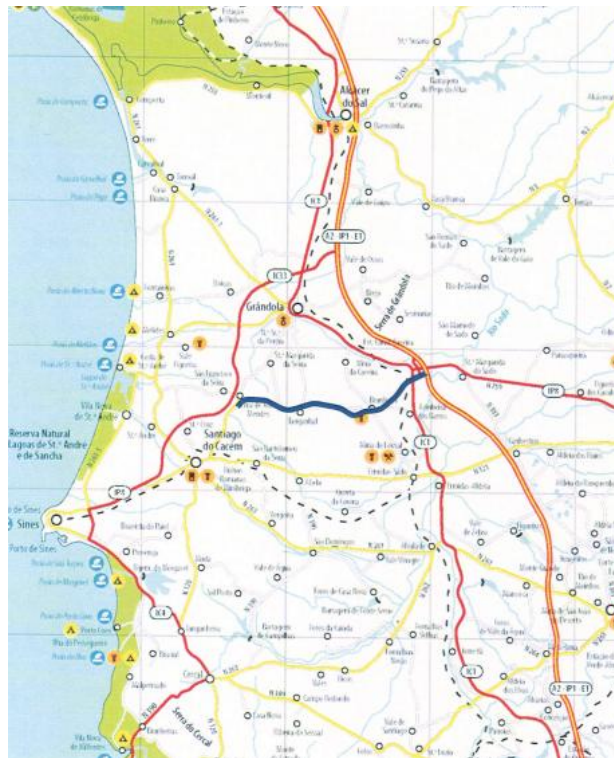


Fig.2.2 - Localização do lançaço A - Nó de Roncão (IC33) / Nó de Grândola Sul (IP1)

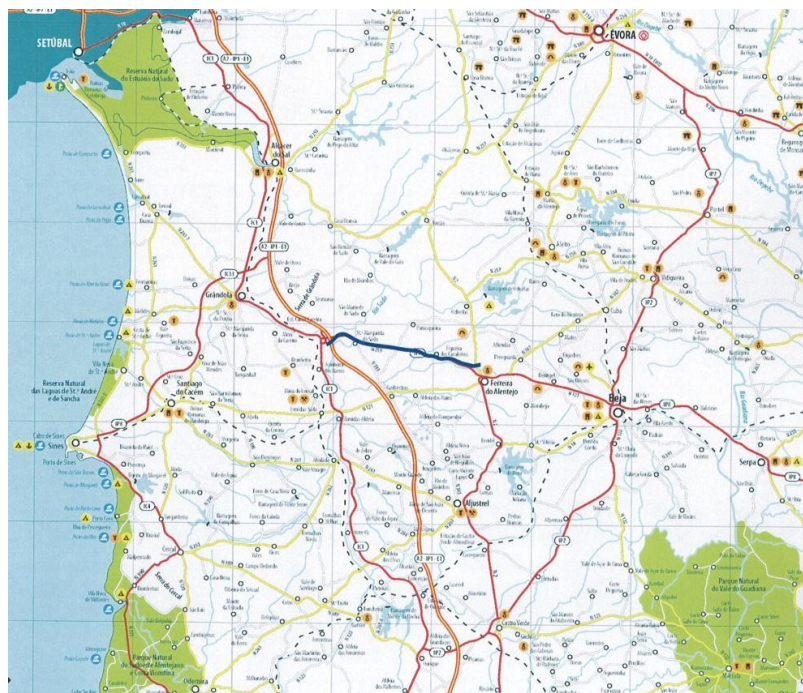


Fig. 2.3 - Localização do lanço B - Nó de Grândola Sul (I.P.1) / Figueira dos Cavaleiros



Fig.2.4 - Localização do traçado do lanço A

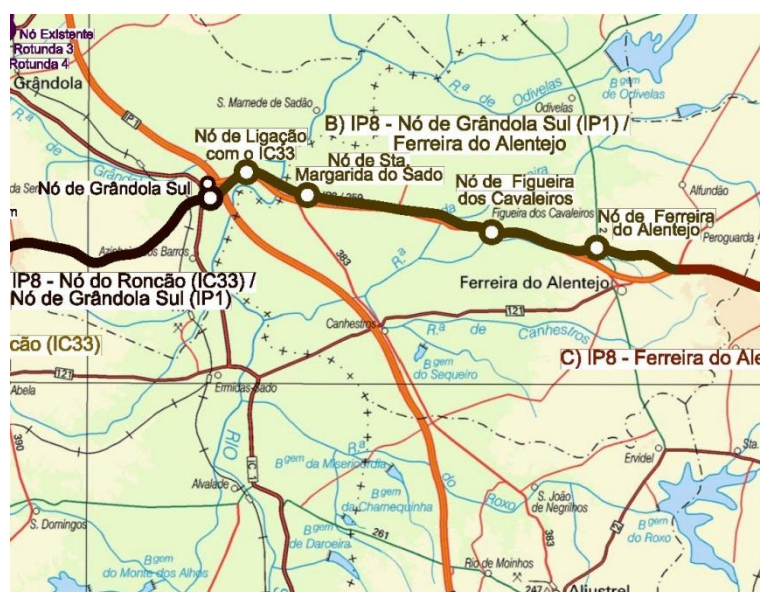


Fig.2.5 - Localização do traçado do lanço B

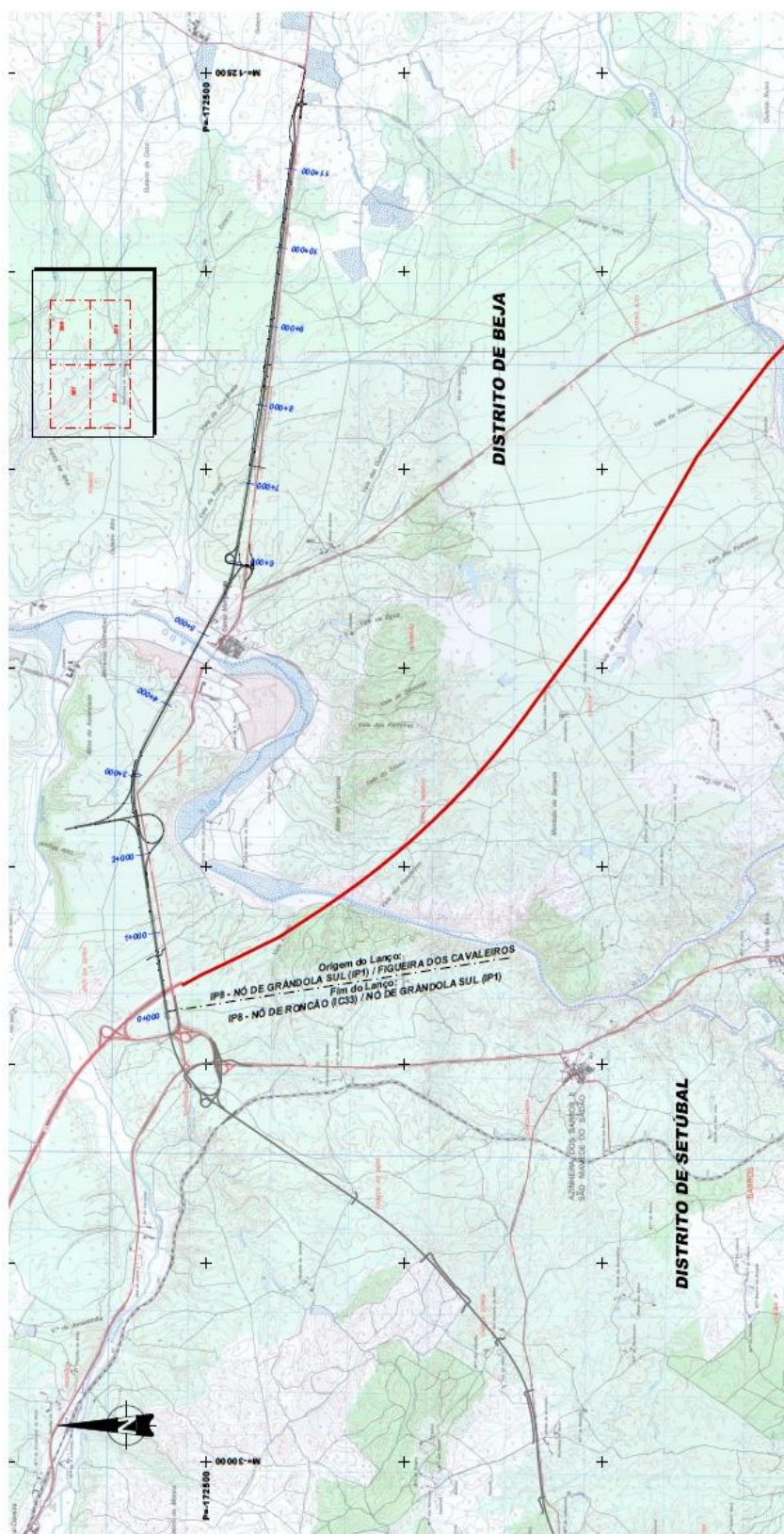


Fig. 2.6 – Traçado geral do lanço A e B (a linha tracejada marca a fronteira entre os dois lanços)

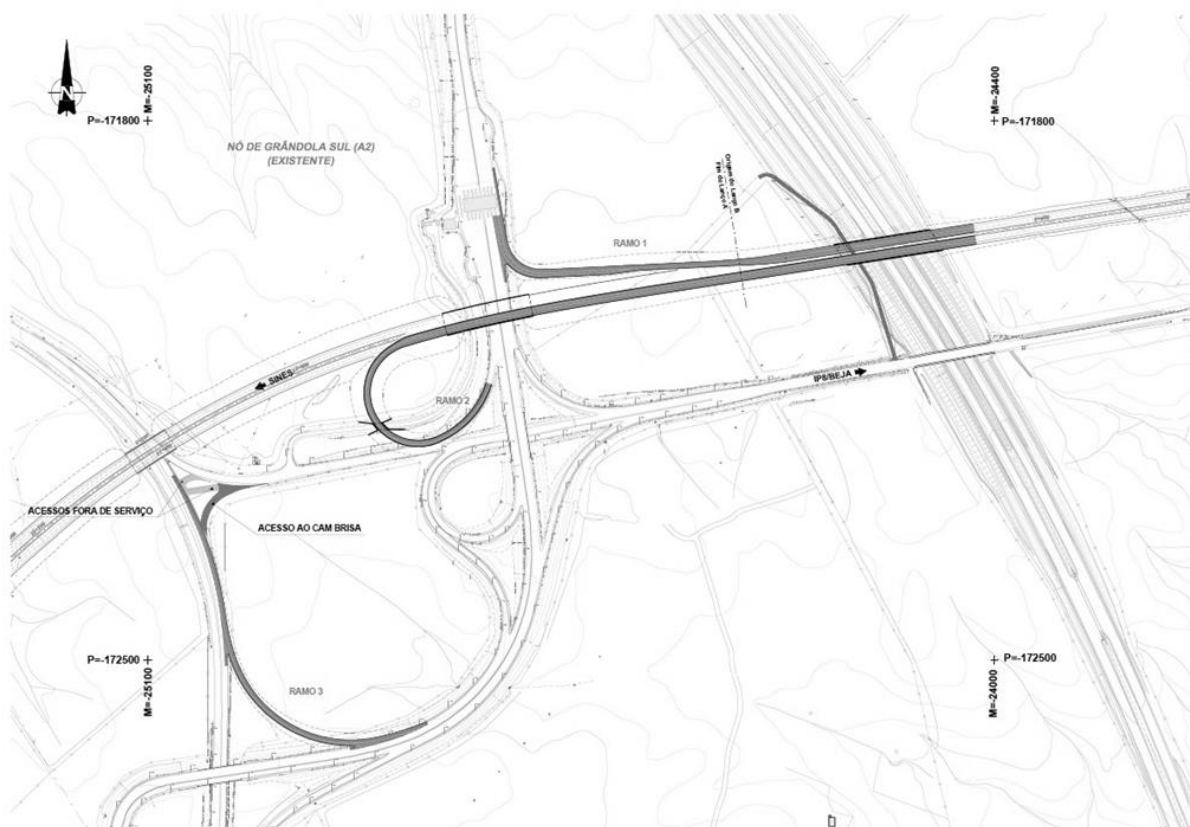


Fig. 2.7 - Nó de Grândola Sul, início do lanço A e B

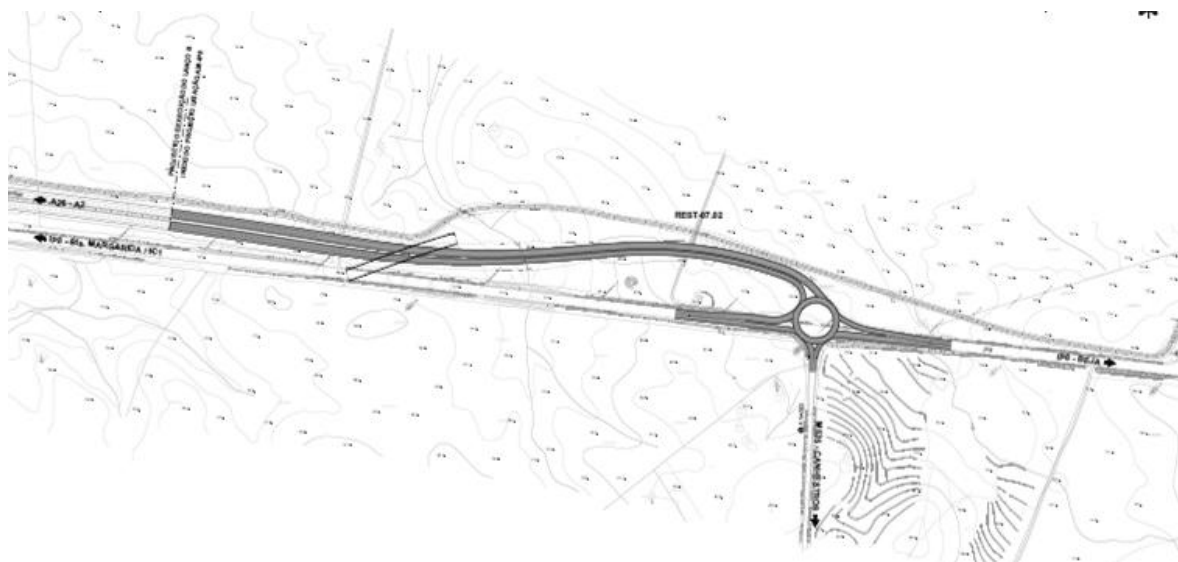


Fig. 2.8 - Rotunda de ligação da A26 com o IP8, fim do lanço A e B

2.3. TRAÇADO GEOMÉTRICO

São elementos constantes das peças escritas, os seguintes limites para definição geométrica do traçado em planta, perfil longitudinal e perfil transversal de ambos os lanços. Nesta definição foram tidas em conta as *Normas de Traçado*, *Normas de Intersecções* e *Normas de Nós de Ligação* da Estradas de Portugal, EP.

Velocidades base (lanço A e B):

Plena Via	120km/h
Nós	60km/h

Valores limite dos diversos parâmetros geométricos da plena via (lanço A):

Traçado em planta:

Raio mínimo normal $R = 1000 \text{ m}$

Traçado em perfil longitudinal:

Raio mínimo convexo $R = 16000 \text{ m}$

Raio mínimo côncavo $R = 8.000 \text{ m}$

Inclinação máxima de trainéis $i = 3,34\%$

Valores limite dos diversos parâmetros geométricos da plena via (lanço B):

Traçado em planta:

Raio mínimo normal $R = 1200 \text{ m}$

Traçado em perfil longitudinal:

Raio mínimo convexo $R = 16000 \text{ m}$

Raio mínimo côncavo $R = 7000 \text{ m}$

Inclinação máxima de trainéis $i = 3,00\%$

Perfis Transversais Tipo

Foi definido um perfil transversal tipo de 2x2 vias com a seguinte constituição:

Duas faixas de rodagem com 7,50 m por sentido, com duas vias de 3,75 m de largura cada;

Duas bermas direitas com 3,00 m de largura cada, totalmente pavimentadas;

Duas bermas esquerdas com 1,00 m de largura cada;

Separador central relvado com 4,00 m de largura.

Após a plataforma forma-se uma concordância de modo a proteger a plataforma de eventuais erosões do talude com 0,60 m de largura e uma inclinação transversal para o exterior de 10%.

Em ambos os casos, em aterro e em escavação, as concordâncias são revestidas com cobertura vegetal.

Em escavação será implementada uma valeta larga com inclinação 1/3 (v/h) até garantir 0,20 m abaixo da camada de base do pavimento. Em termos de inclinação transversal, em recta, são considerados os habituais 2,5% e, em curva, são respeitadas as inclinações definidas nas Normas da ex-JAE. As transições da sobre elevação são realizadas de forma linear, com os pontos de rotação situados nos limites do separador central. Os perfis transversais em plena via, quer em recta quer em curva, apresentam já em projeto uma falha grave uma vez que é obrigatória uma inclinação transversal de 6% na plataforma, e a partir da denominada linha de controlo das terraplenagens, de modo a dar um “perfeito escoamento das águas” (CE-EP Volume III, Cap.15).

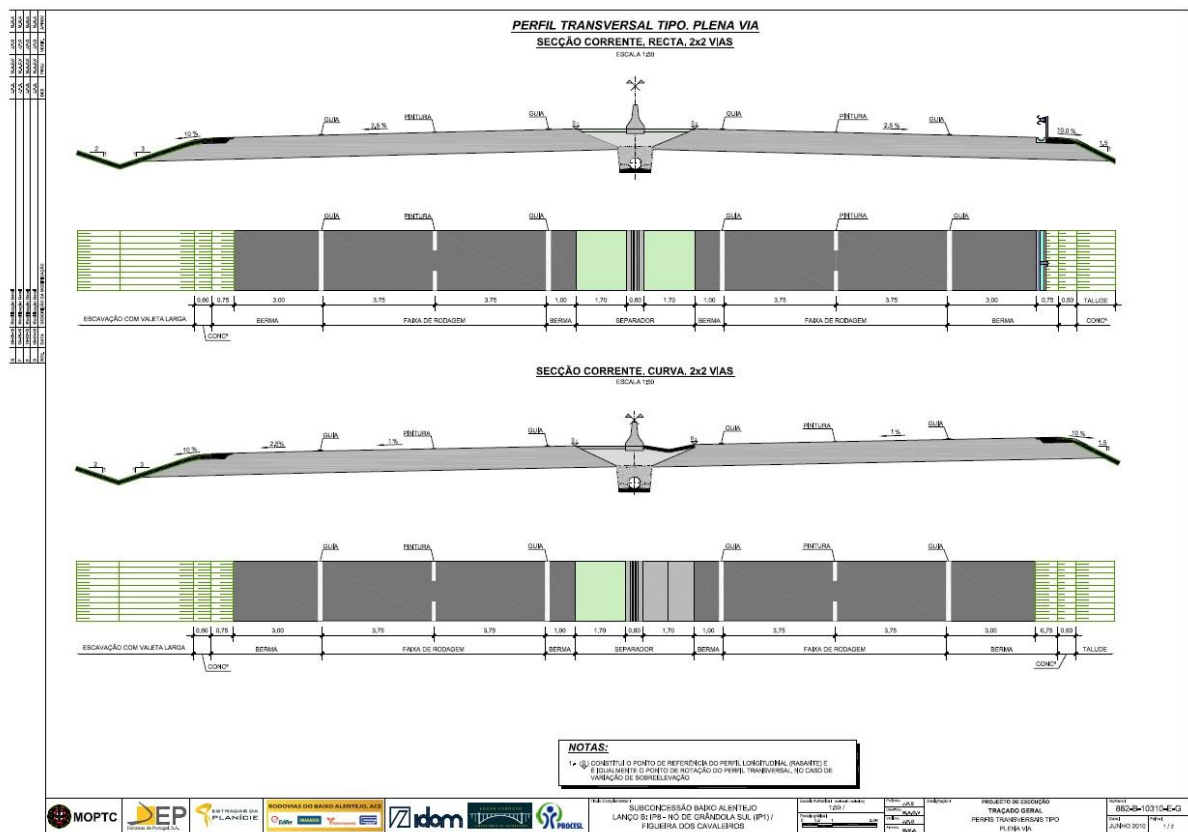


Fig. 2.9 – Perfil transversal em plena via

3

ORGANIZAÇÃO E EXECUÇÃO DA OBRA

3.1. OPERAÇÕES DE TERRAPLENAGEM

A construção de uma nova via de comunicação, e certamente de uma autoestrada, implica o movimento de terras antes da execução das camadas de pavimento. Este movimento de terras toma o nome de terraplenagens e podem envolver as seguintes operações:

- limpeza, desmatação e decapagem
- escavações
- construção de aterros
- compactação
- trabalhos de acabamento

As operações de limpeza, desmatação e decapagem englobam a remoção de árvores, raízes, depósitos de detritos, de todos os elementos que se encontrem acima da superfície terrestre na área onde se vai proceder às terraplenagens e da camada de terra vegetal. Normalmente estas operações são levadas a cabo por bulldozers e operários equipados com ferramentas individuais de corte (roçadoras e enxadas) (fig.A.1.2).

As escavações são as operações de remoção de solos ou rochas de um determinado local de origem e em seguida do seu transporte para outro local de destino, também denominado de vazadouro ou de depósito. O material escavado cujas características mecânicas são consideradas adequadas, é de todo interesse ser reutilizado na construções de aterros, ao passo que o material sobranter ou não adequado será transportado para um local de depósito. O equipamento usado para escavações é o bulldozer, a escavadora giratória, a pá transportadora e o motocraper (fig.A.1.5 e A.1.5.7). No caso de haver maior dificuldade de desmonte do material a escavar (grau de ripabilidade diminuto) pode haver necessidade de recurso a explosivos.

A construção de aterros é necessária quando o alinhamento vertical da estrada necessita de ser elevado da superfície do terreno existente de modo a serem cumpridos determinadas características geométricas da estrada. Melhores características geométricas, entenda-se maiores raios nas curvas ou menores inclinações em perfil, correspondem geralmente a aterros de maior altura. (França, 1991). A inclinação dos taludes, quer de escavação, quer de aterro, vêm descritos no estudo geológico-

geotécnico mas que resumidamente podem ser até de 1:1,5 (vertical:horizontal) no caso de materiais selecionados ou de no máximo 1:3 no caso dos materiais mais fracos do ponto de vista da estabilidade em geotecnia. Os aterros são construídos progressivamente por camadas relativamente finas(*) sendo o material transportado por camiões do local de origem (escavação na linha ou em casos especiais de uma pedreira) para o local onde o material a ser usado é espalhado por bulldozers ou moto-niveladoras. (fig.A.2.3, A.2.4 e A.2.5)

A compactação aumenta a densidade do material através da expulsão do ar e portanto o aumento do contacto entre as partículas. Este é o método mais simples e económico de melhorar a resistência ao corte e compressão, minimizando os assentamentos a prazo. O resultado da compactação depende essencialmente do teor de humidade, do tipo de solo, do equipamento usado e da energia aplicada. O equipamento de compactação tradicional são os cilindros (lisos, vibradores ou de pé de cabra) e as placas vibradoras. (fig.A.2.2)

Os trabalhos de acabamento são sobretudo de remate das terraplenagens e geralmente envolvem o nivelamento fino da superfície das terraplenagens, cobertura dos espaldares com terra vegetal e o acerto das concordâncias do perfil transversal. Os equipamentos mais usados são a moto-niveladora e o bulldozer.

(*)O CE-EP não indica valores de espessura das camadas, apenas lhes exige um determinado Grau de Compactação conforme a zona do aterro que está a ser executada. O LCPC-SETRA distingue o espalhamento em camadas finas (20 a 30cm) das médias (30 a 50cm) nas condições de utilização dos materiais em aterro.

3.1.1. TIPOS DE MÁQUINAS USADAS EM TERRAPLENAGENS

Existe no mercado uma larga variedade de maquinaria usada em movimentos de terra. Algumas máquinas foram desenvolvidas especialmente para este tipo de trabalho ao passo que outras sofreram algumas adaptações por terem sido utilizadas originalmente na indústria mineira ou na de extração de pedra. No entanto, e apesar da origem do fabricante ser diversificada (norte-americana, japonesa, alemã, sueca...), na prática, a escolha dos operadores recai sobre um leque limitado de máquinas de modo a que haja uma standardização no equipamento e daí maior disponibilidade de peças sobressalentes e uma redução de custos de manutenção.

As máquinas podem ser classificadas segundo os seus papéis principais nas operações de movimentos de terra por exemplo:

- máquinas usadas apenas em escavações de materiais (máquinas escarificadoras, perfuradoras e detonadoras, martelos de impacto)
- máquinas usadas para escavar e carregar materiais (máquinas retroescavadoras ou giratórias, pás-carregadoras)
- máquinas usadas para transportar e espalhar materiais (camiões, “dumpers”)
- máquinas usadas para escavar, carregar, arrastar e espalhar materiais (bulldozers, motoscrapers) [14]

3.2. ORGANIZAÇÃO DO ESTALEIRO

Em estaleiro, cada uma destas operações é abordada independentemente, correspondendo a cada uma delas um conjunto de meios a mobilizar e um prazo de execução. O Anexo A apresenta o registo fotográfico da execução das seguintes operações:

- Construção de plataformas junto à A2;
- Construção de aterros de ramos de acesso ao nó de Grândola Sul;
- Tratamento com solo-cimento em leito do pavimento nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul;
- Tratamento com solo-cimento em leito do pavimento na ligação da A26 com o IP8;
- Execução de camada de base de pavimento na ligação da A26 com o IP8.

A figura 3.1 procura ilustrar como se articula o corpo técnico da empresa executante da obra e dentro dele, as relações hierárquicas entre os responsáveis.

A figura 3.2 permite ter uma noção da dispersão dos locais de operação mais importantes . A círculo azul são marcados os extremos do lanço A e B e os locais de apoio à produção com círculo vermelho (pedreiras, estaleiros e vazadouros)

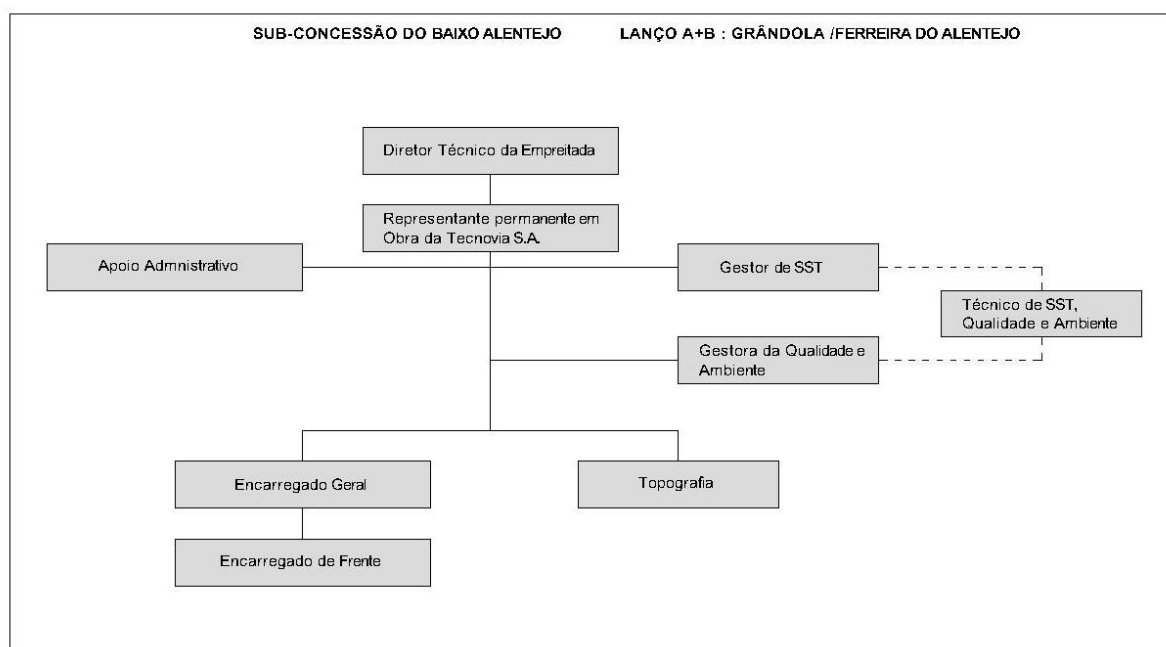


Fig. 3.1 - Organograma da empreitada



Fig. 3.2 - Locais de apoio à produção

- A-** Local de produção do areão para execução dos aterros técnicos nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul
- B-** Local de produção do ABGE para execução de bases do pavimento
- C-** Local de vazadouro de material proveniente de escavações das plataformas junto à A2
- D-** Local de empréstimo de material para execução de aterros ou leito do pavimento e depósito de terra vegetal
- E-** Estaleiro de apoio em Santa Margarida do Sado

Este capítulo é dedicado ao acompanhamento feito às operações mais relevantes que ocorreram durante o período em que foi realizada a dissertação e que resumidamente foram acima descritas.

A cada operação ou empreitada, foi-lhe dedicado um subcapítulo no qual se faz uma descrição da sua localização, das etapas necessárias à sua execução e como cada uma delas se enquadra no Caderno de Encargos (CE) das Estradas de Portugal (EP).

O Caderno de Encargos Tipo, funciona como o referencial das boas práticas construtivas para todas as obras viárias, sendo constituído por normas técnicas que definem as características dos materiais e os métodos construtivos. Relativamente aos trabalhos de execução de aterros e de leito de pavimento, é feita ainda uma leitura do manual do LCPC-SETRA.

3.3. EXECUÇÃO DE PLATAFORMAS JUNTO À A2

Esta operação teve como finalidade a construção de duas plataformas, uma de cada lado da autoestrada do Algarve (A2) com o objetivo de se poder instalar uma grua de grandes dimensões para colocar as vigas de uma obra de arte sobre a referida autoestrada. Esta operação, foi encarada como de algum risco e perturbadora da fluidez de tráfego na A2 (obrigou inclusivé à supressão da berma) pelo que teve de ser executada num curtíssimo período de tempo (uma semana) e no qual foram transportadas cerca de 10 000m³ de terras.

As duas plataformas localizam-se nos Pk0+131m e 0+257m do lanço B, local assinalado com uma circunferência na imagem 3.3. O local de vazadouro, assinalado com seta, localiza-se a uma distância de aproximadamente 1500m do local de extração, ainda no lanço A.

O processo de escavação iniciou-se pela marcação feita pela equipa de topografia da área que vai ser escavada. Esta marcação é feita recorrendo a um sistema de localização de coordenadas por GPS e usando estacas de madeira, nas quais estão assinaladas numa face a altura que devera ser baixada a superfície e na outra face a inclinação do talude (1:1,5; 1:2; 1:3).

Durante esta fase, é de maior importância também o equacionamento de caminhos de circulação de máquinas pesadas (escavadoras e camiões). Estes percursos devem possuir inclinações adequadas às máquinas e ainda boas condições de drenagem superficial.

Na execução deste trabalho foram mobilizadas duas escavadoras giratórias para escavação frontal das terras, seis camiões para transporte do material extraído, um bulldozer para espalhamento de material britado, um cilindro vibrador e uma retroescavadora colocada no vazadouro para espalhamento de terras trazidas pelos camiões.

As figuras em baixo ilustram o modo de atuar das escavadoras giratórias. À esquerda, a máquina atua frontalmente ao material a escavar, enchendo o balde num movimento ascendente. Pode também operar num patamar mais alto do terreno e escavar num movimento de gancho para o interior carregando um camião posicionado numa cota inferior.

As escavadoras giratórias têm a possibilidade de operar em áreas relativamente pequenas devido liberdade de girar em torno de um eixo vertical. É importante que o piso se mantenha nivelado e os rastros firmemente apoiados. (fig.A.1.3., A.1.5., A.1.7. e A.1.8.)

Após a execução do o fundo de caixa foi colocada uma tela geotêxtil e sobre esta, duas camadas de agregado britado de granulometria extensa. No final da compactação da segunda camada foi levado a cabo um ensaio de carga com placa (cap. 4.3.5).

Para efeitos medição de volume de material extraído durante a escavação e compactado após colocação, há que ter em conta o efeito do empolamento dos solos uma ves que durante o transporte para vazadouro, os solos encontram-se descomprimidos e por isso ocupam maior volume do que aquele antes de ser extraído do local. Este empolamento, ou seja o aumento de volume, depende essencialmente da coesão dos solos. Nas areias o empolamento é praticamente nulo enquanto nas argilas pode atingir valores próximos dos 30%. [2]

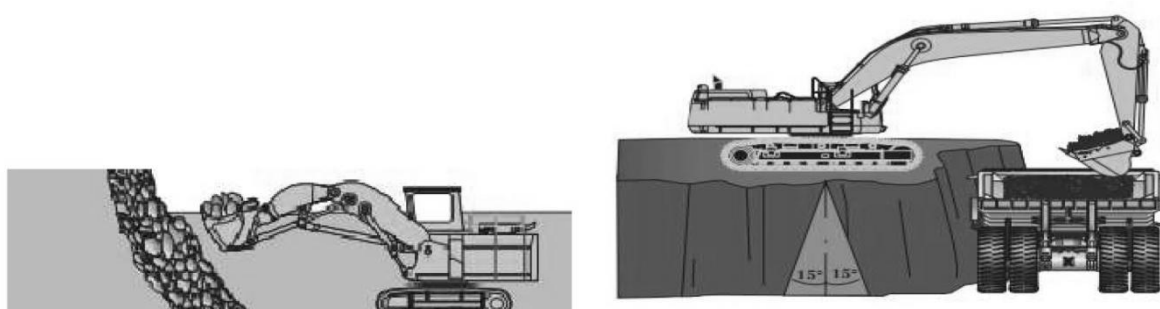


Fig. 3.3 e 3.4 – Modos de atuação da escavadora-giratória [13]

3.3.1. LOCALIZAÇÃO

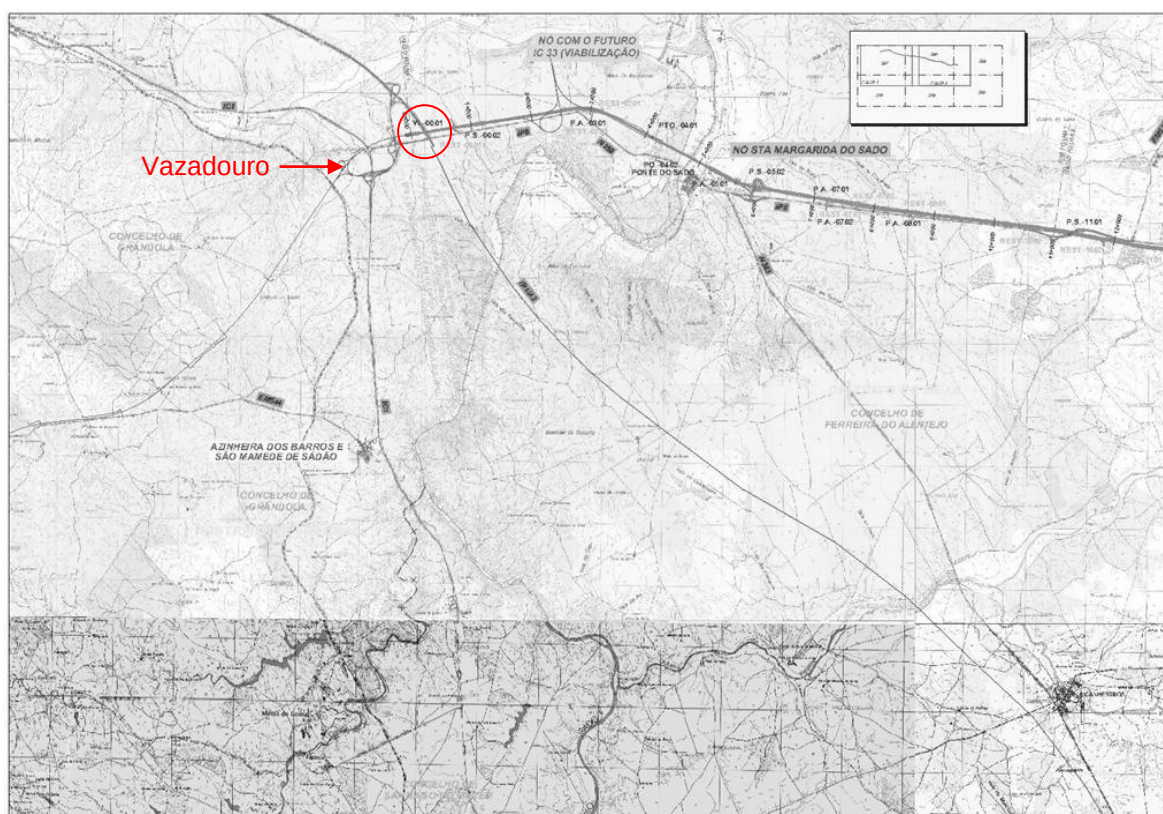


Fig. 3.5 - Localização da construção das plataformas e de vazadouro de terras

3.3.2. NOTAS SOBRE ESCAVAÇÕES SEGUNDO O CADERNO DE ENCARGOS DAS EP

O problema das escavações vem tratado no capítulo 15.01.3 do Caderno de Encargos. Nele apenas são considerados materiais de escavação aqueles que exigem a utilização de meios mecânicos ou explosivos para escavações na linha, execução de valas de grande dimensão ou abertura de fundações de obras de arte. O CE refere também, os equipamentos e meios a utilizar deverão ser os mais adequados para o tipo de material a extrair e das condições atmosféricas.

Neste trabalho, para a escavação foram utilizadas escavadoras munidas de balde, vem referido no CE que nestes casos, este deverá ser iniciado a cerca de 5 metros da crista do talude até se atingir a cota da

banqueta de modo a ser possível observar-se os materiais no corte entretanto construído. Em função deste poderá haver necessidade a alterações na geometria dos taludes. Em todo o caso, os taludes devem ser regulares e com a geometria prevista nos perfis transversais do projeto.

Na necessidade de se fazer variar a inclinação dos taludes, ela deve de ser feita ao longo de 50 metros no caso de vias com dupla faixa de rodagem. O que é o caso da autoestrada A2.

3.4. EXECUÇÃO DE ATERRO TÉCNICO

Este aterro é classificado como técnico por possuir uma Passagem Inferior de acesso à Praça de Portagem. O facto da Passagem Inferior atravessar o aterro aliado à sua grande altura, obriga a que os materiais na sua composição e as condições em que são aplicados sejam de carácter especial. O aterro que foi foco de acompanhamento foi o relativo ao ramo 2, um loop de saída da A2 e que ligará à A26.

À data em que o autor da dissertação iniciou o seu acompanhamento, o aterro estava já numa fase adiantada do seu enchimento, estava em curso a execução do último terço do corpo do aterro. Faltava portanto o seu coroamento pela PSA e respetivo leito do pavimento, a colocação dos espaldares e órgãos de drenagem.

Os aterros serão construídos com materiais procedentes das escavações previstas e com materiais resultantes de zonas de empréstimo, próximas ao traçado

O conjunto de tarefas mobilizaram as seguintes máquinas: bulldozer, cilindro vibrador, retroescavadora, 6 camiões de transporte do areão, cisterna de água e uma escavadora giratória no local de empréstimo (neste caso a pedreira mais próxima do local da obra).

A avaliação da qualidade do aterro foi feita através da leitura do grau de compactação e respetivo teor de humidade, após a passagem do cilindro em cada camada recorrendo ao gamadensímetro.

“No caso de solos coerentes (equivalente de areia inferior a 30 %), a compactação relativa de solos nos aterros, referida ao ensaio de compactação pesada (Proctor Modificado), deve ser, neste caso de pelo menos 90% no corpo do aterro e 95% na PSA.

Quando os solos coerentes se apresentarem muito húmidos ($w_{nat} > 1,4 w_{opn}$), reagindo à passagem do tráfego da obra com o designado “efeito de colchão”, os valores da compactação relativa acima referidos devem ser reportados ao ensaio Proctor Normal, quer se tratem de solos no seu estado natural ou tratados com cal, exigindo-se para a sua obtenção uma redução da energia de compactação. Neste tipo de materiais devem ser utilizados de preferência cilindros pés-de-carneiro.

No caso de solos incoerentes, (equivalente de areia superior a 30%), os valores de referência reportados ao ensaio Proctor Modificado devem ser aumentados para 95% no corpo do aterro, garantindo-se 100% na PSA.” (CE-EP Volume III, Cap.15).

3.4.1. LOCALIZAÇÃO

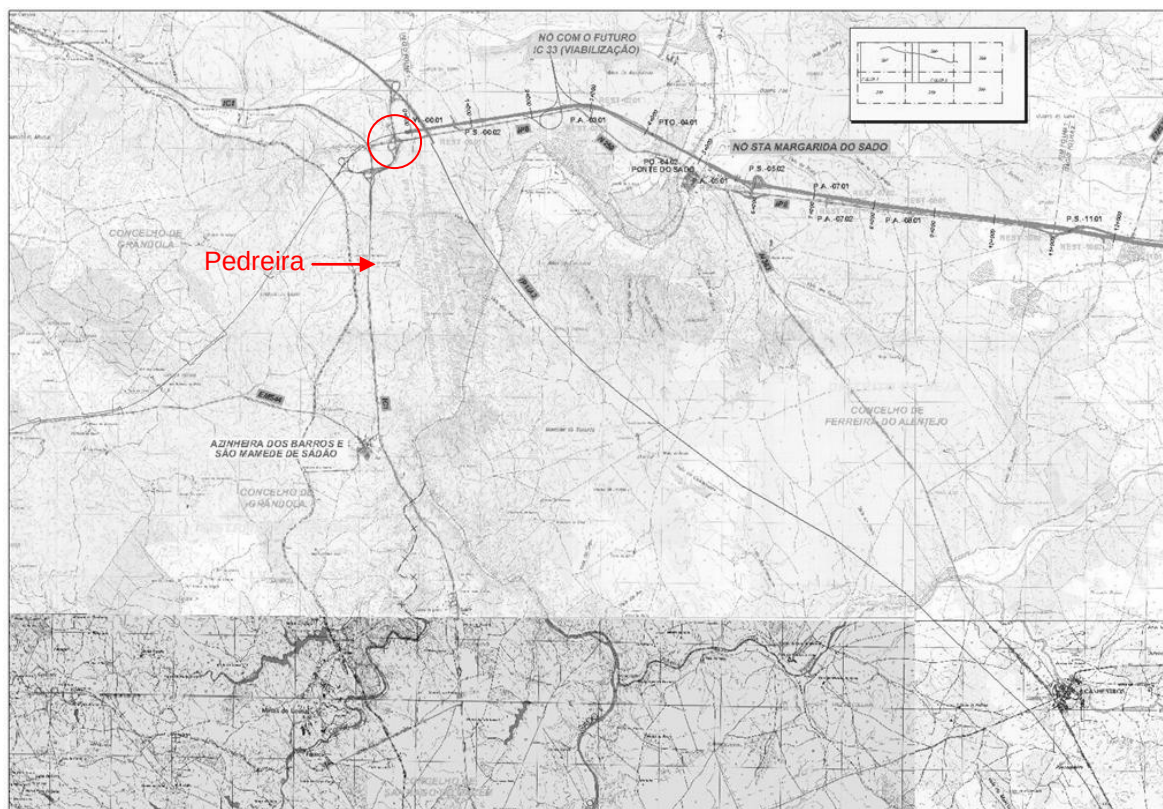


Fig.3.6 - Localização do aterro técnico e local de origem do material granular

3.4.2. NOTAS SOBRE O ATERRO TÉCNICO SEGUNDO O CADERNO DE ENCARGOS DAS EP

No capítulo 15.01.6 do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal fica definido um “aterro técnico” aqueles que, entre outros, são construídos junto a encontros de obras de arte ou a outro tipo de estruturas enterradas, e os aterros junto a muros de suporte, passagens agrícolas, etc.. [3]

Fica também definida a sua geometria, nomeadamente a forma da sua secção transversal e que depende da altura da estrutura (H). Neste caso $H > 2,5m$.

O CE define a secção transversal como sendo trapezoidal, que envolve a estrutura e cuja secção deve respeitar a seguinte geometria:

- Base maior: $H+10m$
- Base menor: $10m$

No que toca à sua execução, o CE refere em primeiro lugar que os trabalho só podem ser iniciados após aprovação prévia da Fiscalização. Estes aterros devem ser construídos cuidadosamente e deverão ser estudados em especial os problemas de drenagem que possam surgir. Só depois destes problemas estarem resolvidos se poderá executar o enchimento do aterro. A espessura das camadas não deve ser superior a 0,20m, exceptuando quando os materiais utilizados são tratados. Neste caso a espessura poderá ser de 0,30m.

As camadas devem ser compactadas até que o Grau de Compactação relativo ao ensaio Proctor Modificado seja de 100% e com o teor de humidade não deve variar 10% relativamente ao teor de

humidade ótimo. No caso das camadas serem executadas com solos tratados, o Grau de Compactação não deve ser inferior a 95%. Se durante a construção do aterro técnico houver excesso de humidade, não deve ser executada a compactação até que o teor de humidade seja próximo do teor de humidade ótimo. Quando o material de construção é um solo tratado, poder-se-à recorrer à utilização de cal viva para se reduzir o teor de humidade.

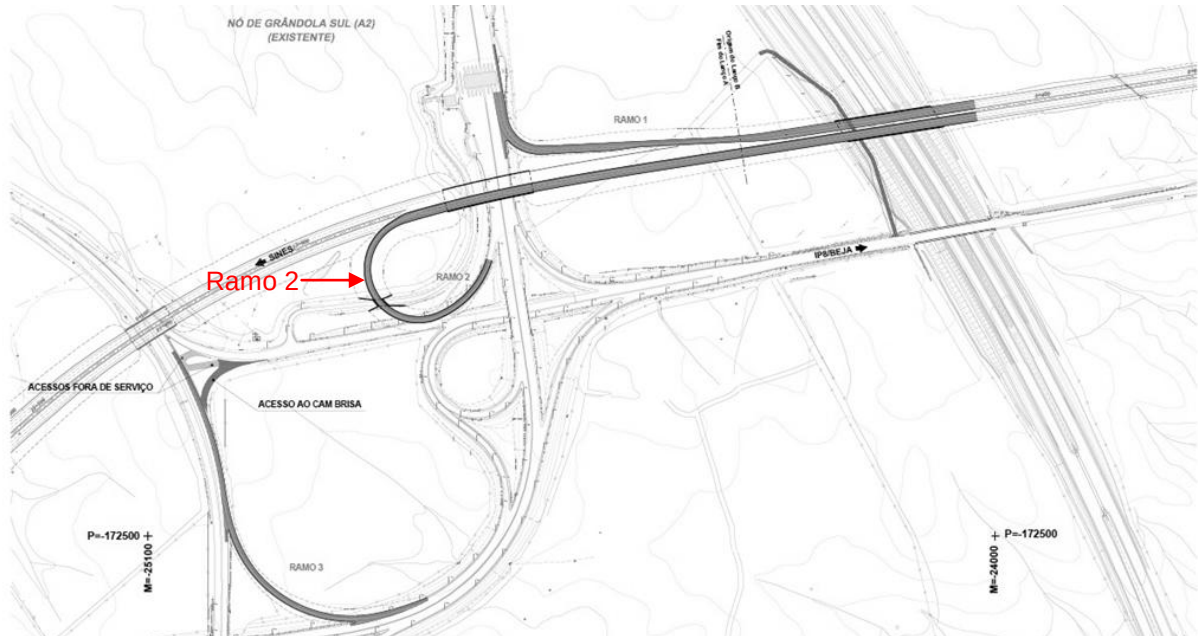


Fig.3.7 - Nó de Grândola Sul e localização do Ramo 2

3.4.3. NOTAS SOBRE AS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM ATERROS SEGUNDO O LCPC-SETRA

A evolução do conhecimento no campo da geotecnia, sobretudo no conhecimento sobre a Mecânica dos Solos, comportamento mecânico e hidráulico dos maciços terrosos, fez evoluir esta área da Engenharia no que respeita aos materiais a utilizar e às condições de aplicação dos solos provenientes das escavações em aterros.

O fascículo II do LCPC descreve as condições de utilização dos materiais, sejam eles solos, materiais rochosos ou subprodutos industriais, condições essas que devem ser respeitadas para que se possam se autorizados o emprego destes materiais em aterro dos materiais anteriormente descritos.

Cada classe ou sub-classe de material classificado apresenta-se um quadro com cinco colunas:

- Na primeira coluna identifica-se o a classe de material e o seu estado hídrico
- Na segunda coluna faz-se um conjunto de observações gerais sobre o material considerado
- A terceira coluna refere-se à condição meteorológica durante a construção do aterro
- Na quarta coluna figuram as condições de construção do aterro
- Na quinta coluna figura um conjunto de condições a efetuar durante a construção do aterro so a forma de um código numérico.

As condições de utilização são expressas em função de 7 condições:

Extracção – E

Acção sobre a granulometria – G

Acção sobre o teor de humidade – W

Tratamento – T

Espalhamento - R

Compactação – C

Altura de aterro – H

A título exemplificativo de uma consulta das tabelas de condições de utilização de materiais em aterro, um pó de pedra proveniente de uma pedreira (local A da fig. 3.2), classificada pelo LCPC e recorrendo à leitura da análise granulométrica como solo do tipo D1 (insensível à água) (Capítulo 4.3.2 e Anexo D), aplicado em qualquer condição meteorológica (desde chuva forte a condições de evaporação importante), tem para as suas condições de utilização a solução de código EGWTRCH = 0000020.

Se se consultar o quadro seguinte, conclui-se que neste solo (classe D1) para ser utilizado em aterro deve ser aplicada uma compactação média. O modo como se procede à classificação dos solos pela classificação LCPC-SETRA será explanado na página 49.

Quadro 3.1 – Condições de utilização de materiais da classe D em aterro [6]

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

D

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
D₁	Ces sols peuvent poser, surtout si leur granulométrie est uniforme, des problèmes de traficabilité Pour limiter ces problèmes un arrosage peut s'avérer efficace	++ + = -	toutes situations météorologiques C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0
D₂ D₃	Ces sols constituent les meilleurs matériaux de construction des remblais			

Quadro 3.2 – Medidas a tomar para a utilização de solos em aterro segundo o manual LCPC

Parâmetro	Técnicas de preparação dos materiais	Código
E	Nenhuma condição em particular a recomendar	0
Extração	Extracção em camadas de 0,1 a 0,3m	1
	Extracção frontal, para uma frente de altura > 1 a 2m	2
G	Nenhuma condição a recomendar	0
Ação sobre a granulometria	Eliminação dos elementos > 800 mm	1
	Eliminação dos elementos > 250 mm	2
	Fragmentação complementar após extracção	3
W	Nenhuma condição particular a recomendar	0
Ação sobre o teor de humidade	Redução do teor em água por arejamento	1
	Secagem por colocação em depósito provisório	2
	Rega para manter o estado	3
	Humidificação para mudar o estado	4
T	Nenhuma condição particular a recomendar	0
Tratamento	Tratamento com um reagente ou um aditivo adaptado	1
	Tratamento com cal simples	2
R	Nenhuma condição particular a recomendar	0
Espalhamento	Camadas finas, 20 a 30 cm	1
	Camadas médias, 30 a 50 cm	2
C	Compactação intensa	1
Compactação	Compactação média	2
	Compactação fraca	3
H	Nenhuma condição particular a recomendar	0
Altura do aterro	Aterro de altura baixa , < 5m	1
	Aterro de altura, < 10m	2

3.5. APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM LEITO DE PAVIMENTO E CAMADA DE BASE

3.5.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

A Camada de Leito de Pavimento (CLP), camada que coroa a Parte Superior do Aterro (PSA), é necessária quando os solos que compõem o corpo do aterro não oferecem as características mecânicas necessárias para fundação da estrutura do pavimento. Na sua execução, existe um objetivo a longo prazo e outro a curto prazo ou seja, além da preocupação com o tempo de vida útil da obra para a qual foi dimensionada a estrutura do pavimento (20 anos no caso dos flexíveis), a Camada de Leito de Pavimento é importante para garantir boas condições de tráfego e compactação durante a execução da obra. O conjunto PSA+CLP tem 1m de espessura aproximadamente.

Esta zona “especial” do aterro deverá ser constituído por materiais de qualidade superior às das zonas inferiores do aterro por estar mais próxima da superfície e portanto também mais próxima das cargas exercidas pelos veículos. O papel do Leito do Pavimento é nos pavimentos flexíveis, essencialmente o de ordem económica, já que vai permitir a redução das espessuras das camadas da estrutura do pavimento, ou seja as mais dispendiosas. Os materiais constituintes do Leito de Pavimento são sempre solos selecionados ou tratados ou ainda materiais granulares britados por serem estes cujas características melhor cumprem os objetivos acima descritos. As funções e características da Camada de Leito de Pavimento são próximas das da sub-base granular quando esta é equacionada em fase de projeto. No entanto, ainda que próximas, as características da sub-base devem ser de qualidade superior às da CLP de modo a proporcionar um módulo de deformabilidade crescente à medida que se “sobe” até à camada de desgaste.

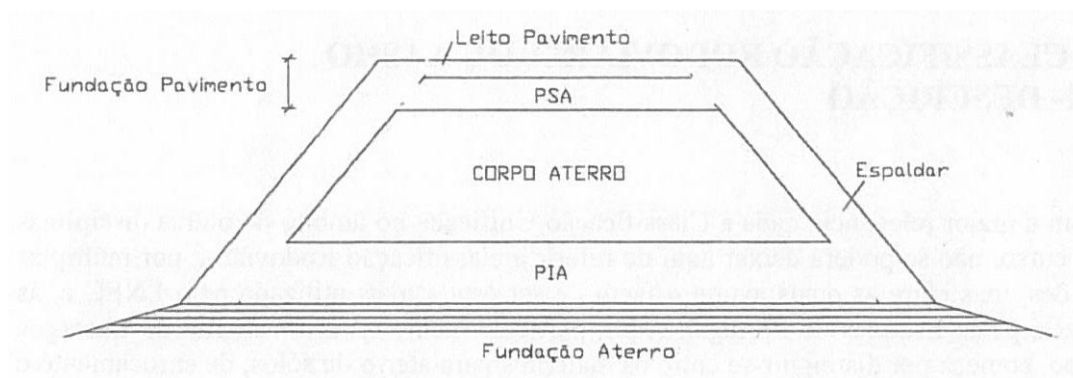


Fig. 3.8 - Zonamento de um aterro. [2]

A estabilização dos solos é o processo através do qual o solo é melhorado tornando-o mais estável. O método mais simples de o conseguir é através da estabilização mecânica ou seja selecionando/atuando na granulometria dos materiais (4.1.1). Materiais melhor graduados são também mais estáveis.

A par deste método, é possível melhorar as características de um material a ser utilizado em aterro através da mistura de um ligante sendo o mais usado o cimento Portland e a cal, sendo a cal o ligante mais indicado para solos argilosos. Em solos uniformes ou mal graduados (4.1.1) é normalmente mais onerosa a estabilização com cimento devido ao elevado índice de vazios.

A maior ou menor qualidade da mistura depende em larga escala do tipo e classe do cimento aplicado, do Grau de Compactação imediatamente atingido imediatamente a seguir à mistura, do teor de humidade que deverá estar o mais próximo do ótimo referente ensaio Proctor modificado (4.3.3) efetuado no estudo para solo-cimento (Anexo D).

3.5.2. LOCALIZAÇÃO

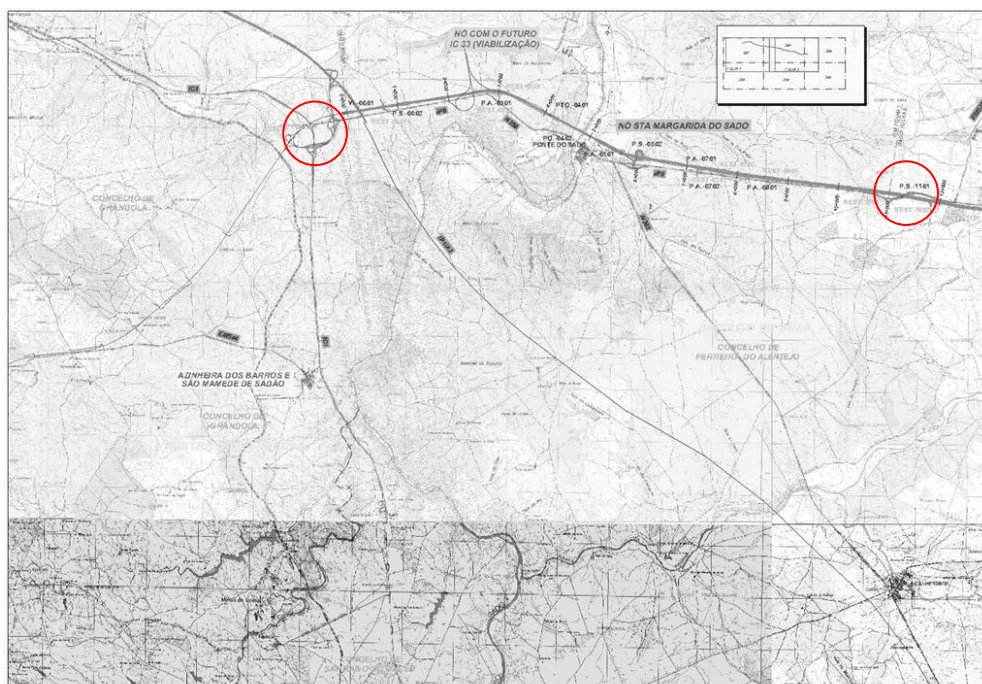


Fig.3.9 – Locais de tratamento de solos com cimento

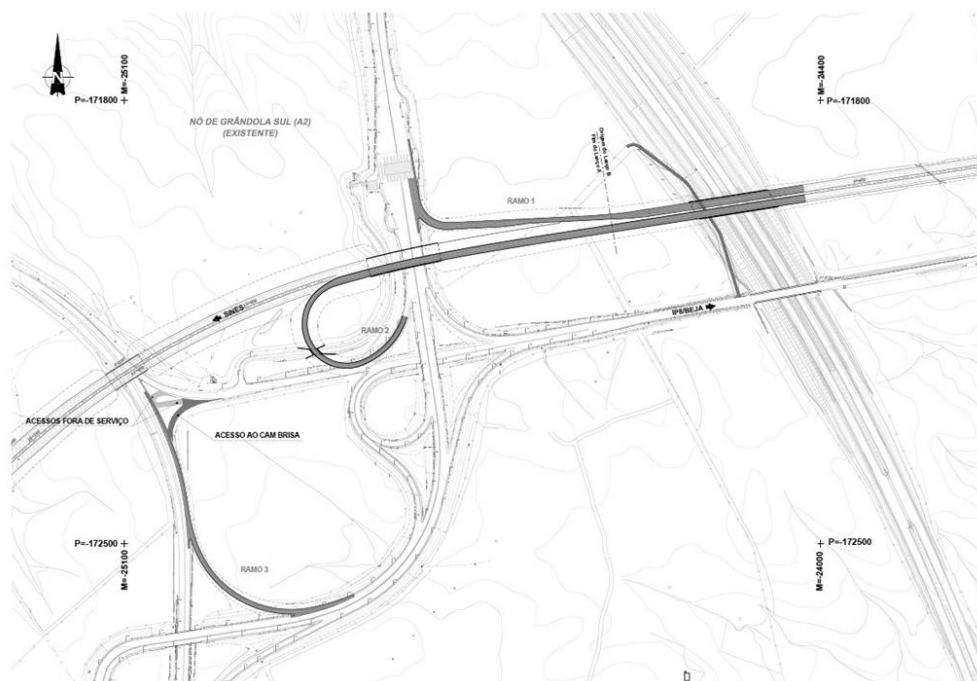


Fig.3.10 - Ramos do nó de Grândola Sul a serem tratados com cimento em LP

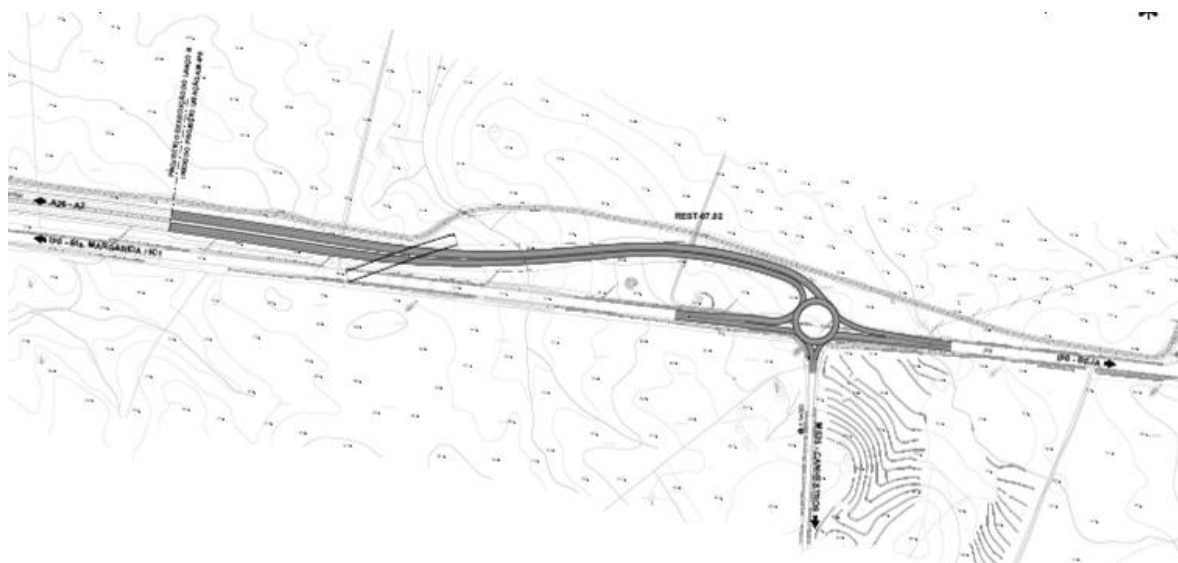


Fig.3.11 - Área de aplicação do solo-cimento nas proximidades do nó de ligação com o IP8

3.5.3. PROCESSO CONSTRUTIVO

No obra do Lanço A e B, os aterros foram construídos com materiais de proveniências diferentes: no caso dos aterros no nó de Grândola Sul com material britado e no caso da ligação com o IP8, foi autorizado a utilização de solo provenientes de escavação na linha. Foi projetada uma fundação do pavimento do tipo F4, que consiste na máxima categoria de fundação prevista pelo Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) e que unicamente da classe de tráfego.

Como os solos inserem-se no tipo S2 (Quadro 4.6), o Manual obriga à execução de uma camada de leito de pavimento através da estabilização dos solos através de uma mistura solo-cimento do tipo ST2 com 40cm de espessura mínima.

De acordo com mesmo manual, para uma plataforma do tipo F4 deve adotar-se um valor de cálculo do módulo de deformabilidade de 150MPa. No entanto, prevê-se que haja soluções de fundação que conduzam a valores de deformabilidade superiores ao valor de cálculo. Realizaram-se para efeitos de cálculo da estrutura de pavimento, duas hipóteses. A solução A em que a fundação terá um módulo de deformabilidade de 250 MPa e a solução B, cuja fundação terá um módulo de deformabilidade de 150MPa (Fig.3.10).

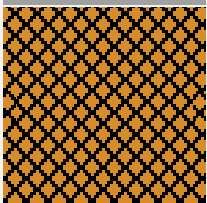
O trabalho de aplicação de solo-cimento e camada de base desenvolveu-se do seguinte modo:

- Deposição do cimento em pó à taxa de cimento fixado pelo estudo para solo-cimento (anexo D) e recorrendo a uma cisterna equipada com uma barra espalhadora e doseadora. A cisterna permite regular a percentagem de cimento depositado através da sua velocidade.
- Mistura do solo com cimento depositado anteriormente recorrendo a misturadora especial que tem acoplada uma cisterna de água.
- Controlo da percentagem de cimento que esta a ser usado através da colocação de uma caixa sob a cisterna que está a colocar o cimento.

▪ Nivelamento e compactação. Esta fase alterna uma primeira compactação ligeira recorrendo a um cilindro vibrador. Após esta compactação é feito o nivelamento da superfície de modo a obter-se uma camada de espessura regular e requerida. As niveladoras modernas são equipadas por um sistema GPS, isto permite que a lamina da niveladora arraste o material até às cotas do projecto que foram previamente inseridas pela equipada de topografia. Finalmente é aplicada uma nova compactação para se obter as características mecânicas fixadas no estudo para solo-cimento.

- Rega de emulsão betuminosa para impermeabilização da camada de leito do pavimento
- Colocação e espalhamento do agregado britado de granulometria extensa (ABGE).
- Nivelamento de acordo com as cotas de projeto e de seguida compactação
- Varrimento
- Rega de impregnação para colagem da camada de macadame betuminoso a colocar posteriormente.

▪

Betão Betuminoso (BB_d)	4 cm		E=2900 MPa; $\nu=0,35$
Macadame Betuminoso de ligação (MB_{lig})	8 cm		E=6000 MPa; $\nu=0,35$
Camada de -base (Agregado britado)	20 cm		E=400 MPa; $\nu=0,35$
Fundação do Pavimento			E=250 MPa; $\nu=0,40$

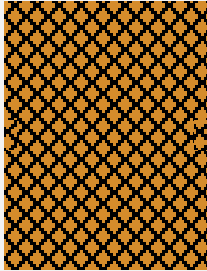
Betão Betuminoso (BB_d)	4 cm		E=2900 MPa; $\nu=0,35$
Macadame Betuminoso de ligação (MB_{lig})	5 cm		E=5900 MPa; $\nu=0,35$
Macadame Betuminoso de base (MB_r)	5 cm		E=6200 MPa; $\nu=0,35$
Camada de -base (Agregado britado)	20 cm		E=300 MPa; $\nu=0,35$
Fundação do Pavimento			E=150 MPa; $\nu=0,40$

Fig. 3.12 - Soluções A e B tidas como hipóteses de estruturas de pavimento em função do módulo de fundação

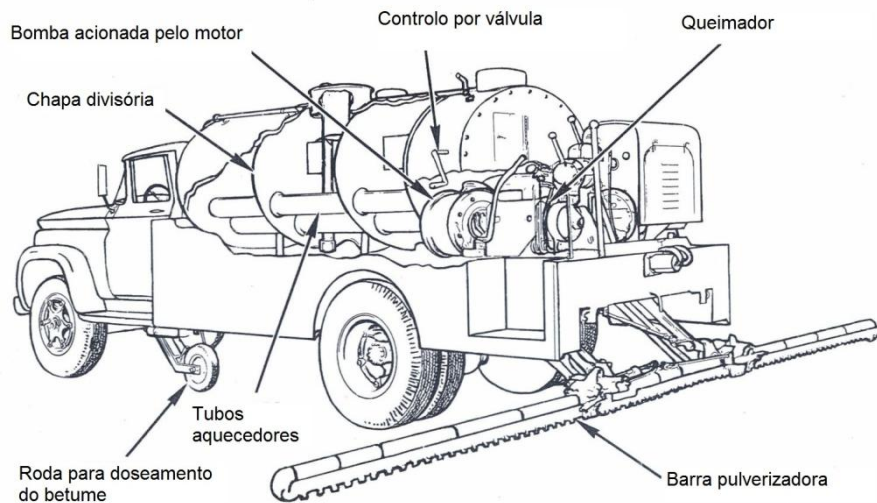


Fig.3.13 - Esquema do caminhão cisterna de aplicação da rega de colagem

3.5.4. NOTAS SOBRE AS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM LEITO DE PAVIMENTO SEGUNDO O LCPC-SETRA

Antes de avançarmos no estudo do modo como a camada de leito de pavimento é tratada pelo LCPC, será de maior utilidade fixarmos algumas definições e respectivas siglas provenientes da língua francesa:

- PST – Parte superior do aterro com aproximadamente 1m de espessura (Partie Supérieure des Terrassements),
- AR – Plataforma superior das terraplenagens ou também de suporte da camada do leito de pavimento (Arase Terrassement),
- PF – Plataforma de suporte do pavimento (Plate-forme support de chaussée).

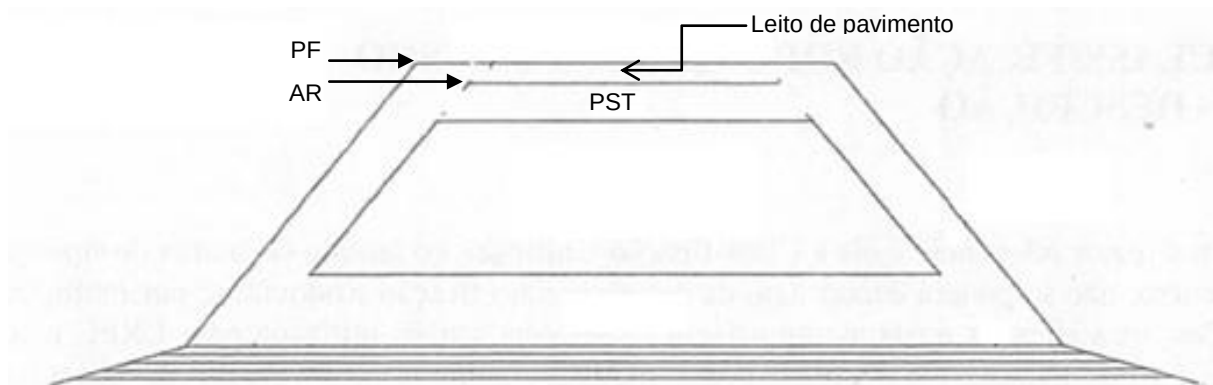


Fig.3.14 – Definição de termos usados no LCPC-SETRA

No que toca às funções da camada de leito de pavimento (e se houver necessidade para a sua existência), este manual refere dois objetivos: um a curto prazo (durante a execução das camadas de pavimento) e outro a longo prazo (em serviço).

De modo a dar cumprimento aos objetivos de curto prazo, a camada de leito de pavimento tem como funções as seguintes:

- Um nivelamento da plataforma suporte de pavimento (PF) que permita a realização das camadas de base dentro das tolerâncias de espessuras fixadas,
- Uma capacidade de suporte suficiente, tendo em conta sobretudo as eventualidades meteorológicas, para uma compactação correta das camadas de pavimento,
- Uma proteção do solos suporte no que toca às intempéries,
- Uma condição que permita a circulação de máquinas durante a colocação de materiais para a camada de base e de eventualmente outras necessidades

A longo prazo podemos enumerar as seguintes funções da camada de leito de pavimento:

- Uma homogeneização da capacidade de suporte de modo a ser possível partir para um dimensionamento da estrutura de pavimento, a fixação de um valor de cálculo para o módulo de Young da fundação,
- A manutenção no tempo de uma capacidade mínima de suporte independentemente do estado hídrico dos solos suporte,
- Um melhoramento da capacidade de suporte da plataforma (PF) de forma a otimizar os custos totais do conjunto leito de pavimento – estrutura de pavimento,
- Uma proteção térmica do aterro,
- Uma contribuição adicional para a drenagem superficial do pavimento.

No que toca aos critérios associados á construção do pavimento, numa primeira instância e para que o leito de pavimento possa ser executado de uma maneira satisfatória, é necessário que o aparecimento de rodeiras na plataforma superior das terraplenagens (AR) seja limitado. Esta necessidade leva a procurar obter-se um nível de capacidade mínima a curto prazo. A experiência mostra que o valor do módulo EV2 do ensaio de carga com placa na ordem dos 35MPa é normalmente o mínimo necessário para se poder executar um leito de pavimento em materiais tratados ao passo que um leito de pavimento em materiais granulares pode ser executada sobre um AR de entre 15 a 20 MPa.

Quanto aos materiais a serem usados em leito de pavimento, os critérios que devem ser tido em conta são:

- A insensibilidade à água,
- A dimensão máxima dos elementos,
- A resistência sob circulação das máquinas em estaleiro,
- A insensibilidade ao gelo, se for necessária.

O LCPC/SETRA limita a utilização de materiais, (classificados do modo explicado em (4.2.3.)) para construção da camada de leito de pavimento. Dado o seu carácter especial e função nem todos os materiais que são passíveis de ser utilizados em aterro podem vir a ser utilizados em leito de pavimento. Os materiais que podem vir a conformar um leito de pavimento o LCPC sugere um conjunto de medidas de tratamento a dar-lhes para que possam vir a ser aplicados. Os critérios que o regulamento procura satisfazer são a dimensão dos elementos mais grossos, insensibilidade à água e ao gelo, e a resistência à circulação do equipamento de obra.

Quadro 3.3 – Medidas a tomar para a utilização dos solos em leito de pavimento segundo o manual LCPC [6]

Parâmetro	Técnicas de preparação dos materiais	Código
G	Nenhuma condição a recomendar	0
Ação sobre a granulometria	Eliminação dos elementos > 800 mm	1
	Eliminação da fracção grossa, permitir mistura correcta solo	2
	Eliminação da fracção grossa, permitir regularização plataforma	3
	Eliminação da fracção 0/d sensível à água e da fracção grossa	4
	Fragmentação da fracção grossa	5
W	Nenhuma condição a recomendar	0
Acção sob o teor em humidade	Rega para manutenção do estado hídrico	1
	Humidificação para mudar de estado hídrico	2
T	Nenhuma condição a recomendar	0
Tratamento	Tratamento com um ligante hidráulico	1
	Tratamento com um ligante hidráulico, e eventualmente com cal	2
	Tratamento misto: cal com ligante hidráulico	3
	Tratamento com cal	4
	Tratamento com ligante hidráulico e eventualmente correcção granulométrica	5
	Tratamento com correcção granulométrica	6
S	Nenhuma condição a recomendar	0
Protecção Superficial	Revestimento de cura eventualmente com gravilha	1
	Revestimento de cura com gravilha eventualmente incrustado	2
	Camada final de Regularização	3

O processo de dimensionamento da camada de leito de pavimento é feita partindo dos módulos de deformabilidade que se pretendem para essa camada uma vez que é a plataforma (PF) que servirá de fundação do pavimento. Esta capacidade de suporte que se pretende a longo prazo depende da classe do material que se utilizou na sua execução, nas condições de utilização conforme a situação meteorológica e ainda da combinação dos pares PST/AR a curto e a longo prazo.

Foram fixados as seguintes classes de plataformas e respetivos valores de cálculo para o módulo de Young (MPa)

Quadro 3.4 – Valores de cálculo para o módulo de Young a usar como hipóteses na fundação de pavimento [6]

Módulo de deformabilidade (MPa)	20	50	120	200
Classe de plataforma do aterro	PF1	PF 2	PF3	PF4

A título de exemplo se pretendermos dimensionar a estrutura de pavimento com 250Mpa de módulo de deformação da solução A proposta para pavimento do lanço A e B (Fig. 3.12) necessitamos de uma PF4, se optarmos pela solução B com 150Mpa, basta-nos uma PF3.

No caso do material a usar para leito de pavimento, foi classificado como pertencendo à classe D_{11} . Observando o quadro seguinte retirado do fascículo 1 do LCPC, conclui-se que é possível conseguir

uma PF3 no caso de não haver chuva, e seguindo o código de aplicação GWTS=0152, com uma PST n.º3 e AR2 e adotando uma espessura de 35cm para camada de leito de pavimento.

Para conseguirmos uma sobreclassificação PF4, é necessário o tratamento do solo com ligante hidráulico.

Não havendo dados no estudo para solo-cimento (Anexo D) nem para o módulo de deformabilidade (E) nem da resistência à tração aos 90 dias, propõe-se fazer uma leitura inversa procurando que gama de valores seria necessário obter para (E,σt) de forma a que seja obtida uma PF4 com a mínima espessura possível (30cm). Através da consulta do quadro 3.5 conclui-se que são os pontos contidos da zona 3 da figura(3.15.).

Quadro 3.5 – Condições de utilização dos materiais da classe D em leito de pavimento [6]

D ₁₁ , D ₁₂ , D ₂₁ , D ₂₂															
Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée									
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4					
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2					
D ₁₁	Bien qu'insensibles à l'eau les sols de cette classe sont néanmoins peu "traficables" du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire. Ils sont constitués de grains résistants qui autorisent leur emploi en couche de forme après leur avoir fait subir une correction granulométrique ou un traitement avec un liant hydraulique.	++	pluie forte	Situation météorologique ne permettant pas une mise en œuvre correcte	NON	e = 0,8	e = 0,5	e = 0,4	e = 0,3	(3)					
		+	pluie faible	Traitement avec un correcteur granulométrique	0 0 6 0	ou (2)	ou (2)	ou (2)	ou (2)						
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : Traitement avec un correcteur granulométrique	0 0 6 0	e = 0,65	e = 0,4	e = 0,3	e = 0,2						
				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à un correcteur granulométrique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 5 2	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35		e = 0,35				
D ₁₂	Bien qu'insensibles à l'eau les sols de cette classe sont néanmoins peu "traficables" du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire. De plus ils sont constitués de grains friables qui sous l'action du trafic pourraient se transformer en éléments fins sensibles à l'eau. Pour ces raisons les sols doivent être traités avec un liant hydraulique pour être utilisables en couche de forme.	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON										
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique											
				T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à un correcteur granulométrique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 5 2							PF2	PF2	PF3	PF3
		D ₂₁	Ces sols sont utilisables en couche de forme soit dans leur état naturel car la résistance des granulats est suffisamment élevée soit traités avec un liant hydraulique en place ou en centrale.	++	pluie même forte	Utilisation en l'état	0 0 0 0	e = 0,75 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)			
+				Solution 1 : Utilisation en l'état	0 0 0 0	e = 0,6 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2						
= ou -	pas de pluie			Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné	0 1 1 1	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35					
				D ₂₂	Ces sols bien qu'insensibles à l'eau ne peuvent en général être utilisés en couche de forme dans leur état naturel en raison de la friabilité des granulats (risques de formation d'éléments fins sensibles à l'eau sous l'action du trafic). Il convient donc de les traiter en place ou en centrale avec un liant hydraulique.						+		pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON
= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné	0 1 1 1									PF2	PF2	PF3	PF3

Quadro 3.6 – Condições de sobreclassificação da capacidade das plataformas com camadas de leito de pavimento em materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos [6]

Classe de l'arase		AR1			AR2	
		Epaisseur de matériau de couche de forme				
Classe mécanique du matériau de couche de forme	3	*	30cm	40cm	25cm	30cm
	4	30cm	35cm	45cm**	30cm	35cm
	5	35cm	50cm **	55cm**	35cm	45cm**
Classe de plate-forme obtenue		PF2	PF3	PF4	PF3	PF4

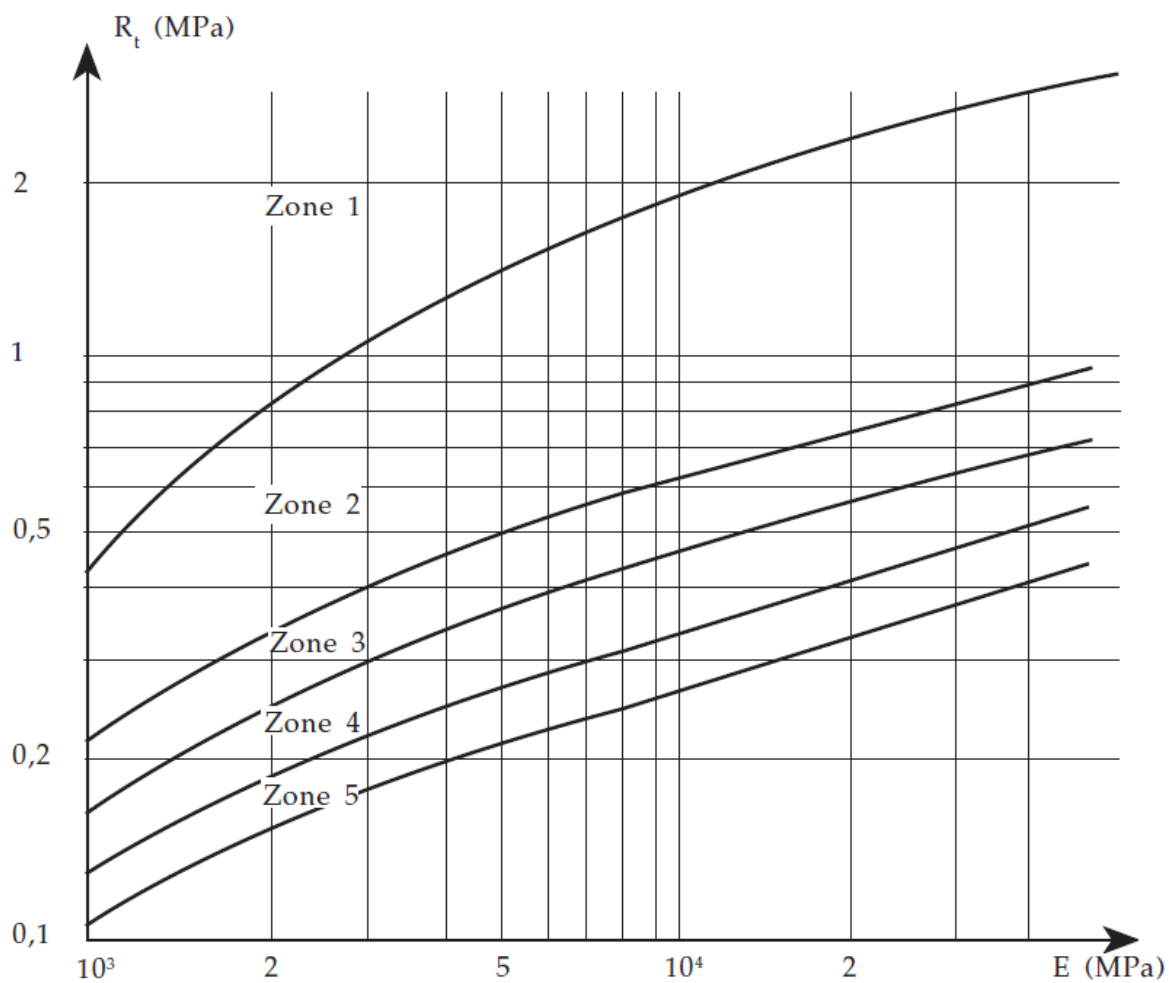


Fig.3.15 – Classificação dos materiais tratados segundo as suas características mecânicas [6]

4

ACOMPANHAMENTO LABORATORIAL E CONTROLO DE QUALIDADE

O acompanhamento laboratorial e o controlo de qualidade de uma obra rodoviária têm dois objetivos centrais. O primeiro, *a priori*, o da compreensão da natureza e características dos materiais que se utilizam para a execução da obra (solos, agregados, ligantes, misturas betuminosas). O segundo, *a posteriori*, avaliar se esses materiais são aplicados segundo um conjunto de normas e se estes apresentam o comportamento esperado em serviço.

O estudos dos solos fornece informação muito importante sobre o local e pode ser determinante em variados aspetos. Refira-se a escolha do traçado; a necessidade ou não de tratamento em fundações de aterro ou de pavimento; a fixação da inclinação dos taludes; na escolha dos locais de empréstimo e vazadouro e no próprio dimensionamento da estrutura do pavimento. Não menos importantes, a morfologia do terreno, o modo como o território é usado, respectivos constrangimentos ambientais e considerações de natureza política e económica, devem ser tidas em conta na avaliação da viabilidade da construção de uma estrada.

Num exame preliminar do terreno, ainda em fase de estudo prévio a caracterização dos solos esta integrado num estudo geológico-geotécnico. Trata-se de um exame preliminar do terreno e que parte essencialmente da informação existente do local onde se vai passar a estrada. Numa primeira etapa pode dispensar uma ida ao local podem incluir a recolha de cartas topográficas e geológicas, de fotografia aérea e terrestre e até observação direta de taludes existentes nas proximidades da zona onde se vai intervir.

Esta aproximação inicial por pode dar indicações para uma classificação dos solos mais rigorosa feita posteriormente e dos problemas de engenharia que poderão envolver. Com vista a essa classificação rigorosa são efetuados estudos de campo e laboratoriais. Os estudos de campo incluem as prospeções geofísicas e mecânicas, abertura de poços ou trados, recolha de amostras de solos ou rochas, desenho de perfis geológico-geotécnicos e posicionamento do nível freático. O estudos laboratoriais incluem a análise de amostras de solos ou rochas.

Este 4.º capítulo da dissertação está dividido em dois subcapítulos. O primeiro percorre os procedimentos mais importantes que possibilitam a classificação dos solos e apresenta de seguida os três tipos de classificação mais usuais: Unificada, Rodoviária e pelo LCPC-SETRA. Este subcapítulo é acompanhado por um exemplo ilustrativo desde procedimento descrevendo os processos necessário para a classificação dos solos segundo a sua natureza – granulometria e limites de consistência.

Faz-se também uma leitura das linhas orientadoras para a classificação desses materiais e como estão enquadradas as normas portuguesas.

Num segundo momento faz-se uma leitura do Caderno de Encargos Tipo das Estradas de Portugal e de como é, segundo ele, feito o controlo de qualidade no que toca à fase em curso da obra em causa, nomeadamente as terraplenagens. Por fim, procura-se fazer de aquisição de informação relativa aos solos e num segundo momento de como deve ser processado o Controlo de Qualidade..

No final de cada um destes capítulos é feito uma explicação dos ensaios de acompanhamento da obra, são aqueles que se mostram indicados à situação em que a obra se encontra. Este capítulo pretende ser uma síntese dos procedimentos realizados durante a execução do lanço A+B e não de estudo dos ensaios possíveis em obras desta natureza.

Assim sendo, e neste caso, o conjunto de operações sujeitas ao acompanhamento laboratorial e controlo de qualidade levadas a cabo durante o período de dissertação em ambiente empresarial (transporte, espalhamento e compactação de solos em aterro e o tratamento de solos com cimento) requereram os seguintes ensaios:

- Ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas na obra para determinação das características dos solos e respetiva classificação, ensaio Proctor e CBR e mais especificamente no âmbito da aplicação de solo cimento, ensaios de resistência.
- Ensaios de controlo de qualidade de material produzido em central e de avaliação do grau de compactação de camadas de aterro;



Fig.4.1 – Fotografia de interior de um laboratório da Tecnovia

Hoje em dia, os ensaios laboratoriais são uma prática corrente, que a par das exigências previstas nos cadernos de encargos, permitem garantir que os materiais empregues sejam colocados nas zonas dos aterros apropriados ou sejam rejeitados, e conduzidos para vazadouros.

No que toca às especificações que os descrevem, pode dizer-se que eles são comuns em todos os países. Contudo, é de maior importância que os procedimentos dentro de cada ensaio se executem com o maior rigor, independente da especificação a ser seguida (LNEC-EN, NP, BS, NF, AASHO, ASTM...).

As amostras de solo que se retiram do local, são apenas representativas. As quantidades e o número de ensaios a levar a cabo vêm fixados no Caderno de Encargos das EP no capítulo 14.00 dedicado ao

Controlo de Qualidade. É no entanto importante termos presente que as quantidades das amostras determinadas no CE e que estão a ser analisadas representam grandes quantidade de material e por isso, os resultados possuem algum grau de incerteza. Por exemplo, segundo o CE das EP, dever-se-à proceder a um ensaio CBR por cada 10 000m³ de material executado em leito de pavimento (pág.8/26). Ou seja, os 19,38dm³ dos 6 provetes do ensaio CBR pretendem representar 10 000m³ do mesmo material: uma fração de 1/516 002 do seu volume.

O tamanho e o tipo de amostras necessárias dependem do desígnio de cada teste. No entanto , é comum reduzirem-se as amostras retiradas “in situ” para amostras com menor quantidade de material de modo a serem estudadas com os instrumentos de um laboratório. Essa redução deverá ser sempre feita através de esquartelamento de maneira a ser mantida a distribuição ponderal de pesos das partículas. [10]

As disposições normativas relativas ao Controlo de Qualidade estão fixadas no Volume II do Caderno de Encargos tipo das Estradas de Portugal. Nele fica expresso que esse controlo de qualidade dos trabalho de empreitadas é da responsabilidade da empresa adjudicatária. Esta mesma empresa deve apresentar um plano de garantia e controlo de qualidade e que deve incluir o tipo e frequência de ensaios a efetua. Fica expresso ainda que a entidade Estradas de Portugal na qualidade de “dono de obra” ou quem a represente com competência de Fiscalização, disporá de meios humanos e materiais para controlo por amostragem dos ensaios efetuados. Este controlo por parte da EP “não isenta o Adjudicatário de responsabilidade de deficiências e anomalias de construção que lhe sejam imputáveis”.Relativamente aos materiais fica definido que deverão a obedecer a:

- Sendo nacionais, às normas portuguesas, documentos de homologação de laboratórios oficiais, regulamentos em vigor e especificações do Caderno de Encargos;
- Sendo estrangeiros, às normas e regulamentos em vigor no país de origem, desde que não existam normas nacionais aplicáveis

Relativamente ao equipamento laboratorial, é referido no Caderno de Encargos que o Adjudicatário deve:

- Previamente à instalação, submeter à aprovação por parte da Fiscalização de um projeto esquemático do laboratório, acompanhado de uma relação dos meios humanos e de equipamento afetos em exclusivo à obra.
- Assegurar a disponibilidade em obra do equipamento laboratorial e do pessoal devidamente habilitado necessários para se efetuar o “controlo de qualidade”, sendo que este equipamento poderá ser utilizado pela Fiscalização sempre que esta o desejar.

Apresenta-se seguidamente os quadros dos ensaios laboratoriais mais importantes que devem ser efetuados pelo executante da obra.

Quadro 4.1 – Documentos normativos aplicáveis na execução de aterros segundo o CE das EP

CÓDIGO DO ENSAIO	Designação do ensaio	Norma ou especificação
TA	Teor em água de solos e agregados	NP-84
TMO	Teor em matéria orgânica	LNEC E 201
CP a)	Compactação pesada	LNEC E 197
BS	Baridade "in situ": solos/ agregados	LNEC E 204
LL	Limite de liquidez	NP 143
LP	Limite de plasticidade	NP 143
GR	Granulometria de solos e agregados	E 196, E 233
EA	Equivalente de areia	LNEC E 199
ILA	Índices de lamelação e alongamento	BS 812
PEPS	Densidade das partículas	NP 83
PEAA	Massa volúmica e absorção de água de inertes	NP 954; NP 581
CBR	Ensaio CBR	LNEC E 198
CBRim	Ensaio CBR imediato (CBR sem embebição e sem sobrecarga)	NF P94-078
Azmet	Determinação do valor de azul de metileno	Afnor 18-592
Ag200	Agregados. Determinação da quantidade de material que passa no peneiro nº 200 ASTM	LNEC E 235
ECP	Ensaio de carga com placa	Procedimento LCPC
CF	Coeficiente de forma	AFNOR
Pmb	Percentagem de material britado	NLT 58
ELA	Ensaio de desgaste na máquina de "Los Angeles"	LNEC E-237
EPA	Ensaio de polimento acelerado do agregado (*)	Procedimento LNEC
FR	Ensaio de fragmentabilidade	NF P94-066
DR	Ensaio de degradabilidade	NF P94-067
IV	Determinação do índice de vazios	Macro ensaio - Procedimento LNEC

O controlo de qualidade é a principal finalidade da existência de uma entidade fiscalizadora no local de execução de uma obra. Para haver essa garantia é necessário um controlo apertado sobre os materiais e sobre os trabalhos em execução pelo empreiteiro que pode passar pela verificação da qualidade dos materiais antes de aplicados, assim como o produto final (desvios no traçado geométrico, cotas de projeto, espessuras das camadas, graus de compactação, inclinação dos taludes por ex.) Conflitos podem surgir no local quando o empreiteiro deseja avançar com as terraplenagens o mais rapidamente sem que tenha sido efetuado o controlo de qualidade dos trabalhos antecedentes. Pode haver casos em que o controlo de qualidade é feito também pela empresa executante e com a supervisão de uma empresa consultora. Este não é no entanto o modo mais correto de se proceder por apresentar um risco maior de incumprimento do Caderno de Encargos no que toca ao controlo de qualidade.

4.1. CARATERIZAÇÃO DOS SOLOS

4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A composição de um solo pode passar por uma combinação ponderal de partículas de dimensões variáveis ou de dimensão uniforme. A figura que se segue foi retirada da Sebenta apoio à Unidade Curricular de Vias de Comunicação II da FEUP e apresenta uma organização das partículas dos solos pelas suas dimensões:

Quadro 4.2 - Organização das partículas dos solos pelas suas dimensões

Argilas			Silte			Areia			Seixo			Calhau	Pedra
Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	Fino	Médio	Grosso		
2μ	6 μ	20 μ	60 μ	0,2mm	0,6mm	2mm	6mm	20mm	60mm	150mm			

A composição granulométrica de um determinado material granular é feita recorrendo à peneiração e fica definida pelas percentagens de peso das partículas retido num determinado peneiro de abertura estandardizado.

O conjunto de peneiros utilizado na análise granulométrica denomina-se fuso e este pode seguir a norma europeia EN da série NP1379 em milímetros ou a norte-americana ASTM em polegadas e suas frações. Por exemplo, o peneiro n.º200 ou mais simplesmente #200 na norma ASTM tem uma abertura de 0,075mm ou 75μm. O objetivo do estudo da composição granulométrica de um determinado solo é a sua classificação, realiza-se nos laboratórios das empresas adjudicatárias de obras rodoviárias e tem como fim a avaliação da possibilidade de utilização de solos frutos de escavações para aterro. Uma amostra representativa do solo depois de ser aquecido numa mufla a 180°C para eliminação do teor de humidade, é determinado quer o seu peso total como os pesos parciais da amostra retidos em cada um dos peneiros do fuso que se pretende estudar. Todos os instrumentos utilizados neste ensaio -mufla, balança e peneiros- devem ser calibrados periodicamente. Muito embora as normas atuais relativas aos peneiros sejam em já milímetros, os Caderno de Encargos das Estradas de Portugal utilizam ainda os peneiros ASTM.

Os resultados são apresentados por uma tabela onde se incluem as dimensões dos peneiros e o correspondente material retido em cada um deles. Como exemplo é apresentado de seguida o resultado da análise granulométrica de uma amostra de solo utilizado como material usado na mistura de solo-cimento para leito de pavimento nas proximidades da interseção do lanço A+B com o IP8 (Anexo D).

Quadro 4.3 – Tabela de percentagem de material retido e acumulada passada em cada peneiro ASTM

Peneiro ASTM	Malha (mm)	Peso retido	% Retida	% Acumulada passada
3"	75,00		0,0	100,0
2"	50,00		0,0	100,0
1" ½	37,50		0,0	100,0
1"	25,00		0,0	100,0
3/4"	19,00		0,0	100,0
½"	12,50	(+/- 0,1g)	0,0	100,0
3/8"	9,50		0,0	100,0
N.º4	4,75		0,0	100,0
N.º10	2,00	39,5	4,8	95,2
N.º20	0,85	75,6	9,2	85,9
N.º40	0,425	152,6	18,6	67,3
N.º80	0,18	415,5	50,7	16,6
N.º200	0,074	39,7	4,8	11,7
Fundo	<0,074	0,4	≈0,0	
Total		819,1	100	

Em alternativa, e recorrendo à percentagem acumulada de material passado por cada peneiro pode ser construído um gráfico semelhante ao apresentado na figura 4.2. e que se designa por curva granulométrica.

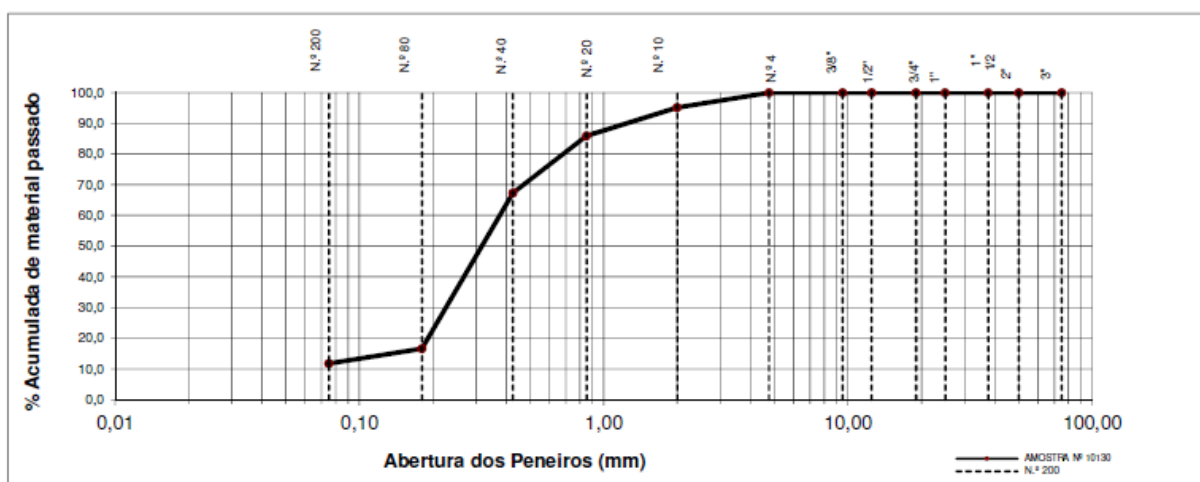


Figura 4.2 – Curva granulométrica da mesma amostra de solo

O estudo de uma amostra representativa de um solo ao ser dividida em frações de dimensões limites balizadas pela abertura dos peneiros normalizados consecutivos é de grande importância já que a dimensão das partículas determina em grande parte o comportamento desse solo.

Usando o exemplo da curva granulométrica apresentada temos que a fração da amostra cujas dimensões estão entre 0,425mm (peneiro n.º40) e 0,180mm (peneiro n.º80) e que traduz a percentagem de material passado no peneiro n.º40 mas retidos no peneiro n.º80 é aproximadamente igual a:

$$68\% - 18\% = 50\%$$

Já a fração da amostra que fica retida no peneiro cuja abertura é 0,074mm (peneiro n.º200), da fração que passa no peneiro n.º80, é aproximadamente igual a:

$$17\% - 12\% = 5\%$$

Caso não houvesse nenhuma percentagem de solo retida num determinado peneiro, isso traduzir-se-ia no aparecimento de um patamar horizontal a partir da linha vertical referente a esse peneiro até à linha referente ao peneiro onde surgisse alguma percentagem de solo retido.

É também importante observarmos a curva granulométrica no sentido inverso. É observável, por exemplo, que 60% dessa amostra representativa do solo tem dimensões inferiores a 0,3mm.

As grandezas mais relevantes para a classificação dos solos granulares em engenharia rodoviária e que se podem retirar da observação da curva granulométrica são

O diâmetro efetivo, designado por D_{10} significa a dimensão em que 10% das partículas são inferiores a esse D_{10} . No caso da curva granulométrica relativa ao solo estudado, o diâmetro efetivo será sensivelmente 0,075mm.

D_{60} é, portanto, a dimensão em que 60% das partículas são inferiores a D_{60} . Por outras palavras, o diâmetro em que a percentagem de passados sejam 60%.

No caso da curva granulométrica relativa ao solo utilizado como exemplo, D_{10} será sensivelmente 0,1mm.

Da curva granulométrica são retiradas outras grandezas designadas por coeficiente de uniformidade C_u e por coeficiente de curvatura C_c .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1.)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (4.2.)$$

Se pretendermos calcular o coeficiente de uniformidade e de curvatura do solo em estudo obtemos:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,38}{0,075} = 5,1$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{0,23^2}{0,38 \times 0,075} = 1,9$$

Quanto menor for a inclinação da curva granulométrica menor será o seu coeficiente de uniformidade do solo, e portanto melhor graduado, e quanto menos encurvada for menor será , obviamente, o seu coeficiente de curvatura.

Um solo diz-se:

- uniforme se $Cu < 5$
- medianamente uniforme, se $5 < Cu < 20$
- não uniforme, se $Cu > 20$

Se $1 < Cc < 3$ isto indica que o solo é bem graduado.

A importância da forma da curva granulométrica para uma obra rodoviária reside no facto de ser possível através dela, avaliar do tipo e energia de compactação a aplicar pois é sabido que solos bem graduados se compactam mais facilmente do que os solos uniformes. Este comportamento explica-se pelos índices de vazios ficarem gradualmente reduzidos por partículas de dimensões intermédias no caso de serem solos bem graduados.

4.1.2. LIMITES DE ATTERBERG E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência exprimem os teores em água fronteira e que separam de um lado a quantidade de água a partir da qual a parte fina do solo se comporta como um líquido e por outro lado a quantidade de água a partir da qual a parte fina do solo se comporta com sendo semissólido.

No limite superior temos o w_L a que se chama limite de liquidez, no limite inferior temos o limite de plasticidade w_p . O índice de plasticidade de um solo I_p calcula-se através da diferença dos dois limites de Atterberg anteriormente referidos. Estes dois limites são expressos em percentagem assim como o teor de água natural de uma amostra de solo.

$$I_p = w_L - w_p \quad (4.3.)$$

O método para a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade são relativamente simples mas mesmo assim indispensáveis em para a identificação de solos com apreciável quantidade de finos.

O Índice de Consistência é dado pela expressão seguinte e dá-nos uma ideia do estado de consistência do solo. Ou seja, se o solo já ultrapassou o seu limite de liquidez $I_c > 1$, se se encontra em estado plástico $0 < I_c < 1$, ou ainda em estado sólido, ou seja $I_c < 0$.

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p} \quad (4.4.)$$

4.1.3. Atividade das argilas

As partículas de argila são de forma lamelar e são envolvidas por uma quantidade maior ou menor de água adsorvida em função da sua atividade. Esta capacidade da parte fina de um solo ser mais ou menos sensível ao teor em água é de importância maior no equacionamento da reutilização de solos em aterro e pode ser testada através do ensaio de azul de metileno.(4.3.8.)

4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

O Estudo Geológico e Geotécnico, peça importantíssima nos projetos Rodoviários, além do reconhecimento geológico de superfície, engloba ainda a campanha de prospeção geotécnica que conjuga ensaios *in situ* e em laboratório. Por exemplo:

- perfis de refração sísmica;
- sondagens mecânicas, com furação à rotação e execução de ensaios SPT, geralmente de 1,5 m em 1,5 m de profundidade, em terrenos com características adequadas à sua realização;
- colheita de amostras intactas nalgumas das sondagens mecânicas;
- ensaios com o penetómetro dinâmico ligeiro;
- poços de prospeção, com colheita de amostras remexidas de solos;
- ensaios de laboratório sobre amostras intactas colhidas nas sondagens mecânicas;
- ensaios de laboratório sobre amostras remexidas recolhidas nos poços;
- ensaios de laboratório sobre amostras de rocha granítica e xisto-grauvácóide, recolhida na furação à rotação.

No que respeita aos aspetos geológicos e geomorfológicos gerais, recorre-se, geralmente, ao apoio da informação contida nas Cartas Geológicas de Portugal à escala 1/50 000.

A importância do Estudo Geológico Geotécnico advém de que é com base em nos elementos recolhidos, ser possível descrever as características das formações presentes na zona de implantação

do traçado rodoviário (nomeadamente no que diz respeito à sua estrutura, litologia e características hidrogeológicas e geotécnicas), e, com base nas referidas características, analisar as condições de execução das terraplenagens. Os materiais a utilizar nos aterros, provenientes da escavação realizada na obra ou provenientes de empréstimos, devem responder às exigências de estabilidade quase imediatas dos aterros, condicionando-se a escolha dos solos a utilizar, às características geotécnicas que garantam a resistência mecânica após a colocação em aterro.

A avaliação dos ensaios laboratoriais permite, ainda, estimar as condições ideais de aplicação e o respetivo acompanhamento ao longo da obra. Partindo do estudo das características dos solos e recorrendo a ensaios de solos normalizados, podemos encontrar em diversas publicações técnicas, distintas classificações, mas de alguma forma convergentes, já que todas elas têm o objetivo comum de caracterizar a adequabilidade dos solos à incorporação nas diferentes camadas de aterro.

O desígnio dos sistemas de classificação geotécnica dos solos e materiais rochosos é o de funcionar como suporte na aplicação desses mesmo materiais em obras de construção civil e mais concretamente às rodoviárias.

A Classificação Unificada sendo fruto dessa procura de universalidade mostrou-se, no entanto, demasiado ambiciosa dada a extrema complexidade do comportamento dos solos. Certas propriedades que se mostram significativas ou favoráveis a determinada operação numa obra, são menos importantes ou mesmo desfavoráveis noutras de outro tipo.[8] Por exemplo, uma terra vegetal, fruto de trabalhos de decapagem deve ser usada no cobrimento dos espaldares de aterros. Esta mesma terra é absolutamente desaconselhada para fundação de um aterro.

A experiência em obras rodoviárias levou à elaboração de sistemas de classificação direcionados para a realização de obras rodoviárias e que em seguida se descrevem: a Classificação para fins Rodoviários e a classificação francesa LCPC/SETRA.

Antes de se avançar para a classificação dos solos, é de máxima conveniência a definição de “solo”. Segundo o LCPC os solos são “materiais naturais, constituídos por grãos passíveis de serem separados isoladamente por simples trituração ou eventualmente sob a ação de uma corrente de água. Os solos são de natureza e origem geológica diversa: aluvionar, sedimentar, depósito glacial, solo residual...”

Em alternativa, apresenta-se um quadro presente no Caderno de Encargos Tipo das EP em que distingue solo dos outros tipos de materiais passíveis de serem usados em aterro através da sua granulometria.[2]

Quadro 4.4. – Características granulométricas dos materiais em aterro

Tipo de Material	Características Granulométricas – peneiros ASTM	Valor limite (%)
Solo	Material retido no peneiro de 19 mm (3/4")	≤ 30
Enrocamento	Material retido no peneiro de 19 mm (3/4")	>30
	Material passado no peneiro de 25 mm (1")	<30
	Material passado no peneiro de 0,074 mm (nº200)	<12
Solo-enrocamento	Material retido no peneiro de 19 mm (3/4")	30 a 70
	Material passado no peneiro 0,074 mm (nº200)	12 a 40

4.2.1. Classificação Unificada

No processo de identificação dos solos através da granulometria segundo a Classificação Unificada é, numa primeira instância, a percentagem de solo retido no peneiro n.º200, mais ou menos de 50% que vai determinar se o solo é considerado grosso ou fino respetivamente.

Quando essa percentagem é inferior a 50%, significa que mais de metade do peso da amostra do solo é constituída por argilas e siltes e, portanto, será o teor em água o fator que determina o seu comportamento mecânico.

Tanto a composição granulométrica como os limites de Atterberg constituem as características de identificação dos solos granulares e argilosos respetivamente e determinam as suas propriedades básicas. Devem por isso ser determinados antes de todos os outros. O objetivo do estudo de composição granulométrica e dos limites de Atterberg é identificar o solo através do Quadro da Classificação Unificada ou ASTM ou através da Classificação para fins Rodoviários ou AASHO. Apesar da Classificação Unificada ser a de uso mais generalizado, o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal refere a Classificação para fins Rodoviários nomeadamente no capítulo 14 dedicado à terraplenagem. Esta classificação será descrita no final do subcapítulo 4.1.

Numa primeira abordagem, os materiais utilizados em aterro são classificados em 3 grandes grupos:

- Solo se a percentagem de material retido no # 3/4'' (19mm) for inferior a 30%
- Enrocamento se a percentagem de material retido no # 3/4'' (19mm) for superior a 30%
Se a percentagem de material passado no #1'' (25mm) for inferior a 30%
Se a percentagem de material passado no #200 (0,074mm) for inferior a 12%
- Solo-enrocamento se a percentagem de material retido no # 3/4'' (19mm) estiver entre 30% e 70%
Se a percentagem de material passado #200 (0,074mm) ficar entre 12% a 40%

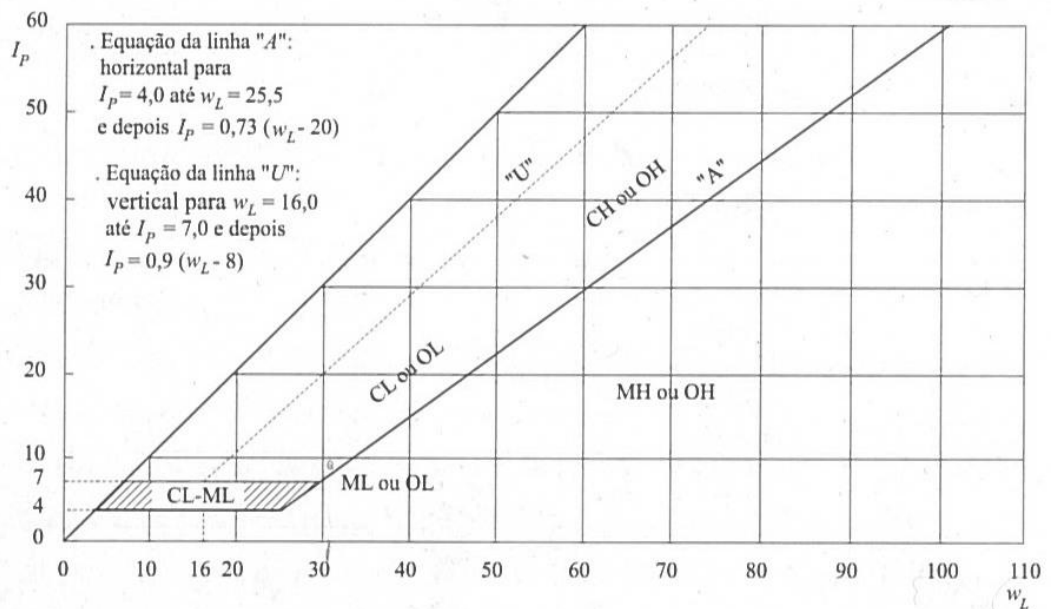
Quadro 4.5 – Classificação Unificada dos solos (ASTM D2487-85) [1]

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

Nota do autor – No contexto desta norma a separação entre areia e cascalho é referida ao peneiro n.º 4 (4,75 mm).

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

CARTA DE PLASTICIDADE DE CASAGRANDE



NOTA: Os resultados que conduzam a pontos acima da linha "U" são provavelmente irrealistas pelo que os correspondentes ensaios deverão ser repetidos cuidadosamente.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal utiliza a Classificação Unificada fazendo corresponder a cada um dos grupos de identificação um classe de solo de capacidade crescente.

Quadro 4.6 – Quadro de classificação utilizada no Caderno de Encargos das EP

Classe	CBR (%)	Tipo de solo	Descrição	Reutilização		
				PIA	Corpo	PSA
S 0	< 3	OL	siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade (1)	N	N	N
		OH	argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltos orgânicos. (2)	N	P	N
		CH	argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas. (3)	N	P	N
		MH	siltos inorgânicos; areias finas micáceas; siltos 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 selxo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras.	S	S	P
		ML	siltos inorgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltos 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	areia siltosa;	S	S	S
		d	areia siltosa.	P	S	N
		SM u				
S 4	≥ 20 a < 40	SP	areias mal graduadas; areias mal graduadas com cascalho.	S	S	S
		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
S 5	≥ 40	GP	cascalho mal graduado; cascalho mal graduado com areia. (7)	S	S	S
		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

Veja-se como se processa a classificação do solo dado como exemplo unicamente através da sua curva granulométrica:

- Possui mais de 50% de retido no #200, logo é um solo grosso
- Possui mais de 50% da fração grossa passada no #4, logo é uma areia
- Possui cerca de 10% de finos logo é uma Areia Siltosa

O exemplo apresentado diz-nos também que apesar de ter um coeficiente de curvatura dentro dos limites para um solo bem graduado, o coeficiente de uniformidade está próximo de um solo uniforme. Este dado impõe-se e permite-nos classificar o solo de mal graduado.

Estamos portanto perante uma Areia Siltosa mal graduada do grupo SC. De acordo com o CE das Estradas de Portugal a classificação de um solo do grupo SC depende dos resultados do ensaio CBR podendo ser da classe S2 ou S3.

4.2.2. Classificação para fins Rodoviários ou AASHO

Em primeira análise, a Classificação Rodoviária faz uma primeira separação entre os solos do tipo granular dos solos do tipo fino. Esta separação é feita em função da percentagem de finos passados no peneiro n.º200. São granulares se a percentagem de passados for inferior a 35% e sendo assim podem tomar a classificação A1 a A3 e são finos se a percentagem de passados for superior a 35% e neste caso podem tomar as classificações de A4 a A7.

No caso de serem granulares, a classificação faz-se recorrendo à granulometria e do seguinte modo:

- Se a percentagem de passados no #10 < 50%, se a percentagem de passados no #40 < 30% e a percentagem de passados no #200 < 15%, os solos são classificados como A1 – a
- Se a percentagem de passados no #40 < 50% e a percentagem de passados no #200 < 25%, os solos são de tipo idêntico ao anterior mas com maior percentagem de finos. Neste caso são classificados como A1 – b
- Se a percentagem de passados no #200 > 25% e #200 < 35% os solos são classificados como A2 com uma extensão -K. Ainda que estes solos sejam ainda do tipo granular, possuem já um peso relativamente grande de elementos finos. Será portanto a parte fina a fixar o valor de K entre 4,5,6 ou 7 através do Limite de Liquidez (W_L), do Índice de Plasticidade (IP) (subcapítulo 4.3) da referida parte fina e do Índice de Grupo (IG).
- Se a percentagem de passados no #200 < 10% e a percentagem de passados no #40 > 50%, o solos são do tipo areias limpas e monogranulares – dunares (A3)

No caso de serem de serem finos, a primeira separação é feita pelo índice de plasticidade (IP):

- Se $IP < 10$ são siltes classificados como A4 ou A5
- Se $IP > 10$ são argilas classificados como A6 ou A7

A segunda separação faz-se recorrendo ao Limite de liquidez (W_L):

- Se forem siltes com $W_L < 40$ são classificados como A4. Se forem siltes mas com $W_L > 40$, são classificados como A5.
- Se forem argilas com $W_L < 40$ são classificados como A6. Se forem argilas mas com $W_L > 40$, são classificados como A7.

Os solos podem ser classificados, grosso modo de A1 a A7 sendo a sua qualidade para fins rodoviários decrescente de A1 para A7.

4.2.2.1. O Índice de Grupo

Na classificação AASHO foi introduzida classificação adicional de modo a se avaliar um solo contendo uma quantidade apreciável de finos. Esta classificação é obrigatória, tem o nome de Índice de Grupo e vem indicado entre parêntesis depois do símbolo do grupo ou subgrupo. O valor do IG vem indicado em parêntesis a seguir à classificação e é calculado através da seguinte fórmula:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (4.5.)$$

E em que:

- “a” é igual à diferença arredondada à unidade, entre o valor da percentagem do material que passa no peneiro n.º200 ASTM e 35; no entanto, a=40 se a referida percentagem do material que passa no peneiro n.º200 for maior do que 75 e a=0 se menor do que 35.”a” é um valor entre 0 e 40.
- “b” é igual à diferença arredondada à unidade, entre o valor da percentagem do material que passa no peneiro n.º200 ASTM e 15. “b” é um valor entre 0 e 40.
- “c” é igual à diferença entre o valor limite de liquidez e 40. “c” é um valor entre 0 e 20.
- “d” é igual à diferença entre o valor do índice de plasticidade e 10. “d” é um valor entre 0 e 20.

O Índice de Grupo é um é um valor arredondado às unidades e compreendido entre 0 e 20. Com IG=0 indica que o material é excelente e, naturalmente, IG=20 indica que o material é péssimo para utilização na construção de aterros. A escala das proporções das variáveis utilizadas na expressão (4.5.) está feita de modo a que a influência da percentagem de passados no peneiro n.º200 seja equivalente ao índice de plasticidade e o dobro do limite de liquidez. [15]

O solo anteriormente classificado por SC na classificação unitária é A-2-4 (0) na classificação AASHO. O valor de IG=0 deriva da sua Não Plasticidade (Anexo D).

Quadro 4.7 – Quadro de classificação dos solos para fins Rodoviários ou AASHO

CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS – HRB (Highway Research Board)											
Tipos de solos	Materiais granulares [35% ou menos passando no peneiro de 0,074 mm (n° 200) ASTM]							Materiais silto-argilosos [mais de 35% passando no peneiro de 0,074 mm (n° 200) ASTM]			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupos e subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 ¹ A-7-6 ²
Granulometria - % passando nos peneiros ASTM: 2,00 mm (n° 10)..... 0,420 mm (n° 40)..... 0,074 mm (n° 200).....	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 mín 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fracção passando no peneiro de 0,420 mm (n° 40) ASTM: Limite de liquidez..... Índice de plasticidade.....	6 máx		não plástico	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín
Índice de grupo ³	0		0	0		4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais	calhau, seixo e areia		areia fina	seixo e areia siltosos ou argilosos				solos siltosos		solos argilosos	
Comportamento na camada sob o pavimento	excelente a bom						regular a muito mau				

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

² O índice de plasticidade do subgrupo A-7-6 é maior que o limite de liquidez menos 30.

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

Quadro 4.8 – Quadro de equivalência entre as duas classificações (Neves, IST)

Classificação AASHO	Classificação Unificada		
	Mais provável	Possível	Possível mas improvável
A-1-a	GW-GP	SW-SP	GM-SM
A-1-b	SW-SP-GM-SM	GP	-
A-3	SP	-	SW-GP
A-2-4	GM-SM	GC-SC	GW-GP-SW-SP
A-2-5	GM-SM	-	GW-GP-SW-SP
A-2-6	GC-SC	GM-SM	GW-GP-SW-SP
A-2-7	GM-GC-SM-SC	-	GW-GP-SW-SP
A-4	ML-OL	CL-SM-SC	GM-GC
A-5	OH-MH-ML-OL	-	SM-GM
A-6	CL	ML-OL-SC	GC-GM-SM
A-7-5	OH-MH	ML-OL-CH	GM-SM-GC-SC
A-7-6	CH-CL	ML-OL-SC	OH-MH-GC-GM-SM

4.2.3. Classificação segundo o LCPC-SETRA

O primeiro fascículo do manual “Réalisation des remblais et des couch de forme” publicado pelas instituições francesas LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) e SETRA (Service d’Étude Techniques des Routes et Autoroutes), é dedicado à classificação dos materiais com vista quer à sua utilização em aterro quer como na camada de leito de pavimento. A vantagem de classificação segundo este manual é substancial relativamente às Unificada e AASHO: é por um lado possível avaliar a granulometria praticamente através de inspeção visual e ainda incluir na classificação o estado hídrico dos solos a reutilizar.

Para essa classificação são utilizados os seguintes parâmetros:

- Parâmetros de natureza
- Parâmetros de comportamento mecânico
- Parâmetros de estado

Os parâmetros de natureza referem-se às características intrínsecas do solo, ou seja aqueles que não irão variar, ou pouco, com o decorrer das solicitações futuras: o tráfego e as condições meteorológicas.

Estes parâmetros são a granulometria e a argilosidade.

A granulometria de um solo é avaliada recorrendo apenas a 3 dimensões: 50mm, 2mm e 80µm. Sendo que a $D_{\max} < 50\text{mm}$ o limiar segundo o qual os solos se distinguem em finos, areias ou gravilhas (classes A, B, D_1 e D_2). Se os solos tiverem $D_{\max} > 50\text{mm}$ serão classificados de solos grossos (classes C e D_3). O material cuja fração grossa 50/D não é negligenciável (classe C) pode ser subdividido em duas subclasses (C_1 e C_2) segundo a percentagem relativa composta pelos elementos de dimensão inferior a 50mm.

O peneiro de 80 μ m (em rigor de maior abertura do que o n.º200 da série ASTM) permite distinguir os solos ricos em finos, e de certo modo avaliar a sua sensibilidade á água. Os limites considerados são de:

- 35%, para valores superiores ao indicado o comportamento dos solos é dependente essencialmente das partículas finas, nomeadamente quando em contacto com água; Parâmetros de natureza
- 12%, permite caracterizar a quantidade de finos para materiais arenosos e com cascalho.
- O peneiro de 2mm, é usado para distinguir cascalhos.

A argilosidade pode ser avaliada através do seu Índice de Plasticidade (IP) ou do valor do ensaio de azul de metileno (VBS) sobre a parte fina do solo (0/400 μ m).

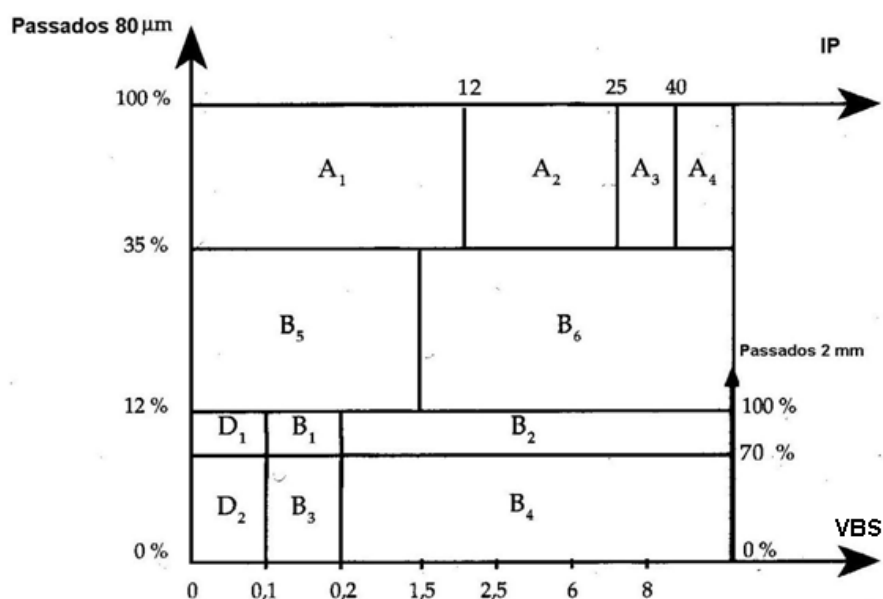
Os parâmetros de comportamento mecânico são aqueles que nos permitem avaliar se um material é capaz ou não de ser utilizado em leito de pavimento. Distinguem os materiais resistentes ao tráfico durante a construção daqueles que são suscetíveis de se fragmentar em elementos finos.

Os parâmetros de estado referem-se ao estado hídrico natural de um solo. A adoção deste parâmetro de classificação é de grande vantagem relativamente às demais classificações (AASHO por ex.) pois permite a reutilização de certos solos em aterro que apenas pela granulometria seriam, à partida, desaconselhados.

A classificação deste parâmetro está dividida em 5 estados desde o muito seco ao muito húmido e adotam as designações ts(trés sec), s, m, h, th (trés humide). Para se poder classificar os solos segundo este parâmetro são considerados o teor de humidade natural (Wn) relativamente ao teor ótimo de humidade resultado do Ensaio Proctor Normal (Wopn), o teor de humidade natural relativamente aos limites de Atterberg pela obtenção do seu Índice de Consistência (Ic) ou ainda pelo índice de capacidade de suporte imediata (IPI), que exprime o valor do CBR imediato.

Para além de tabelas de classificação dos solos existem também tabelas de classificação de materiais rochosos e tabelas de classificação de solos orgânicos e subprodutos industriais mas que não serão objeto de estudo nesta dissertação.

As figuras seguintes resumem o modo de classificação dos solos de acordo com a classificação LCPC-SETRA segundo a sua natureza.



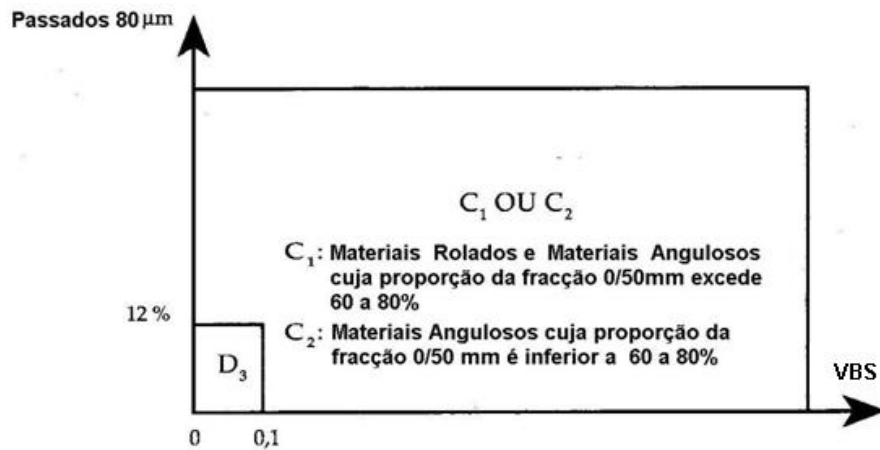


Figura 4.3 – Resumo de classificação dos solos pelos LCPC-SETRA

O solo anteriormente classificado por SC em através da Classificação Unitária em (4.2.1.) ou de A-2-4 (0) pela Classificação para fins Rodoviários em (4.2.2.) pode ser agora classificado segundo a sua natureza de classe D1 pelo manual LCPC-SETRA. Os solos da classe D1 são descritos como saibros aluvionares ou dunares. Relativamente às características principais, estes solos são praticamente não coesivos e permeáveis. Quanto à sua granulometria, são geralmente mal graduados e de pequena dimensão máxima. São muito pouco resistentes à erosão e de traficabilidade difícil.

Este solo foi utilizado na realização de aterros e leito de pavimento após mistura com cimento na intersecção com o IP8. (3.5.)

4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

4.3.1. Teor de humidade natural

As propriedades mais relevantes de um solo a utilizar como fundação de uma obra rodoviária são a resistência e deformação. Estas duas propriedades são, em grande parte, dependentes do índice de vazios e da quantidade de água contida nesse solo.

O teor de humidade ou teor em água e é dado pelo cociente entre o peso da água e o peso das partículas:

$$w = \frac{w_w}{w_s} \quad (4.6.)$$

O método mais rápido para a determinação do teor de humidade no solo no local é a utilização do gama densímetro, no entanto, em laboratório, pode ser usado o método de secagem em estufa por comparação dos pesos antes e depois da secagem.

4.3.2. EQUIVALENTE DE AREIA

O ensaio de equivalente de areia, perde muito do seu interesse com a introdução do ensaio VBS (4.3.8). Ainda assim vem referido no CE-EP como o ensaio que permite distinguir os solos coerentes ($EA \leq 30\%$) dos incoerentes ($EA > 30\%$) e daí o Grau de Compactação mínimo exigido conforme a sua coerência ou incoerência e a zona do aterro onde este solo é aplicado.*

Este ensaio permite avaliar a qualidade e quantidade de elementos de finos no solo (siltes e argilas) e exprime-se em percentagem. Quanto maior for essa percentagem, mais um solo se comporta com um material granular e portanto, menor será a sua plasticidade (solos incoerentes). Os solos cuja percentagem de volume das partículas inferiores a $75\mu m$, ou seja de partículas finas, é significativa (solos coerentes), vão ser mais fáceis de trabalhar, no entanto e com um grau elevado de probabilidade irão a curto ou médio prazo apresentar problemas ligados a assentamentos elevados quer no decorrer execução da obra quer ao longo da vida útil da obra.

O ensaio de Equivalente de Areia vem descrito na especificação LNEC E-199 e o resultados em termos rodoviários seguem o seguinte critério:

- $EA \geq 30\%$ - solo de comportamento arenoso;
- $30\% \geq EA \geq 20\%$ - solo com comportamento a verificar através dos índices de consistência para Itinerários Principais, Itinerários Complementares e Estradas Nacionais;
- $20\% \geq EA$ - solo com comportamento a verificar através dos limites de consistência para qualquer rodovia.

*“No caso de solos coerentes (equivalente de areia inferior a 30 %), a compactação relativa de solos nos aterros, referida ao ensaio de compactação pesada (Proctor Modificado), deve ser, neste caso de pelo menos 90% no corpo do aterro e 95% na PSA.

No caso de solos incoerentes, (equivalente de areia superior a 30%), os valores de referência reportados ao ensaio Proctor Modificado devem ser aumentados para 95% no corpo do aterro, garantindo-se 100% na PSA.” [3]

4.3.3. Compactação e ensaio Proctor

Define-se por compactação o processo mecânico através do qual se reduz o volume total do solo. Esta redução de volume faz-se via redução de índice de vazios, ou seja, a redução quase total do ar por rearranjo das partículas sólidas e por redução de parte da água. Tem como finalidade melhorar as características de deformabilidade, compressibilidade, resistência à compressão e corte dos solos e também a sua proteção contra a erosão. A redução do volume total não é um objetivo em si, mas sim um meio pelo qual se procura melhorar as propriedades acima referidas já que existe uma correlação simples entre redução do índice de vazios e o aumento da durabilidade dos aterros.

Antes de prosseguirmos, convém frisar que a compactação por impacto não é o único meio de melhorar as propriedades de um solo aplicado em aterro. Existem outros meios como por exemplo os físicos (adensamento, pré consolidação, mistura de solos, vibroflutuação) ou os químicos (estabilização com sais, cimento, betume asfáltico, cal).

É importante observar ainda que a redução do volume total do solo significa também o aumento da sua baridade seca:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \text{ (Kg/m}^3 \text{ ou g/cm}^3\text{)} \quad (4.7.)$$

Uma melhor ou pior compactação em obra vai depender de:

- Natureza do solo
- Método de compactação
- Energia de compactação
- Teor de humidade do solo
- Aumento ou diminuição dos teores de humidade ao efetuar a compactação
- Teor de humidade natural
- Temperatura

Temos de ter presente que em obra, a natureza do solo pode não pode geralmente ser alterada, ou seja o leque de opções de solos a aplicar é sempre limitado uma vez que foram fixados em fase de Estudo Geológico-Geotécnico os locais de proveniência: na linha ou de uma pedreira. Os cilindros são os existentes e colocados em serviço pela entidade que compete executar a obra e, portanto, a energia de compactação é a melhor possível.

A única variável que podemos controlar é o teor de humidade do solo depois de já fixada a energia de compactação máxima. A questão que se coloca é saber qual a percentagem de água que permite uma melhor compactação.

Foi em 1933 que R. R. Proctor descobriu que a baridade seca, resultante da aplicação de uma determinada energia de compactação é função do teor de humidade do solo, isto é, os efeitos da compactação são mais ou menos eficazes conforme o teor de humidade.

Este comportamento dos solos é traduzido num gráfico $\gamma_d = f(w)$ cuja forma apresenta uma curva de concavidade virada para baixo. Para humidades excessivamente baixas, o atrito é alto o que prejudica a redução de vazios (para uma determinada energia de compactação) e, portanto, do volume. O aumento da baridade seca (em ramo seco) resulta essencialmente da redução do efeito do atrito entre as partículas por efeito do aumento do teor de humidade. Neste caso o aumento do teor de humidade é benéfico.

Segundo R. R. Proctor, a partir de um determinado teor de humidade, a água dificulta a expulsão do ar, não havendo por isso nenhum acréscimo na baridade. Antes, existe um decréscimo progressivo. Há, portanto, para uma dada energia, uma densidade máxima que é obtida para um certo teor de humidade, designado como o teor de humidade ótimo, representativo da relação ideal entre solo, água e ar.

Convém ter presente que em situações reais de obra, a procura da baridade seca máxima é consideravelmente mais simples e menos demorada percorrendo o ramo seco da curva do ensaio Proctor dado que o processo de aumento desse teor de humidade é mais simples (rega) do que a diminuição desse mesmo teor (escarificação e evaporação).

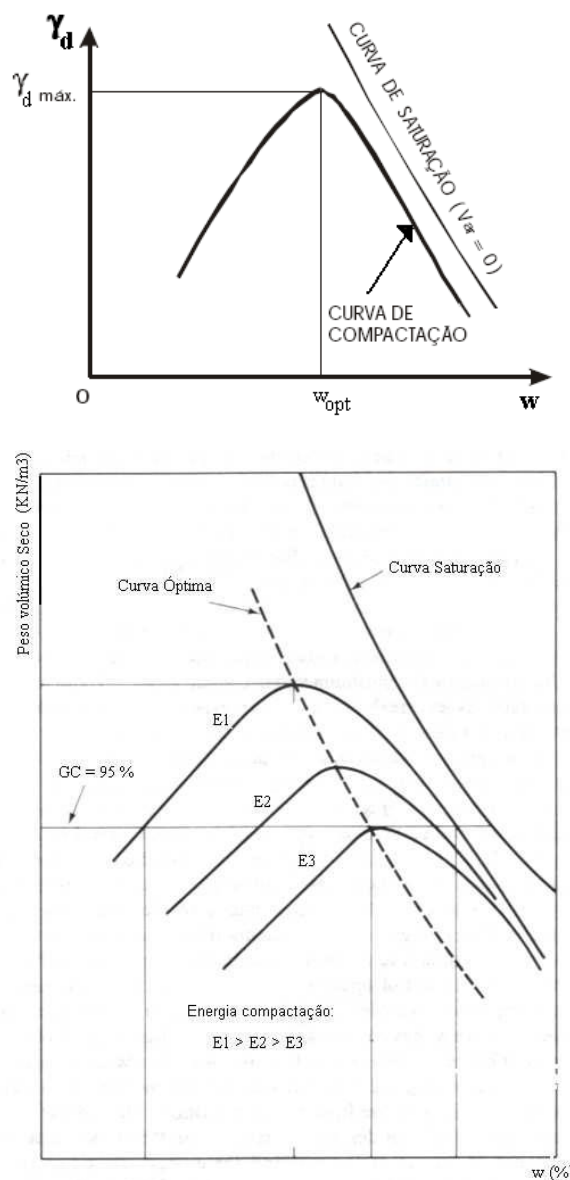


Figura 4.4 – Curva de compactação e de saturação

O estudo do comportamento deste material descontínuo, constituído por uma fase sólida, líquida e gasosa, quando sujeito à redução de volume por compactação, revela-nos que é possível atingir uma

maior baridade através de uma maior energia mas de, em simultâneo, da redução do teor de humidade. Temos também presente que para cada curva de compactação existe uma outra curva que traduz a percentagem de ar presente no solo. Para cada par ordenado teor de humidade/baridade seca existe um ponto que traduz o volume de ar existente no solo (volume de vazios não preenchido pela água) e tem de equação:

$$\frac{V_s}{V} + \frac{V_w}{V} + \frac{V_{ar}}{V} = 1 \Leftrightarrow 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} - w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} = \frac{V_{ar}}{V}$$

Se $\frac{V_{ar}}{V} = 0$ significa que todo o volume de vazios está preenchido por água e, portanto, o solo está saturado. A curva, denominada de curva de saturação é descrita pela seguinte equação, também ela em função do teor de humidade, $\gamma_d = f(w)$:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + w\gamma_s}$$

Se $w = 0$ vem $\gamma_d = \gamma_s$ o que traduz o estado em o volume de vazios é nulo. Ao passo que se w tender para $+\infty$, γ_d tende para 0 sem nunca intercectar o eixo w . A curva de saturação tem de assintota horizontal o eixo w e revela uma fronteira a partir da qual a baridade seca é impossível de ser ultrapassada independentemente do valor da energia utilizada e se admitirmos a água com um fluído incompressível. Pode ser observada como uma curva teórica uma vez que através apenas da compactação não é possível reduzir o volume do ar a zero. As curvas relativas a energias de compactação crescente ($E_1 > E_2 > E_3$) (fig 4.4) tendem para a curva de saturação; aproximam-se mas nunca a alcançam.

O cociente entre a baridade seca de um solo compactado e a baridade seca máxima obtido através do ensaio Proctor chama-se Grau de Compactação (GC) e exprime-se em percentagem. O Grau de Compactação que deve ser obtido em aterro veio já descrito em (4.3.2.).

Por absurdo, é inverosímil que a baridade seca obtida pela leitura numa camada de aterro acabada de compactar com o gamadensímetro for superior à baridade seca máxima espectável previamente em laboratório através do ensaio Proctor. O equívoco reside no facto de que o solo acabado de compactar já não possui a mesma distribuição granulométrica daquele que foi ensaiado. A amostra de solo ensaiado não é representativa daquele que está a ser sujeito à leitura por ser melhor graduado.

O ensaio mais utilizado para se avaliar os materiais a compactar é o ensaio Proctor e permite determinar o teor de humidade ótimo (w_{op}) e o peso volúmico seco (γ_d). Consiste na aplicação de uma determinada energia específica de compactação, deixando cair um determinado pilão com um peso especificado, sobre uma amostra desse solo a uma altura padrão e um número de vezes também especificado.

A energia específica de compactação pode ser definida pela fórmula matemática:

$$Ec = \frac{Phn}{V} \times N \quad (4.8.)$$

Dado que:

P = peso do pilão (Kg)

h = altura da queda (cm)

n = número de pancadas

V = volume do molde cilíndrico (m^3)

N = número de camadas



Fig. 4.5 – Momento de aplicação das pancadas no ensaio Proctor

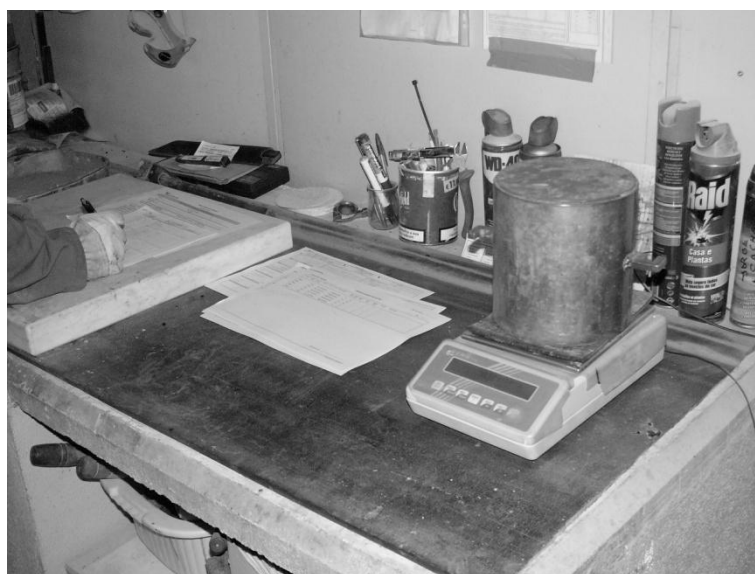


Fig. 4.6 – Pesagem a volume constante para determinação da baridade máxima teórica

Existem dois ensaios Proctor, correspondentes a energias de compactação diferentes: o ensaio Proctor normal e o ensaio Proctor modificado sendo que no segundo se utiliza uma maior energia de compactação. Note-se também que o ensaio Proctor modificado proporciona resultados de baridade seca máxima superiores aos atingidos pelo ensaio normal e que são aquelas mais próximas das que as máquinas modernas de compactação conseguem obter dos solos em obra.

Ensaio Proctor	Peso do molde (kg)	Altura da queda do pilão (cm)	Número de pancadas por camada	Número de camadas	Dimensão máxima das partículas
normal	2,49	30,5	Molde Proctor* 25	3	D≤5mm
			Molde CBR* 55	3	5<D<20mm
modificado	4,54	45,7	Molde Proctor 25	5	D≤5mm
			Molde CBR 55	5	5<D<20mm

*Molde Proctor: molde cilíndrico com altura igual a 11,7cm e diâmetro igual a 10,2cm

*Molde CBR: molde cilíndrico com altura igual a 15,2cm e diâmetro igual a 15,2cm

4.3.4. Ensaio CBR

O ensaio CBR (sigla da designação norte americana Califórnia Bearing Ratio) é um dos ensaios mais usados no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Permite ter uma ideia do módulo de deformabilidade de um solo de fundação do pavimento e a partir dele dimensionar a espessura da camada de fundação necessária à estrutura de pavimento que lhe estará sobrejacente.

Existem três tipos de ensaio CBR e que são usados em função dos fins a que se destinam:

- O Índice de Capacidade Imediato (em francês Indice Portant Immédiat - IPI)

Mede a resistência ao punçoamento de um solo compactado à energia Proctor Normal ou Proctor Modificado conforme a sua granulometria e com o seu teor de água natural. Esse ensaio caracteriza a aptidão do solo em permitir a circulação dos veículos em fase da obra. De uma maneira geral, o IPI diminui com o aumento do valor do teor de humidade natural.

- O ensaio CBR imediato

Este ensaio mede a resistência ao punçoamento de um solo compactado com o seu teor de humidade ótimo. A amostra de solo é sujeita a um esforço de compressão equivalente ao esforço imposto pelo pavimento sobre a superfície do seu leito.

- O ensaio CBR após imersão

O valor do CBR que é extraído deste ensaio é de grande utilidade especialmente pela rapidez com que se pode estimar o valor do módulo de deformabilidade (E_f). O módulo de deformabilidade do solo de fundação equivale, “grosso modo”, ao resultado do ensaio CBR após imersão em percentagem multiplicado por 10.

(4.9.)

$$E_f = 10 \times CBR(\%)$$

Este ensaio pode ser descrito em três fases: determinação das humidades máximas e correspondentes teores em água para 3 provetes de energias de compactação diferentes; imersão em água dos 3 provetes e aplicação da força de penetração; determinação do CBR final graficamente.

Consiste em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma certa profundidade e comparar este valor pela força necessária para penetrar de material normalizado. Neste caso do CBR, o material é uma rocha calcária denominada Califórnia limestone à qual é necessário aplicar uma força de 1355Kg.f para se conseguir penetrar 2,5mm e 2033Kg.f para se conseguir penetrar 5mm.

As amostras devem ser preparadas segundo a Especificação LNEC E-198-1967. Esta especificação determina que os provetes a ensaiar deverão ter estado imersos em água durante pelo menos 4 dias, em que já não haja aumento de volume por saturação. Esta preparação dos provetes simula o estado em que o solo se encontra com a menor capacidade possível devido à pressão neutra entre as partículas do solo.

No caso dos solos a ensaiar serem coerentes, deverão ser moldados provetes com energias de compactação de 12, 25 e 55 pancadas por camada e com os respetivos teores de humidade ótimos obtidos no ensaio Proctor que deve anteceder a realização do CBR. Deverão também ser registadas as baridades máximas secas para cada um destes provetes.

$$CBR_{2,5mm} = \frac{F_{2,5}}{1355Kg.f} \quad (4.10.)$$

$$CBR_{5mm} = \frac{F_{2,5}}{2033Kg.f} \quad (4.11.)$$

$F_{2,5}$ - Força necessária para penetrar 2,5mm no provete

F_5 - Força necessária para penetrar 5mm no provete

Seguidamente, cada provete relativo a cada uma das energias de compactação, será sujeito a uma força de penetração por um pistão normalizado e será medida a força necessária para se atingir os referidos 2,5mm e 5mm. Estas forças são a $F_{2,5}$ e F_5 referidas e é calculado o CBR para cada uma das energias pelo cociente apresentado acima.

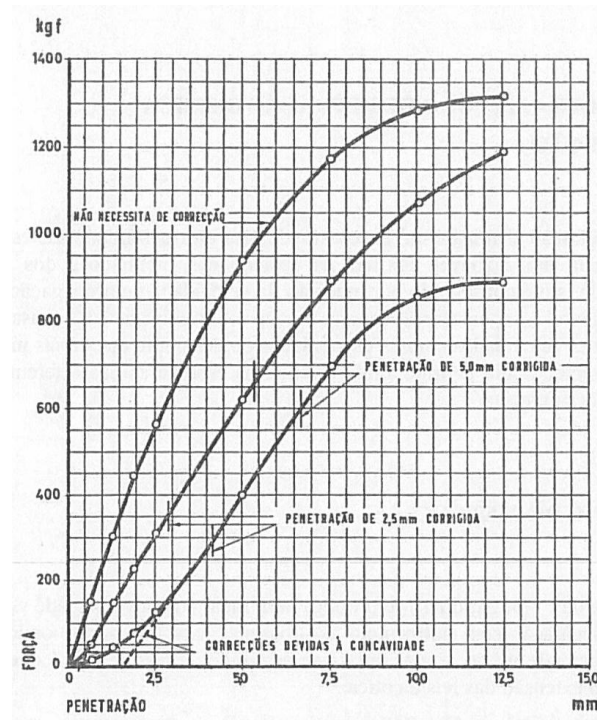


Figura 4.7 – Curva CBR que relaciona carga (KN)/penetração (mm)

O gráfico apresentado acima explica como deve de ser corrigido os valores da força de penetração através da alteração da origem do sistema de eixos devido à forma côncava do gráfico para valores mais baixos de penetração.

O CBR para cada uma dessas energias será o maior de entre $CBR_{2,5mm}$ ou CBR_{5mm} . Caso contrário, o processo de aplicação da força de penetração terá de ser levado a cabo novamente, sendo fixado para o CBR nesta energia de compactação o maior dos dois. Se se traçar o gráfico baridade máxima seca relativo ao ensaio Proctor em função do valor do CBR da respetiva energia de compactação, o valor CBR final é o correspondente a 95% da baridade máxima seca com a energia de compactação relativo às 55 pancadas. Em solos coerentes, 95% do Grau de Compactação é o mínimo exigível para a PSA e, portanto, permite tornar credível o módulo de deformação da fundação E_f através do valor do CBR.

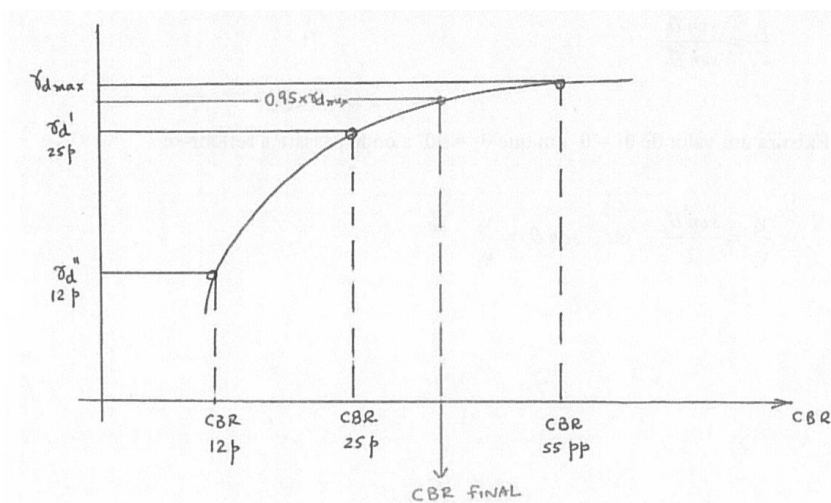


Figura 4.8 – Determinação do valor final do CBR

O ensaio chamado de CBR Imediato é, por assim dizer, uma versão resumida do ensaio CBR e em que a força de penetração é medida sobre um provete de solo compactado à energia Proctor Normal com o teor de humidade natural ou seja sem imersão prévia do provete.

4.3.5. Ensaio de carga com placa

As características de deformabilidade da fundação serão validadas em obra, através da realização de ensaios de carga, não destrutivos com placa de carga ou com defletómetro de impacto.

O leito do pavimento tem uma importância decisiva no comportamento do pavimento, que depende em grande parte das características dos solos sobre os quais se apoia. Por outro lado, uma das funções do pavimento é a distribuição das cargas geradas pelo tráfego através das diferentes camadas que o compõem, com o objetivo de que as deformações que cheguem à fundação sejam suficientemente reduzidas para que não se produzam deformações permanentes.

Como tal, a avaliação quantitativa da capacidade de suporte da fundação do pavimento e do grau de compactação das camadas granulares mediante a realização de ensaios é imprescindível. Por vezes o método utilizado e estabelecido em diferentes normas para pavimentos é o ensaio de carga com placa. Este ensaio, visto ser realizado com carácter praticamente universal e de apresentar correlações empíricas com o comportamento da fundação do pavimento, apresenta o inconveniente de ser um ensaio lento, o que limita o número de ensaios realizáveis. [3]

A colocação das vigas do viaduto sobre a A2, operação descrita no início do capítulo 3, obrigou a que o Material de Granulometria Extensa que conforma o pavimento para as referidas ruas seja possuidor de uma capacidade resistente mínima. No local das sapatas das ruas foram realizados ensaios de placa para controlo dessa capacidade. Este ensaio segue a Norma NLT 357/98.

Consiste em fazer uma pressão crescente sobre a camada a ensaiar através de um disco circular. As deformações ocorridas são medidas através de três defletómetros colocados como indica a fotografia seguinte.

O módulo de elasticidade obtido equivale ao módulo de compressibilidade obtido no segundo ciclo de carga do ensaio e calcula-se através da equação de:

$$E_v = \frac{1,5 \times Q \times a \times (1 - \nu^2)}{W} \quad (4.12.)$$

Q - pressão média, a - raio, ν - coef. Poisson, w – deflexão

Este ensaio realiza-se com uma frequência de pelo menos um ensaio em cada 200 metros de extensão e pode ser empregue uma placa de 300mm ou 600mm de diâmetro. Normalmente efetuam-se dois cálculos correspondentes aos dois ciclos de carga e admitindo que $1 - \nu^2 = 1$. Obtém-se, portanto, dois valores E_{v1} e E_{v2} . Calcula-se $k = \frac{E_{v2}}{E_{v1}}$. sendo que a compactação é melhor à medida que k é próximo de 1. Para $k < 1,25$ a compactação é considerada satisfatória.

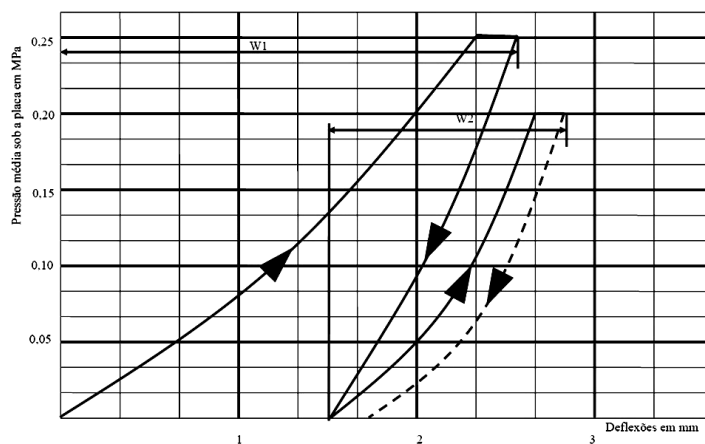


Fig.4.9– Gráfico da relação tensões/ assentamentos em sucessivos ciclos de carga e descarga [4]

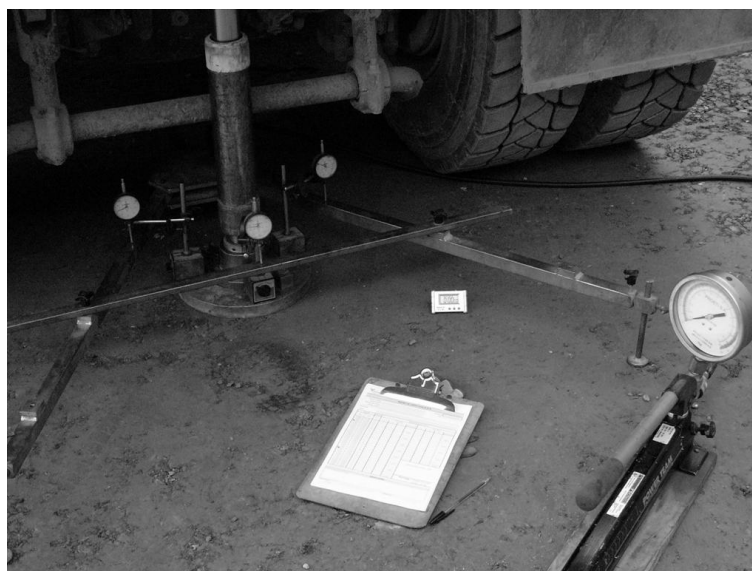


Fig.4.10 –Material necessário para o ensaio de carga de placa

Um cálculo simples recorrendo aos resultados apresentados no Anexo C permite-nos afirmar que a compactação na plataforma ainda não pode ser considerada satisfatória, vejamos:

$$Ev1 = \frac{1,5 \times Q \times a \times (1 - \nu^2)}{W1} = \frac{112,5}{W1} = \frac{112,5}{3,36} = 33,5$$

$$Ev2 = \frac{1,5 \times Q \times a \times (1 - \nu^2)}{W2} = \frac{90}{W2} = \frac{90}{3,33 - 2,15} = 76,27$$

$$k = \frac{Ev2}{Ev1} = 2,3 > 1,25$$

4.3.6. Método de avaliação do grau de compactação com gamadensímetro

Este método recorre a um equipamento chamado gamadensímetro e é usado para determinação *in situ* do teor de humidade e da baridade seca de uma camada acabada de compactar. É um método rápido e simples de se efetuarem leituras e por isso de uso recorrente numa obra rodoviária. Necessita, como é normal em todos os equipamentos, de calibração periódica.

O procedimento de determinação do grau de compactação com o aparelho TROXLER 3450 segue os seguintes passos:

- Transporte do gama densímetro para o local onde se pretende fazer a leitura
- Colocar o aparelho firmemente numa superfície regular
- Ligar o aparelho
- Baixar o manípulo até à profundidade desejada pressionando no gatilho
- Introduzir o valor da baridade máxima seca resultante do ensaio Proctor modificado
- Introduzir o valor da profundidade em centímetros à qual se pretende fazer a leitura.



Fig.4.11 - Esquema de funcionamento de um gamadensímetro



Fig.4.12 –Utilização do gamadensímetro para leitura do Grau de Compactação de uma camada de aterro

4.3.7. Ensaio de degradabilidade Los Angeles

O ensaio Los Angeles (Especificação LNEC E-237) aplica-se a materiais de origem rochosa e avalia a resistência à abrasão dos agregados e permite a sua seleção mais apropriada antes da extração.

Uma amostra de dimensões compreendidas entre 10/14mm e de massa seca de 5000g $\pm$ 5g (M0) é introduzida num tambor rotativo de eixo horizontal em conjunto com 11 esferas de aço. O tambor efetua 500 rotações à velocidade de rotação entre 31 e 33 rotações por minuto.

A fricção dos agregados entre si e contra as esferas de aço e as paredes do tambor provoca a sua degradação em maior e menor quantidade conforme a resistência referida.

O valor da resistência à abrasão LA é dado pela expressão seguinte em que (M1) é a percentagem de massa de elementos finos passados no peneiro 1,6mm secos e após lavagem e (M0) a massa seca inicial dos agregados intactos.

$$LA = \frac{100 \times (M0 - M1)}{M0} \quad (4.14.)$$

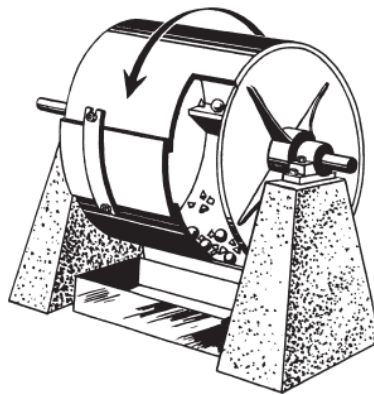


Fig. 4.13 –Tambor rotativo utilizado para o ensaio de degradabilidade Los Angeles

4.3.8. Ensaio Micro-Deval em presença da água (MDE)

O objetivo do ensaio Micro-Deal (MDE) é o de compreender a resistência à erosão por atrito de um agregado. Uma amostra de agregado cuja dimensão dos elementos está entre 10 e 14mm é submetida à erosão em presença da água por contacto com esferas de aço no interior de um cilindro em rotação. O grau de erosão é medido pela determinação da proporção de elementos finos inferiores a 1,6mm gerados no decurso do ensaio.

O método consiste em colocar uma amostra 500g de agregados lavada e seca num tambor com 5kg de esferas metálicas e 2,5l de água. O tambor é rodado 12 000 vezes a uma velocidade de 100 voltas por minuto. Após esta operação a amostra é lavada, peneirada a fração inferior a 1,6mm e determinada a respetiva massa em gramas (M). O valor do coeficiente MDE é dado pela seguinte expressão:

$$MDE = (500 - M) / 5 \quad (4.15.)$$

4.3.9. Ensaio para determinação do valor de azul de metileno

Este ensaio, ou mais simplesmente chamado de ensaio de azul de metileno (NF P94-068), permite avaliar a superfície específica da fração fina de um solo. Convirá relembrar, portanto, a noção de superfície específica: trata-se do valor da área por unidade de massa de uma partícula e vem expresso em m²/g. Um cálculo simples permite-nos concluir que uma partícula cúbica de dimensões próximas de um grão de areia ($\rho=0,0027\text{g/mm}^3$), com 6 milímetros quadrados de superfície tem aproximadamente 2,2E-3 m²/g de valor de superfície específica. Uma partícula de argila (tipicamente

de forma lamelar) com $2,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ de área da sua superfície, tem de valor de superfície específica $75,6 \text{ m}^2/\text{g}$. Existem algumas argilas como as montmorilonites que atingem valores na ordem de $800 \text{ m}^2/\text{g}$ de superfície específica. [1]

A superfície específica está diretamente relacionada com sensibilidade à água de um solo uma vez que os materiais cuja superfície específica é alta mais facilidade terão em adsorver a água e mais dificuldade terão na diminuição do teor de humidade do solo.

Voltando ao ensaio de azul de metileno: sendo que num determinado solo é, em larga medida, a superfície das partículas inferiores a $2 \mu\text{m}$ (fração argilosa) que determina a sua superfície específica. Pode então considerar-se que o valor de azul de metileno (ou VBS para *valeur de bleu du sol*) exprime a quantidade e qualidade (mais ou menos atividade (4.1.3.)) da fração argilosa contida nesse solo.

O objetivo deste ensaio consiste portanto em determinar a capacidade de adsorção de azul de metileno e portanto da água. Isto é, a quantidade necessária de corante para que todas as partículas numa amostra fiquem revestidas por ele.

O procedimento consiste em acrescentar quantidades crescentes (5 cm^3 , 10 cm^3 , 15 cm^3 ...) de uma solução de azul de metileno numa suspensão de solo mantido em agitação. De cada quantidade de azul de metileno misturado com o solo, é-lhe retirada uma gota que se deposita numa folha de papel absorvente.

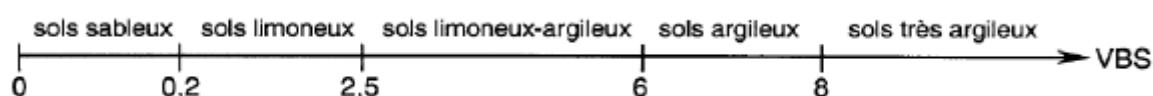
O ensaio termina quando surge uma auréola translúcida em redor da gota depositada significando que as partículas de solo nele contido têm a sua superfície coberta totalmente e não são mais capazes de adsorver e conservar mais quantidades de azul de metileno.

O valor de VBS é dado pela seguinte expressão:

$$VBS = \frac{B}{m} \times 100 \quad (4.14.)$$

Em que B é a massa de azul de metileno introduzido, m é a massa seca de amostra de solo utilizado no ensaio.

A figura seguinte retrata uma escala de valores de azul de metileno a que correspondem uma classificação de solos relativamente à sua argilosidade.



4.3.10. Ensaio para avaliação da friabilidade das areias

O ensaio de friabilidade das areias mede a resistência à fragmentação das areias. A execução do ensaio é similar ao ensaio Micro-Deval (4.3.8.) no entanto a amostra é limitada a elementos inferiores a 4 mm .

O coeficiente de Friabilidade das areias FS (Friabilité des Sables) é calculado pela expressão:

$$FS = \frac{P1}{P} \times 100$$

Em que P é a massa de material submetido ao ensaio (2 kg) e P1 a massa de elementos inferiores a $0,05 \text{ mm}$ produzidos no decurso do ensaio.

4.4. ESTUDO SOBRE O SOLO-CIMENTO

Para o Lanço A e B da Autoestrada do Baixo Alentejo, foi levado a cabo pelos laboratórios da Tecnovia um estudo de uma mistura solo-cimento para a execução da camada de leito de pavimento.

Numa fase anterior desta empreitada tinham sido já executadas as operações de terraplenagem em aterro e escavação, incluindo a disposição à cota dos materiais a tratar *in situ* no âmbito da execução do leito do pavimento em solo tratado com cimento.

Como foi descrito no primeiro capítulo, o Lanço A e B compreende uma extensão de 10627m, desenvolvendo-se paralelamente ao IP8 entre o nó de Grândola Sul e o lugar da Malhada Velha, compreendida entre os PK 22+625 e 23+191 do Lanço A e os PK 0+000 e 11+200 do Lanço B.

Foram identificadas duas zonas, cada uma caracterizada por um material a tratar *in situ*:

- Nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul, o material disposto para tratamento consiste em material fino procedente de britagem de rocha em pedreira (pó de pedra);
- Nas restantes zonas, o material disposto para tratamento consiste numa areia mal graduada siltosa, que se encontra nas diversas escavações na linha;



Fig.4.14 – Local de recolha do pó de pedra a aplicar nos ramos de acesso ao nó de Grândola sul



Fig.4.15 – Local de empréstimo da areia siltosa mal graduada a aplicar nos ramos de acesso ao nó de ligação com o IP8

Na realização do estudo, foram observados os requisitos expressos nos seguintes documentos normativos:

- Caderno de Encargos Tipo Obra do EP;
- Projeto de Execução, nomeadamente o disposto no capítulo PE 05-Pavimentação;
- O Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional no Capítulo 4.

Estas normas dizem respeito ao tratamento e análise laboratorial dos elementos das misturas, solos e agregados e também aos métodos e ensaios, estando resumidas do seguinte modo:

- A série EN/NP EN 13286 é dedicada às misturas de agregados não ligadas e tratadas com ligantes hidráulicos, enquanto as NP EN 14227-10 e o exemplo EN 14227-1 são especialmente dedicadas ao solo-cimento e ao solo-cal. A norma NP EN 13242 regulamenta os agregados britados a aplicar nas misturas (Cabral, 2014);
- No Caderno de Encargos das EP, o estudo sobre o solo-cimento centra-se nos volumes I- Terraplenagem e III- Pavimentação e nos seus capítulos 14- Características dos materiais e 15- Métodos construtivos de cada um dos volumes atrás referenciados.

4.4.1. Requisitos aplicáveis aos materiais e à mistura

Para as características dos materiais a usar para o tratamento das misturas são fixados as classes de solo ou agregados permitidos e suas granulometrias e ainda a classe do ligante.

O Caderno de Encargos das EP estabelece como requisitos aplicáveis dos materiais constituintes os seguintes:

- O solo deverá ter elementos inferiores a 100mm e o Índice de plasticidade máximo de 12%;

- O cimento a utilizar no tratamento deve ser do tipo I ou II e da classe 32,5.

O mesmo Caderno de Encargos refere que a mistura resultante de solo-cimento deve respeitar as seguintes características:

- Resistência mínima à compressão simples de 1,0Mpa aos 7 dias e de 2,0Mpa aos 28 dias (cimento tipo I) ou 90 dias (cimento tipo II);
- Resistência mínima à compressão diametral de 0,25 Mpa aos 28 dias (cimento tipo I) ou 90 dias (cimento tipo II).

De acordo com o Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, a mistura solo-cimento resultante deve resultar os seguintes requisitos:

- Resistência mínima à compressão diametral de 0,20 Mpa aos 28 dias;
- CBR imediato mínimo de 15%.

4.4.2. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Relativamente ao cimento a utilizar em mistura solo-cimento, foi utilizado o cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N, produzido pela Secil, cuja ficha de produto é apresentada em anexo D.

Para caracterização do pó de pedra aplicado nos ramos de acesso ao nó de Grândola Sul e da areia mal graduada siltosa que se encontra em escavações na linha, procedeu-se a colheitas representativas desses materiais, sendo dispostas na tabela seguinte as características com vista à averiguação da sua conformidade relativamente às prescrições descritas em (4.4.1.).

Quadro 4.9 – Caraterização da areia mal graduada siltosa e do pó de pedra a utilizar na mistura solo-cimento (dados Tecnovia)

Material	Areia Mal Graduada Siltosa	Pó de Pedra
	1'' ½	100
Análise granulométrica (% acumulada passada em cada peneiro)	1''	97,4
	3/8''	94,6
	N.º 4	91,5
	N.º 10	73,8
	N.º 20	59,5
	N.º 40	47,7
	N.º 200	19,0
Limites de consistência	LL	NP
	IP	NP
Ensaio de compactação Proctor	Baridade máxima seca(ton/m3)	2,15
	Teor de humidade ótimo(%)	7,5

Verifica-se então que todos os componentes da mistura (cimento, pó de pedra ou areia siltosa mal graduada) cumprem os requisitos referidos em (4.4.1.).

4.4.3. CARATERIZAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO

Com o objetivo de se caracterizar a mistura de solo-cimento, procedeu-se, para três percentagens de cimento, 3.0%, 4.0% e 5.0% à moldagem de provetes para realização de ensaios de compactação Proctor (determinação da baridade seca máxima e o correspondente teor de humidade ótimo) e à moldagem de provetes para realização de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e aos 90 dias, e de resistência à compressão simples ao 7, 28 e 90 dias, com vista a avaliar o cumprimento dos requisitos de resistência da mistura solo-cimento. Na moldagem dos provetes recorreu-se à compactação via martelo vibro-compressor (especificação NLT-310/90), calibrado para cada material de modo a reproduzir o esforço correspondente a uma compactação superior a 98% da obtida via compactação Proctor. Devo referir que à data da realização deste trabalho, os dados da resistência relativos aos 90 dias ainda não estavam disponíveis.

Os resultados dos ensaios de compactação Proctor são apresentados nas tabelas seguintes:

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de compactação Proctor sobre as misturas solo-cimento com a areia mal graduada siltosa (dados Tecnovia)

	3.0% de cimento	4.0% de cimento	5.0% de cimento
Baridade máxima seca (g/cm ³)	2,04	2,06	2,07
Teor de humidade ótimo(%)	10,2	10,7	10,9

Quadro 4.11 – Resultados do ensaio de compactação Proctor sobre as misturas solo-cimento com o pó de pedra (dados Tecnovia)

	3.0% de cimento	4.0% de cimento	5.0% de cimento
Baridade máxima seca (g/cm ³)	2,20	2,21	2,23
Teor de humidade ótimo(%)	8,0	8,2	8,4

Seguidamente moldaram-se provetes com as três percentagens de cimento para realização de ensaios de determinação da resistência à compressão simples (7, 28 e 90 dias) e diametral (28 e 90 dias). Naturalmente que os teores de humidade dos provetes foram aqueles que proporcionam a baridade máxima seca, ou seja o teor de humidade ótimo. Os ensaios de determinação da resistência à compressão simples foram realizados de acordo com a especificação NLT-305/90 e os ensaios de determinação da resistência à compressão diametral de acordo com a especificação NLT-304/89.

Os resultados obtidos são apresentados nos quadros seguintes, e os respetivos relatórios de ensaio em anexo.

Quadro 4.12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas solo-cimento com a areia mal graduada siltosa (dados Tecnovia)

% de cimento	Idade	Resistência média à compressão simples	Resistência média à compressão diametral
3,0%	7 dias	1,29 MPa	-
3,0%	28 dias	1,48 MPa	0,21 MPa
4,0%	7 dias	1,51 MPa	-
4,0%	28 dias	1,81 MPa	0,26 MPa
,0%	7 dias	1,91MPa	-
5,0%	28 dias	2,60MPa	0,28MPa

Quadro 4.13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas solo-cimento com a areia mal (dados Tecnovia)

% de cimento	Idade	Resistência média à compressão simples	Resistência média à compressão diametral
3,0%	7 dias	1,52 MPa	-
3,0%	28 dias	1,72 MPa	0,23 MPa
4,0%	7 dias	2,24 MPa	-
4,0%	28 dias	2,91 MPa	0,25 MPa
5,0%	7 dias	2,80MPa	-
5,0%	28 dias	3,15MPa	0,30 MPa

A partir dos resultados obtidos, foi proposta a adoção de uma percentagem de cimento de 4,0% para os dois casos de solo. Esta percentagem corresponde à mínima (a que minimiza os custos) e que dá resposta a todas as exigências de resistência.

Posteriormente foi realizado um ensaio de CBR imediato, sendo os resultados obtidos apresentados na tabela 6 e os relatórios de ensaio no Anexo D.

Quadro 4.14 – Resultados dos ensaios CBR imediato das misturas solo-cimento com areia mal graduada siltosa e com o pó de pedra (dados Tecnovia)

	Mistura com areia mal graduada siltosa	Mistura com pó de pedra
CBR imediato (%)	21	27

Verifica-se que também é cumprido para ambas as misturas, o requisito patente no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional relativamente ao CBR imedia para esta solução de leito de pavimento.

4.4.4. CONCLUSÕES

Dados os resultados obtidos neste estudo, propõem-se no âmbito da execução do leito de pavimento dos troços do lanço A e B da Autoestrada do Baixo Alentejo em que será sujeito ao tratamento dos solos por cimento, as seguintes percentagens para as misturas:

Quadro 4.15 – Percentagem de areia bem graduada siltosa , cimento e teor de humidade a aplicar in situ (dados Tecnovia)

Componentes da mistura (%)		Teor de humidade ótimo (%)
Areia bem graduada siltosa	96,0	10,7
Cimento Portland CEM II / B-L 32,5 N	4,0	

Quadro 4.16 – Percentagem de pó de pedra, cimento e teor de humidade a aplicar in situ (dados Tecnovia)

Componentes da mistura (%)		Teor de humidade ótimo (%)
Pó de pedra	96,0	9,2
Cimento Portland CEM II / B-L 32,5 N	4,0	

5

CONCLUSÃO

A construção de uma nova via de comunicação terrestre é um processo complexo e no qual os trabalhos começam bem antes do equipamento ser colocado nos locais de execução da obra. As terraplenagens são levadas a cabo com mais frequência numa fase inicial de uma obra rodoviária, geralmente assumindo para si mesmas as de precursoras de estruturas mais dispendiosas e de outros trabalhos de construção, sendo que a sua conclusão dentro do prazo previsto é usualmente a chave para que a conclusão da obra na sua totalidade fique igualmente dentro do prazo previsto. É muito difícil recuperar o tempo perdido em fases iniciais da construção.

De modo a que os aterros possam ser contruídos de forma económica e ao mesmo tempo possuam uma estabilidade adequada e assentamentos aceitáveis, é normalmente necessário ser-se seletivo na escolha dos materiais para a sua execução. Mas ser-se seletivo no material não é suficiente. É certo que as classificações dos materiais usados nas terraplenagens distinguem com maior ou menor rigor aqueles que se podem tomar por adequados ou aceitáveis daqueles que são inadequados ou até inaceitáveis para a sua incorporação.

Estas decisões podem ser tomadas ainda em fase de projeto ou já durante a execução de uma obra rodoviária. De qualquer forma, a juzante da seleção é absolutamente crucial controlar a qualidade do processo e de como eles (os materiais) estão a ser aplicados.

Assim, é possível resumir as mais importantes características que devem ser inspecionadas numa obra rodoviária e que são enquadradas em três categorias:

- Os ensaios aos materiais constituintes e misturas com o propósito de confirmar ou não da sua conformidade com as especificações contratuais,
- Medições de quantidades e inspeções ao equipamento de acordo com as especificações e os procedimentos estabelecidos
- Medições e ensaios aos trabalhos efetuados que podem da conformidade com o exigido pelo dono da obra.

Num patamar diferente e mais abrangente podemos também discutir quais são os fatores que deveriam ser tomados em consideração na escolha de critérios para a avaliação dos materiais e das suas condições de aplicação. A escolha dos critérios adequados têm implicações económicas enormes num país. É sobretudo neste ponto que o manual LCPC-SETRA se revela profícuo relativamente ao CE-EP. Antes de tudo pela homogeneização de unidades de medida. Julga-se absolutamente urgente o abandono do recurso dos peneiros ASTM e da adoção da NP 1379.

Praticamente todos os obras de melhoramento das redes viárias, especialmente aquelas que recorrem à construção de novas autoestradas, envolvem uma quantidade considerável de movimentos de terras já que, é o solo o material de fundação dessas autoestradas seja ele na posição original *in situ* seja ele

transportado e colocado como material de aterro. Adicionalmente, a própria estrutura de pavimento é composta também por este que é o mais vulgar dos materiais no planeta Terra.

Por estas razões se pode dizer que os solos assumem um papel de maior importância na construção rodoviária e que será de interesse comum que um futuro engenheiro civil tenha deles um entendimento completo, de como se comportam e de como devem ser usados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fernandes, M. *Mecânica dos Solos Volume I*, FEUP Edições, Porto, 2006.
- [2] FRANÇA, A. *Sebenta de Vias de Comunicação II*. FEUP, 2000.
- [3] Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, 2010.
- [4] RIBEIRO, J. *Sebenta de Obras Rodoviárias*. FEUP, 2015.
- [5] JUNTA AUTÓNOMA DE ESTRADAS (1995)– *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, JAE, Almada.
- [6] SETRA/LCPC – *Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 et 2*, 1992
- [7] Especificação LNEC – E240, *Solos. Classificação para Fins Rodoviários*, 1970.
- [8] Especificação LNEC – E241, *Solos. Terraplenagens*, 1971.
- [9] Especificação LNEC – E242, *Execução de Terraplenagens de Estradas*, 1971
- [10] Robinson R. e Thagesen B. *Road engineering for development*, Spon Press, 2004.
- [11] Vieira, C. R. *Direcção de Obra de Estradas – FEUP*, Porto, 2004.
- [12] Cabral, J. *Camadas Estruturais de Pavimentos Rodoviários Tratadas com Cimento*, Dissertação de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [13] Ballester, F; Capote, J. *Maquinas de Movimientos de Tierra: Cráterios de Selección*, Publicaciones Técnicas, Madrid, 1992.
- [14] Horner P. C. *ICE Works Construction Guides, Earthworks*, Thomas Telford Ltd, London, 1988.
- [15] O’Flaherty C.A. *Highway Engineering Vol2*, Edward Arnold Ltd, London 1974.

ANEXOS

ANEXO A- REGISTO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DA OBRA

A1- EXECUÇÃO DE PLATAFORMAS JUNTO À AUTOESTRADA DO ALGARVE



Fig. A.1.1 – Aspeto geral antes da construção das plataformas



Fig. A.1.2 – Início da desmatação e remoção de vedações



Fig. A.1.3 – Aspeto adiantado de uma das plataformas

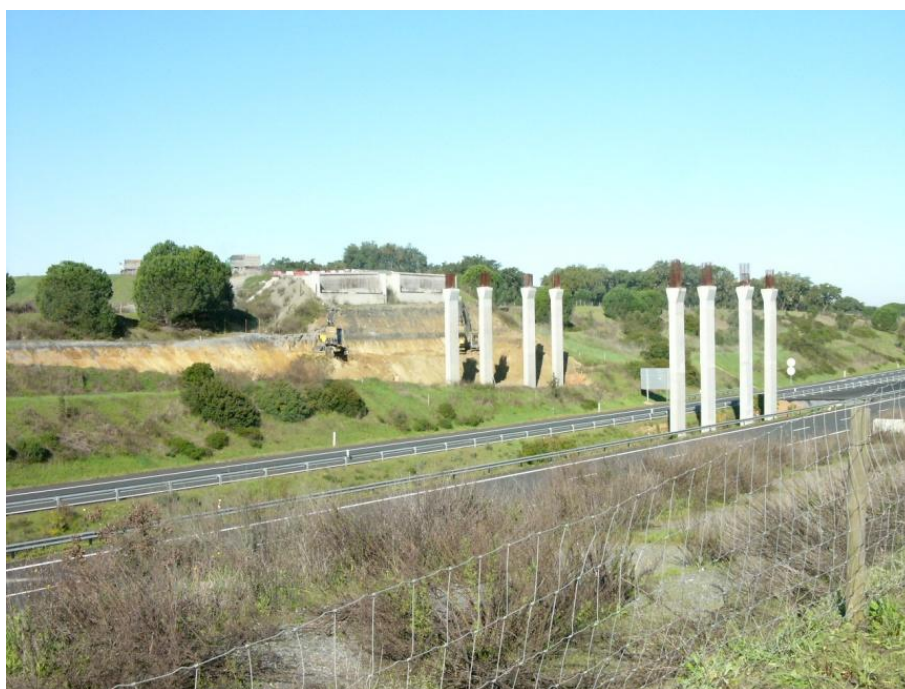


Fig. A.1.4 – Vista geral da plataforma



Fig. A.1.5 – Extração frontal de terras e carga no camião para transporte



Fig. A.1.6 – Aspeto do local de vazadouro



Fig. A.1.7 – Extração frontal de terras e carga no camião para transporte



Fig. A.1.8 – Nivelamento do fundo de caixa da plataforma



Fig. A.1.9 – Colocação do geotêxtil sobre o fundo de caixa



Fig. A.1.10 – Aspeto após colocação da primeira camada de agregado britado



Fig. A.1.11 – Início do espalhamento da segunda camada de agregado britado



Fig.A.1.12 – Gruas em operação

A2 – EXECUÇÃO DE ATERRO TÉCNICO



Fig.A.2.1 – Humidificação da camada antes da compactação



Fig.A.2.2 – Operações de espalhamento e compactação



Fig.A.2.3 – Descarga do material britado para espalhamento



Fig.A.2.4 – Espalhamento com Bulldozer



Fig A.2.5 – Aspeto geral do aterro em construção

A3 – APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM LEITO DE PAVIMENTO (NÓ DE GRÂNDOLA SUL)



Fig.A.3.1 – Aplicação do cimento em pó sobre a PSA



Fig.A.3.2 – Mistura do cimento com o material granular britado



Fig. A.3.3 – Nivelamento da camada tratada pelo cimento



Fig. A.3.4 – Verificação da quantidade de cimento depositada por m²

A3 – APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM LEITO DE PAVIMENTO (NÓ DE LIGAÇÃO COM O IP8)



Fig. A.3.5 – Aspeto da superfície da Parte Superior do Aterro antes da aplicação do solo-cimento



Fig. A.3.6 – Transferência do cimento do camião cisterna para a espalhadora



Fig. A.3.7– Conjunto cisterna de água, máquina misturadora, cilindro, niveladora



Fig. A.3.8 – Rega de impregnação para impermeabilização do leito do pavimento



Fig. A.3.9 – Aspeto final da Camada do Leito do Pavimento numa das faixas da plataforma

A3 – EXECUÇÃO DE CAMADA DE BASE GRANULAR (NÓ DE LIGAÇÃO COM O IP8)



Fig.A.3.10 – Nivelamento das camadas granulares



Fig. A.3.11 – Processo de varrimento da camada de base



Fig.A.3.12 – Aplicação de rega de colagem por impregnação betuminosa de rotura lenta



Fig.A.3.13 – Aspeto final da camada de base após rega de colagem

ANEXO B - ANÁLISE DE UMA AMOSTRA DE SOLO



RELATÓRIO DE ENSAIO

LNEC E 239 (1970)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLOS

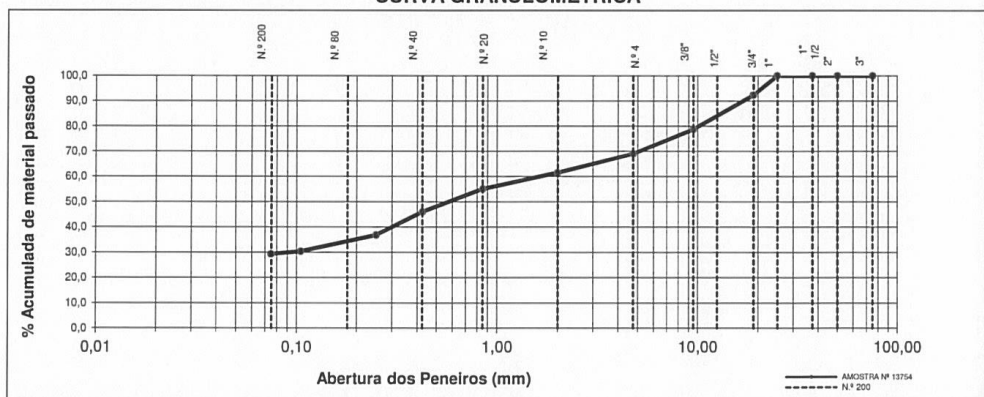
Material: Areia Argilosa AMOSTRA Nº 13754
 Origem: Stock 1 Data da Colheita: 22/mar/17
 Local da Colheita: Obra

EMPREITADA Obra 1988 - Lanço A+BCLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

P ₁ (amostra seca inicial) [±0,1g]	1333,0	P ₃ = P ₁ -P ₂ [±0,1g] (perda de peso na lavagem)	388,4
P ₂ (amostra seca após lavagem) [±0,1g]	944,6		

Peneiro A.S.T.M.	Malha [mm]	Peso retido	% Retida	% Acumulada passada
3"	75,00		0,0	100,0
2"	50,00		0,0	100,0
1" 1/2	37,50		0,0	100,0
1"	25,00		0,0	100,0
3/4"	19,00	103,3	7,8	92,2
3/8"	9,50	180,4	13,5	78,7
N.º 4	4,75	128,1	9,6	69,1
N.º 10	2,00	99,9	7,5	61,6
N.º 20	0,850	85,9	6,4	55,1
N.º 40	0,425	122,1	9,2	46,0
N.º 60	0,250	122,5	9,2	36,8
N.º 140	0,105	85,4	6,4	30,4
N.º 200	0,075	14,6	1,1	29,3
Fundo	< 0,075	1,6	0,1	
Fundo+P ₃		390,00	29,3	
Total		1332,1	100	

CURVA GRANULOMETRICA



EQUIPAMENTOS UTILIZADOS (Tipo / refª interna)

Balança digital - L1640 ; Estufa - L1636 ; série de peneiros N.º2 ASTM.

Observações: Material proveniente de escavação nos taludes da A2 junto do VI 00.01.

Ensaado por [Signature] Validado por: Nuno Fernandes
 Data: 28/mar/17 Data: 06/abr/17

I.DT.01/2

1/1

**RELATÓRIO DE ENSAIO**

NP 143 (1969)

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Material: Areia Argilosa

AMOSTRA Nº 13754

Origem: Stock 1

Data da Colheita: 22/mar/17

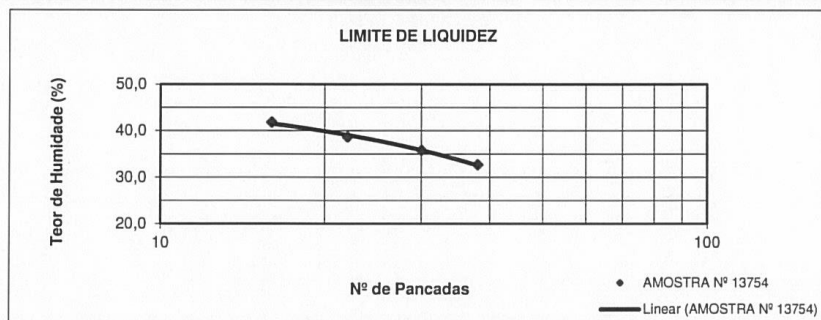
Local da Colheita: Obra

EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

Limite de liquidez

Nº DE ENSAIO		1	2	3	
m ₁	Massa do recipiente [0,025g]	7,230	8,250	8,610	7,960
m ₂	Massa recipiente + provete húmido [0,025g]	31,180	29,410	35,510	34,180
m ₃	Massa recipiente + provete seco [0,025g]	24,110	23,510	28,420	27,720
w	Teor de humidade [0,1%]	41,9	38,7	35,8	32,7
N.º DE PANCADAS		16	22	30	38

**LL - LIMITE DE LIQUEZ [1%] 37****Limite de plasticidade**

Nº DE ENSAIO		1	2	3	4
m ₁	Massa do recipiente [0,025g]	16,220	17,610	18,550	17,190
m ₂	Massa recipiente + provete húmido [0,025g]	20,130	19,880	21,460	19,610
m ₃	Massa recipiente + provete seco [0,025g]	19,670	19,610	21,120	19,330
w	Teor de humidade [0,1%]	13,3	13,5	13,2	13,1

LP - LIMITE DE PLASTICIDADE [1%] 13**Índice de plasticidade****LL - LP [1%] 24****EQUIPAMENTOS UTILIZADOS (Tipo / Refª interna)**

--

Observações: Material proveniente de escavação nos taludes da A2 (junto da VI 00.01).

Ensaiado por: (3123)

Validado por: Nuno Fernandes

Data: 04/abr/17

Data: 06/04/2017



RELATÓRIO DE ENSAIO

LNEC E-197 (1966)

ENSAIO PROCTOR MODIFICADO

Material: Areia Argilosa

AMOSTRA Nº 13754

Origem: Stock 1

Data da Colheita: 22/03/2017

Local da Colheita: Obra

EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

Tipo de compactação:

☒ Compactação pesada☒ Molde grande☐ Compactação ligeira☐ Molde pequeno

	1	2	3	4	5	
$m_{\text{molde vazio}}$ [1g]	4839	4839	4839	4839	4839	
$m_{\text{molde+solo}}$ húmido [1g]	8953	9325	9462	9310	9256	
V_{molde} [1cm³]	2068	2068	2068	2068	2068	

Determinação do teor em água (W) segundo a NP84

QUANTIDADE MÍNIMA PARA ENSAIO	Mais de 80% passa no peneiro 2,38mm	30g
	Mais de 80% passa no peneiro 19,1mm mas não passa no 2,38mm	300g
	Mais de 80% passa no peneiro 38,1mm mas não passa no 19,1mm	2000g

m_1 - massa recipiente ; m_2 - massa recipiente + provete húmido ; m_3 - massa recipiente + provete seco
 [°] se $m < 50g$, [0,01g]; se $m = 50$ a $200g$, [0,025g]; se $m = 200$ a $1000g$, [0,1g]; se $m > 1000g$, [1g].

	1	2	3	4	5	
m_1 [°]	214,8	274,3	321,8	217,9	325,6	
m_2 [°]	922,6	1243,2	1147,5	805,6	941,3	
m_3 [°]	862,3	1146,2	1051,7	727,6	851,2	
W [0,1%]	9,3	11,1	13,1	15,3	17,1	
Média						

Bar. Húmida [0,01g/cm³]	1,99	2,17	2,24	2,16	2,14	
Bar. Seca [0,01g/cm³]	1,82	1,95	1,98	1,88	1,82	

Observações:

Material proveniente da escavação de taludes da A2 (junto da VI 00.01).

Ensaado por:

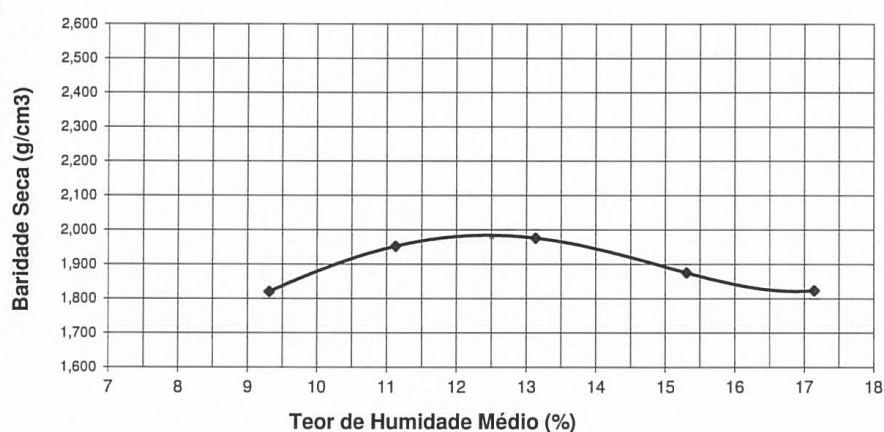
Validado por: Nuno Fernandes

Data: 29/mar/17

Data: 06/04/2017

**RELATÓRIO DE ENSAIO**

LNEC E-197 (1966)

ENSAIO PROCTOR MODIFICADOMaterial: Areia ArgilosaAMOSTRA Nº 13754Origem: Stock 1Data da Colheita: 22/03/2017Local da Colheita: ObraEMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+BCLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE**Curva de Compactação**

Baridade máxima seca	[0,01g/cm ³]	1,980
Teor de humidade ótimo	[0,1%]	12,5

EQUIPAMENTO UTILIZADO (Tipo / refª interna)

--

Observações:

Material proveniente de escavação de taludes da A2 (junto da VI 00.01).

Ensaiado por:

Validado por: Nuno Fernandes

Data: 29/mar/17

Data: 06/04/2017



RELATÓRIO DE ENSAIO

LNEC E 198 (1967)

ENSAIO CALIFORNIANO DE CAPACIDADE DE CARGA - CBR

Material:	Areia Argilosa	AMOSTRA Nº	13754
Origem:	Stock 1	Data da Colheita:	22/mar/17
		Local da Colheita:	Obra

EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA				
N.º do Molde		1	2	3
N. de PANCADAS/CAMADAS		12	25	55
Altura do solo no molde	h	114	114	114
Volume do molde	v	2068	2068	2068
Peso molde vazio	p1	7525,3	8019,2	8001,5
Peso molde+ solo hum.	p2	11786,2	12422,5	12529,8
Peso solo hum.	p3=p2-p1	4260,9	4403,3	4528,3
Baridade Húmida	Bh=p3/v	2,060	2,129	2,190
Teor de Humidade	W	13,5	13,4	15,9
Baridade seca	Bs=Bh*100/(100+W)	1,815	1,878	1,890
Baridade seca máx.	dmax	1,980	1,980	1,980
Grau de Compactação	(Bs/dmax.)*100	91,7	94,9	95,5

EMBEBIÇÃO DA AMOSTRA				
N.º do Molde		1	2	3
Leitura do deflect. No 1º dia	(0,01mm)	1,48	1,16	1,15
Leitura do deflect. No 2º dia	(0,01mm)	2,32	1,95	1,85
Leitura do deflect. No 3º dia	(0,01mm)	2,35	2,02	1,9
Leitura do deflect. No 4º dia	(0,01mm)	2,35	2,02	1,9
Expansão máxima	(0,01mm)	Ah	2,35	2,02
Expansão específica	(0,1%)	e=(Ah/h)*100	2,06	1,77
Peso molde+solo após emb.	(g)	p'2	11985,3	12645,5
Peso da água absorvida	(g)	ma=p'2-p2	199,1	223
Peso do solo após emb.	(g)	p'3=p'2-p1	4460	4626,3
Bar. Húmida após emb.	(0,001gcm-3)	Y'h=p'3/v	2,157	2,237
Teor humidade após emb.	(0,1%)	W'	16,6	15,9
Bar. Seca após emb.	(0,001gcm-3)	B's=(100*Y'h)/(W'+100)	1,849	1,931
Grau de compactação	(%)	(B's/dmax.)*100	93,4	97,5

TEOR DE HUMIDADE						
N.º do Molde	1		2		3	
W- Moldagem; W'-Após emb.	W	W'	W	W'	W	W'
N.º da Cápsula	3	8	6	15	1	2
Peso Cápsula	(m1)	241,3	319,2	416,5	400,1	344,8
Peso Cáps.+solo hum.	(m2)	841,5	942,6	1042,6	947,3	1124,2
Peso Cáps.+Solo seco	(m3)	770,1	853,7	968,8	872,4	1031,1
Peso Solo seco	(ms=m3-m1)	528,8	534,5	552,3	472,3	686,3
Peso água	(ma=m2-m3)	71,4	88,9	73,8	74,9	93,1
Teor de Humidade	W=(ma/ms)*100	13,5	16,6	13,4	15,9	13,6

**RELATÓRIO DE ENSAIO**

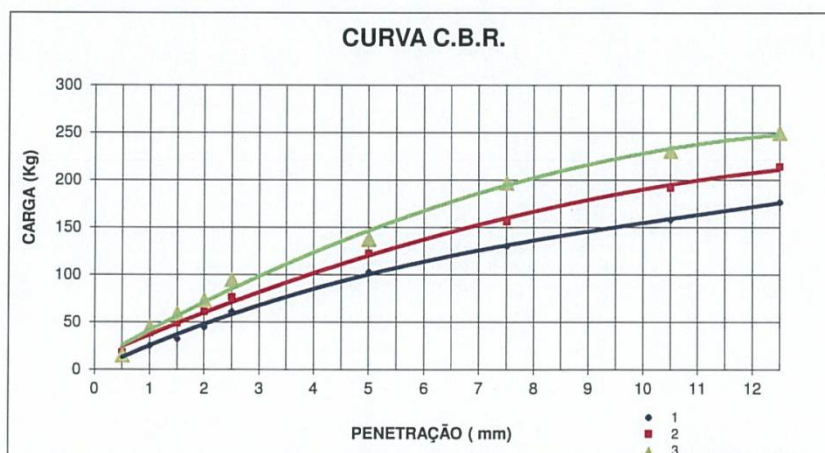
LNEC E 198 (1967)

ENSAIO CALIFORNIANO DE CAPACIDADE DE CARGA - CBR

Material: Areia Argilosa AMOSTRA Nº 13754
 Origem: Stock 1 Data da Colheita: 22/mar/17
 Local da Colheita: Obra

EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+BCLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE

Constante do Anel	102	PENETRAÇÃO						
	N.º do Molde	1		2		3		Fz (Kg)
	mm	0,01 mm	Kg	0,01mm	Kg	0,01mm	Kg	
Penetração de 0,5 mm	0,5	0,16	16	0,18	18	0,15	15	370
Penetração de 1 mm	1	0,25	26	0,38	39	0,44	45	629
Penetração de 1,5 mm	1,5	0,32	33	0,48	49	0,58	59	903
Penetração de 2,0 mm	2	0,44	45	0,60	61	0,72	73	1129
Penetração de 2,5 mm	2,5	0,60	61	0,75	77	0,93	95	1355
Penetração de 5,0 mm	5	1,01	103	1,20	122	1,35	138	2033
Penetração de 7,5 mm	7,5	1,28	131	1,53	156	1,93	197	2575
Penetração de 10,5 mm	10,5	1,55	158	1,88	192	2,26	231	3177
Penetração de 12,5 mm	12,5	1,73	176	2,10	214	2,45	250	3388



N.º DO MOLDE		1	2	3	Média (%)
PENETRAÇÃO A 2,5 mm (%)	$100 \times (f_{2,5} / F_{z2,5})$	4,5	5,6	7,0	5
PENETRAÇÃO A 5,0 mm (%)	$100 \times (f_{5,0} / F_{z5,0})$	5,1	6,0	6,8	6



RELATÓRIO DE ENSAIO

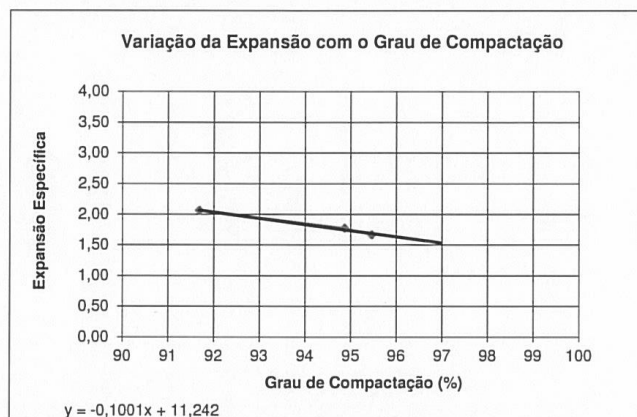
LNEC E 198 (1967)

ENSAIO CALIFORNIANO DE CAPACIDADE DE CARGA - CBR

Material: Areia Argilosa AMOSTRA Nº 13754
 Origem: Stock 1 Data da Colheita: 22/mar/17
 Local da Colheita: Obra

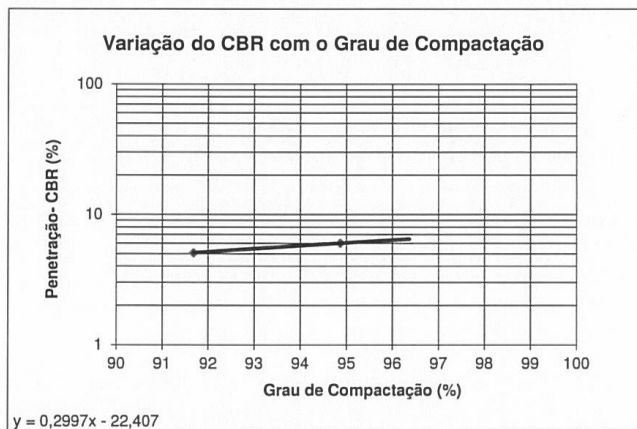
EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: Rodovias do Baixo Alentejo, ACE



Expansão (%)

1,8



CBR (%)

6

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS (Tipo / refª Interna)

Observações: Material proveniente de escavação nos taludes da A2 junto do VI 00.01.

Ensaio por: [Assinatura] (7123)
 Data: 05/abr/17

Validado por: Nuno Fernandes
 Data: 06/04/2017

ANEXO C – RESULTADOS DE UM ENSAIO DE CARGA COM PLACA

ANEXO D – ELEMENTOS DE ESTUDO DE UM SOLO-CIMENTO

CEM II/B-L 32,5N

Cimento Portland de Calcário



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Cibra-Pataias
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg
Sacos de 25kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0130, 0856-CPD-0131 e 0856-CPD-0132.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

65% a 79% Clínquer Portland
21% a 35% Calcário
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N é o cimento mais utilizado nas obras de construção civil. A sua excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no especialmente adaptado a todos os trabalhos correntes da construção.

O cimento CEM II/B-L 32,5N é principalmente utilizado em:

- argamassas e betão não armado para enchimentos e regularização;
- betão estrutural, pronto ou fabricado em obra de média resistência;
- argamassas de assentamento, reboco e reparação;
- fundações directas e indirectas em ambientes moderadamente agressivos;
- estabilização de solos e solo-cimento;
- prefabricação de blocos, tubos, manilhas e outros artefactos à base de cimento;
- prefabricação ligeira em regime de baixa rotatividade de moldes.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência.

Desenvolvimento mais lento de resistências (menor resistência inicial).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

Este cimento melhora a trabalhabilidade de betões e argamassas e permite uma redução da dosagem de água de amassadura. Porém, o correcto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura pelo qual deverão ser tomadas precauções para evitar a dissecação de peças betonadas muito expostas ao sol e ao vento (possível fendilhação).

Não se recomenda a utilização deste cimento em tempo muito frio, sem que se tomem medidas adequadas.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

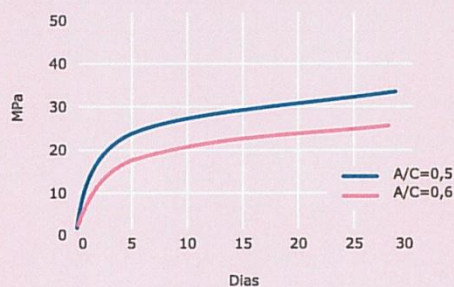
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5	

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM II/B-L 32,5N



Habituação a custos controlados.
Quinta da Cabrinha, Lisboa.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt



RELATÓRIO DE ESTUDO
LEITO DE PAVIMENTO EM SOLO-CIMENTO

Referência: RE.15.117
Edição: 1
Data: 31-7-2015
Página: ---

Obra 1988 – Sub-concessão da Auto-Estrada do Baixo Alentejo, Lanço A+B

ANEXO 2 - Ensaios sobre os materiais a tratar

Este Documento contém informação confidencial não podendo ser copiado ou de outro modo divulgado sem autorização prévia da Tecnovia, SA.



RELATÓRIO DE ENSAIO

LNEC E 239 (1970)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLOS

Material: Areia Mal Graduada Siltsosa

AMOSTRA Nº 10130

Origem: Zona de Corte antes do Viaduto

Data da Colheita: 8/abr/15

Local da Colheita: Obra

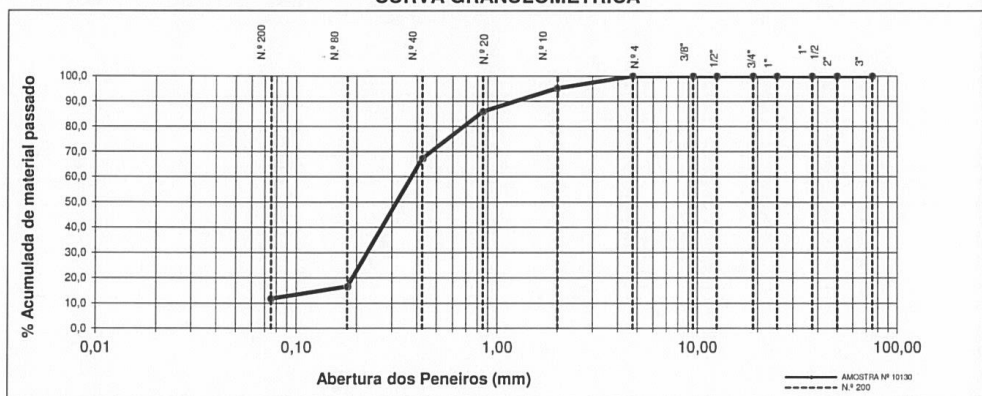
EMPREITADA Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: RBA ACE

P ₁ (amostra seca inicial) [±0,1g]	819,3	P ₃ = P ₁ -P ₂ [±0,1g]	95,8
P ₂ (amostra seca após lavagem) [±0,1g]	723,5	(perda de peso na lavagem)	

Peneiro A.S.T.M.	Malha [mm]	Peso retido	% Retida	% Acumulada passada
3"	75,00		0,0	100,0
2"	50,00		0,0	100,0
1" 1/2	37,50		0,0	100,0
1"	25,00		0,0	100,0
3/4"	19,00		0,0	100,0
1/2"	12,50		0,0	100,0
3/8"	9,50		0,0	100,0
N.º 4	4,75		0,0	100,0
N.º 10	2,000	39,5	4,8	95,2
N.º 20	0,850	75,6	9,2	85,9
N.º 40	0,425	152,6	18,6	67,3
N.º 80	0,180	415,5	50,7	16,6
N.º 200	0,075	39,7	4,8	11,7
Fundo	< 0,075	0,4	0,0	
Fundo+P ₃		96,20	11,7	
Total		819,1	100	

CURVA GRANULOMETRICA



EQUIPAMENTOS UTILIZADOS (Tipo / refª interna)

Balança digital - L1640 ; Estufa - L1636 ; série de peneiros Nº2 ASTM.

Observações:

Ensayado por *[assinatura]*

Validado por: Nuno Fernandes

Data: 13/abr/15

Data: 30/abr/15



RELATÓRIO DE ENSAIO

NP 143 (1969)

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Material: Areia Mal Graduada Siltosa
 Origem: Zona de Corte antes do Viaduto

AMOSTRA Nº 10130
 Data da Colheita: 8/abr/15
 Local da Colheita: Obra

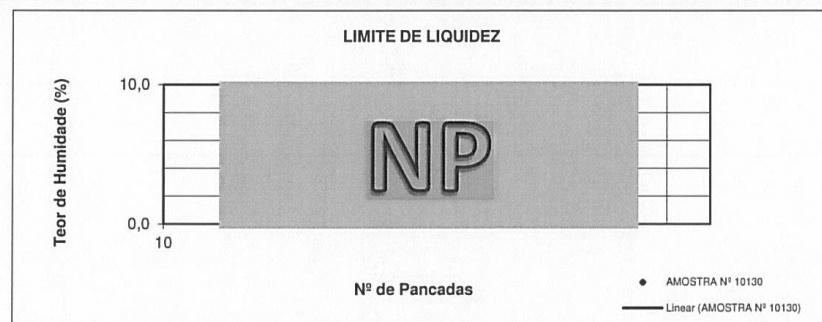
EMPREITADA: Obra 1988 - Lanço A+B

CLIENTE: RBA ACE

Limite de liquidez

Nº DE ENSAIO	
m ₁	Massa do recipiente [0,025g]
m ₂	Massa recipiente + provete húmido [0,025g]
m ₃	Massa recipiente + provete seco [0,025g]
w	Teor de humidade [0,1%]
N.º DE PANCADAS	

NP



LL - LIMITE DE LIQUIDEZ [1%]

Limite de plasticidade

Nº DE ENSAIO	
m ₁	Massa do recipiente [0,025g]
m ₂	Massa recipiente + provete húmido [0,025g]
m ₃	Massa recipiente + provete seco [0,025g]
w	Teor de humidade [0,1%]

NP

LP - LIMITE DE PLASTICIDADE [1%]

0

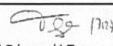
Índice de plasticidade

LL - LP [1%]

0

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS (Tipo / Refª interna)

Observações:

Ensayado por:  (703)
 Data: 13/mar/15

Validado por: Nuno Fernandes
 Data: 30/abr/15