

TERRAPLENAGEM. METODOLOGIA E TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO

SIMÃO PEDRO TAVARES RIBEIRO

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

Orientador: Professor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e apadrinharam a realização do curso de Engenharia Civil.

À Patrícia.

Ao meu Orientador, Professor Jaime Queirós Ribeiro por todo o conhecimento que me transmitiu, pelo seu apoio, e pela sua disponibilidade.

Ao meu amigo Filipe, que sempre se disponibilizou para me ajudar com os dados informáticos.

Ao Professor Matos Fernandes, por todos conhecimentos que me transmitiu nas disciplinas de Mecânica dos Solos do 4º ano de Engenharia Civil da FEUP.

Ao Professor Adalberto França, por todos os conhecimentos que me transmitiu nas disciplinas de Vias de Comunicação, e a todos os Professores da secção de Vias de Comunicação da FEUP.

Ao meu amigo Pedro Barros, com quem partilhei muitas vezes o local de trabalho e a todos os meus colegas que de alguma forma directa ou indirecta me ajudaram.

RESUMO

Numa obra de terraplenagem, a compactação desempenha uma operação de importante relevo. Neste trabalho de fim de curso, considera-se oportuno abordar a metodologia e as técnicas de compactação com vista ao cálculo de rendimento e custos de forma sistematizada.

No documento, apresentam-se as classificações de solos utilizadas, por norma, em Portugal e as condições de aplicação do material em aterro, com a abordagem dos ensaios e controlo a efectuar neste tipo de obra. A compactação de solos por camadas só é possível com tecnologia de equipamentos, devidamente caracterizados ao longo do texto. Analisam-se os custos de equipamento e os métodos correspondentes empregues pelos principais fabricantes de equipamento pesado para terraplenagem. O rendimento é calculado com recurso ao regulamento francês LCPC/SETRA. Para o cálculo do rendimento e custos, desenvolve-se um programa para computador.

PALAVRAS-CHAVE: Terraplenagem, Classificação de solos, Compactação, Equipamento, Custos.

ABSTRACT

In earthwork, the compaction plays an important relief operation. In this end of degree project, is considered opportune to approach the methodology and the techniques of compacting with sight to the calculation of production and costs with a systemized method.

In the document are presented the soil classification usually used in Portugal and the material conditions application in highway fill, with the assays boarding and the control to be made in this type of works. Soil compacting by layers is only possible with equipment technology, properly characterized throughout the text. There are analyzed the equipment costs and the correspondent methodology used by the main equipment constructors of heavy equipment for earthworks. The production is calculated using the French norm LCPC/SETRA. To calculate the production and cost, a program for computer is developed.

KEYWORDS: Earthwork, Soil classification, Compaction, Equipment, Costs.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	xi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiii

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	1
1.2. ÂMBITO, MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO DO PROJECTO	5
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARA ATERRO	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO	7
2.2.1. ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO EM ESTUDOS PRÉVIOS	7
2.2.2. ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO EM PROJECTO DE EXECUÇÃO	9
2.3. TIPOS DE MATERIAL PARA ATERRO E LEITO DE PAVIMENTO. CLASSIFICAÇÕES	11
2.3.1. CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS AMERICANAS ASTM E AASHO	12
2.3.2. CLASSIFICAÇÃO ESPANHOLA MOPU	13
2.3.3. CLASSIFICAÇÃO FRANCESA LCPC/SETRA.....	15
2.2.3.1. Classificação de Solos	15
2.2.3.2. Classificação de Materiais Rochosos	20
2.2.3.3. Classificação de Solos Orgânicos e SubProdutos Industriais	21
2.3.4. CLASSIFICAÇÃO EM PORTUGAL.....	22
2.3.4.1. Especificações LNEC.....	22
2.3.4.2. Caderno de Encargos BRISA (1996)	22
2.3.4.2. Caderno de Encargos EP	23
2.4. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DE MATERIAL EM ATERRO E LEITO DE PAVIMENTO. EXECUÇÃO	23
2.4.1. RECOMENDAÇÕES LCPC/SETRA.....	25
2.3.1.1. Aterro	25

2.3.1.2. Leito Pavimento	27
2.4.2. ESPECIFICAÇÕES LNEC.....	28
2.4.3. CADERNO ENCARGOS EP.....	29
2.4.3.1. Aterro	29
2.4.3.2. Leito de Pavimento	30

3. COMPACTAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

3.2. CONSIDERAÇÕES DA TEORIA DA COMPACTAÇÃO.....

3.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

3.4. EQUIPAMENTO.....

3.4.1. TIPOS DE CILINDROS

3.4.2. CILINDRO PÉS DE CARNEIRO

3.4.3. CILINDRO DE PNEUS.....

3.4.4. CILINDRO VIBRADOR ROLO LISO

3.4.5. CILINDRO DE IMPACTO.....

3.4.6. SELECÇÃO DE EQUIPAMENTO

3.4.7. TRATAMENTO TEOR HUMIDADE. EQUIPAMENTO

3.4.7.1. Teor de Humidade inferior ao Óptimo

3.4.7.1. Teor de Humidade superior ao Óptimo

3.5. CONSIDERAÇÕES COMPACTAÇÃO SEGUNDO CADERNO ENCARGOS EP

3.6. CLASSIFICAÇÃO LCPC/SETRA.....

3.6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS. TABELAS LCPC/SETRA

3.6.2. CILINDRO COMPACTADOR DE PNEUS

3.6.3. CILINDRO COMPACTADOR VIBRADOR LISO

3.6.4. CILINDRO COMPACTADOR VIBRADOR PÉS DE CARNEIRO.....

3.6.5. CILINDRO COMPACTADOR ESTÁTICO PÉS DE CARNEIRO

3.6.6. PLACA VIBRATÓRIA

4. CONTROLO DE OBRA. ENSAIOS.....

4.1. CONTROLO DE OBRA EM LEITO DE PAVIMENTO E ATERROS DE SOLOS

4.2. CONTROLO DE OBRA EM ENROCAMENTOS E SEMI ENROCAMENTOS.....

4.3. NORMAS EUROPEIAS (EN).....

4.3.1. NORMAS EN DE MATERIAL PARA ATERRO	64
4.3.2. NORMAS EN DE MATERIAL PARA ENROCAMENTO E SEMI ENROCAMENTO	65
4.4. CONTROLO DA COMPACTAÇÃO	66
4.4.1. DETERMINAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA	67
4.4.2. PESO VOLÚMICO SECO IN SITU	68
 5. CUSTOS	 71
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	71
5.2. OS CUSTOS	71
5.2.1. CUSTOS DE PROPRIEDADE	71
5.2.2. CUSTOS DE OPERAÇÃO	73
5.2.2. CUSTOS DE MANUTENÇÃO	74
5.2.3. CUSTOS INDIRECTOS	74
5.2.4. CUSTO UNITÁRIO DE UM SERVIÇO DE TERRAPLENAGEM	74
5.3. CUSTO PELO MANUAL DE PRODUÇÃO CATERPILLAR	75
5.3.1. CUSTO PROPRIEDADE	75
5.3.2. CUSTO OPERAÇÃO	77
5.4. CUSTO PELO MANUAL DE MOVIMENTO DE TERRA VOLVO	79
 6. SOFTWARE SOFTCOMPACT 1.0	 83
6.1. CONCEPÇÃO DO PROGRAMA	83
6.2. MÓDULOS DE CONSULTA	84
6.3. MÓDULOS DE CÁLCULO	85
6.3.1. MÓDULO CLASSIFICAÇÃO DE COMPACTADORES	85
6.3.2. MÓDULO COMPACTAÇÃO DE ATERRO	86
6.3.3. MÓDULO CÁLCULO DE OBRA	88
6.3.4. EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO CÁLCULO OBRA	91
6.4. APRECIÇÕES FINAIS	93
 7. CONCLUSÕES FINAIS. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	 95

BIBLIOGRAFIA.....

ANEXO 1 – TABELAS CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS LCPC/SETRA..

ANEXO 2 – LNEC E240.....

ANEXO 3 – MAPA CUSTO SOFTCOMPACT 1.0.....

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Plataformas tipo Babilónia e Império Romano [1].....	2
Fig.2 – Plataformas tipo Século XVIII [1]	3
Fig.3 – Classificação Unificada de Solos (ASTM D2487-85) [6].....	13
Fig.4 – Estrutura do Regulamento LCPC/SETRA.....	15
Fig.5 – Estados Hídricos dos Materiais considerado pelo LCPC/SETRA	17
Fig.6 – Classificação de Solos LCPC/SETRA para Dimensão Máxima ≤ 50 mm	18
Fig.7 – Classificação de Solos LCPC/SETRA para Dimensão Máxima > 50 mm	18
Fig.8 – Esquema com partes de estrutura de aterro.....	24
Fig.9 – Curva de Compactação – Peso Volúmico máximo ($\gamma_{d\ max}$) - Teor de Humidade Óptimo (Wop)	34
Fig.10 – Teoria de Hogentogler (adaptado)	34
Fig.11 – Teoria de Lambe [14]	35
Fig.12– Curva de compactação num solo para diferentes energias aplicadas [15].	38
Fig.13 – Curva de compactação de solos diferentes compactados com a mesma energia [15].	39
Fig.14 – Cilindro Misto (Rolo Liso – Pneus) [17].....	41
Fig.15 – ‘Tamping Roller’ [18]	42
Fig.16 – Cilindro Pés de Carneiro Hamm 3411P [19].....	43
Fig.17 – Cilindro de Pneus [20].....	43
Fig.18– Cilindro em modo Vibratório [21]	44
Fig. 19 – Efeito de um cilindro vibrador no solo [22].	44
Fig.20 – Forças a actuar no rolo de um Cilindro	45
Vibratório [22].	45
Fig.21 – Frequência de Vibração Óptima - Máxima Densidade [23].	46
Fig.22 – Cilindro Vibrador Rolo Liso Volvo SD122D [24].....	47
Fig.23 – Modo Vibratório [25]	47
Fig.24 – Modo Oscilatório [25]	48
Fig.25 – Efeito da Vibrador e Oscilador num Cilindro [25].....	48
Fig.26 – Efeito da Vibrador e Oscilador num Cilindro [26].....	49
Fig.27 - Cilindro de Impacto [27]	49
Fig.28 – Esquema de compactação por camadas [30].....	50
Fig. 29 – Zonas aplicação Tipo Equipamento – Tipo Material	51
Fig.30 – Camião cisterna, aplicação água [31].	53
Fig.31 – Esquema funcionamento de um misturador - escarificador (adaptado) [32].	54

Fig.32 – Estabilizador -misturador de solo BOMAG [27].	54
Fig.33 – Variação do peso volúmico seco – espessura da camada	56
Fig.34 – Placa Vibradora Bomag BPR 100/80 D [41]	60
Fig. 35 – Equipamento Ensaio Speedy [34]	67
Fig.36 Ensaio Garrafa de Areia [34]	68
Fig.37 Gamadensímetro (adaptado) [35].	68
Fig.38 Método de depreciação utilizado por 600 grandes empresas mundiais.	72
Fig.39 – Caterpillar 815F [18]	77
Fig.40 - Janela Principal software SOFCOMPACT 1.0	84
Fig.41 - Janela para Classificação de Materiais segundo LCPC/SETRA	85
Fig.42 Janela para Classificação de Cilindros LCPC/SETRA	86
Fig.43 Cálculo da Compactação de Aterro	87
Fig.44 - Processamento de dados módulo Cálculo de aterro	88
Fig.45 - Manutenção de Frota	89
Fig.46 - Processamento de dados módulo Cálculo Obra	91
Fig.47 - Dados Introduzidos para cálculo de compactação.	92
Fig.48 - Janela com resultados intermédios.	92

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Características granulométricas dos tipos de material	12
Quadro 2 – Classificação de Solos pela Regulamentação Espanhola MOPU	14
Quadro 3 – Classificação de Solos Finos pelo LCPC/SETRA.....	19
Quadro 4 – Classificação de Materiais Rochosos LCPC/SETRA.....	20
Quadro 5 – Classificação de Solos Orgânicos e Sub-Produtos Industriais LCPC/SETRA	21
Quadro 6 – Classificação de Solos CE BRISA	22
Quadro 7 – Condições a serem impostas para Utilização de Solos em Aterro	26
Quadro 8 – Condições a serem impostas para Utilização de Solos em Leito de Pavimento.....	27
Quadro 9 – Utilização de solos em aterro CE do EP	29
Quadro 10 – Fuso material granular não britado para L.P. segundo o C.E do EP.....	30
Quadro 11 – Fuso do material granular britado segundo EP	32
Quadro 12 – Quadro indicativo das características dos Ensaio Proctor	37
Quadro 13 – Valores médios de Peso Volúmico Seco e Teor de humidade óptimo em diferentes tipos de Solo (adaptado) [16]	39
Quadro 14 – Classificação de Cilindros de Pneus LCPC/SETRA.....	58
Quadro 15 – Classificação de Cilindros Vibradores Rolo Liso LCPC/SETRA.....	58
Quadro 16 – Classificação de Cilindros Vibradores Pés de Carneiro LCPC/SETRA.....	59
Quadro 17 – Classificação de Cilindros Estáticos Pés de Carneiro LCPC/SETRA	59
Quadro 18 – Classificação de Placas Vibratórias LCPC/SETRA	60
Quadro 19 – Ensaio para que se verifiquem condições execução em aterro	61
Quadro 20 – Controlo de execução do aterro	62
Quadro 21 – Ensaio para que se verifiquem condições execução de Enrocamento	63
Quadro 22 – Normas EN de material para aterro	64
Quadro 23 – Normas EN de material para enrocamento	65
Quadro 24 – Classificação tempo vida útil equipamento em função zona aplicação [29].....	75
Quadro 25 – Quadro Indicativo do consumo médio horário modelo Caterpillar 815F [29].	78
Quadro 26 – Relação tempo de depreciação – custos de manutenção, pela Volvo.....	79
Quadro 27 – Factor correctivo para o tempo de depreciação em função das condições, segundo Volvo.....	80
Quadro 28 – Quadro de cálculo para custo de equipamento.	81

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ALT – Índice de Alterabilidade

BRISA – Concessionária de Autoestradas em Portugal.

CE – Caderno de Encargos

DG – Coeficiente de Degrabilidade

Dmax – Diâmetro máximo

EP – Estradas de Portugal

FR – Índice de Fragmentabilidade

GC – Grau de Compactação

IP – Índice de Plasticidade

IPI- Índice de Capacidade de Suporte Imediata

LA – percentagem de desgaste na Máquina de *Los Angeles*

LCPC/SETRA – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LP – Leito de Pavimento

MDE – *Micro Deval* na presença de água

MO – Matéria Orgânica

NaCl – Cloreto de Sódio

PIA – Parte Inferior de Aterro

PSA – Parte Superior de Aterro

RTR – Recommendation por les Terrassements Routier

VBS – Valor do azul de metileno

Wn – Teor de Humidade Natural

Wopt – Teor de Humidade Óptimo Proctor Normal

WL – Limite liquidez

γ – Peso Volúmico

γ_d – Peso Volúmico Seco

ρ_d – Massa Volúmica da Rocha Desidratada no lugar

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A compactação de solos cedo foi utilizada para melhorar as propriedades do solo em contacto com a água e possibilitar a circulação sobre os caminhos percorridos por tráfego animal e pedestre. Embora os construtores de estrada da época não compreendessem os princípios da mecânica dos solos, souberam intuitivamente e empiricamente que, se fosse aplicada uma carga pesada ao solo estática ou dinamicamente, as suas características melhoravam e era possível construir caminhos mecanicamente mais estáveis, e que cumprissem a sua função de traficabilidade.

Um dos primeiros casos conhecidos da compactação data de antes de 3500 AC. Nessa época o povo Inca que habitava na América do Sul, construiu uma rede extensiva de estradas que foi inteiramente construída com o recurso ao trabalho humano. Onde se localiza hoje o México foi encontrado um rolo de pedra com cerca de 5 toneladas e 65 cm de diâmetro que se julga ser tido utilizado pelos Incas para comprimir os caminhos na época, que já incluíam passagens pavimentadas em terra e de pedra.

Durante esse período de tempo na Europa e no Médio Oriente, as estradas não eram mais do que caminhos consistentes, compactados com recurso à passagem repetida dos animais e pelo tráfego pedestre, de modo a criar caminhos mais estáveis. Pode dizer-se, na actual terminologia de construção de estradas que existia pouco mais do que decapagem e escavação; no entanto com o advento da roda por volta do ano 3500 AC e o aumento da circulação de carroças e animais se ditou a necessidade da construção de estradas melhoradas.

Muitos anos mais tarde, na Babilónia entre 2000, AC e 1500 AC, as estradas começam a ser construídas com blocos de pedra fabricados à medida e colocados em diferentes camadas; acredita-se que estes blocos estariam apenas pousados sem a utilização de qualquer ligante.

Mas o maior avanço na construção de estradas dá-se entre os anos 500 AC e 500 DC com o épico povo romano. Nessa altura inicia-se a construção de uma extensiva rede de estradas devidamente projectadas e correctamente construídas na Europa. Estas estradas foram construídas com propósitos militares e estratégicos com o fim de controlar a extensa área geográfica do poderoso império romano. A estrutura do pavimento utilizado tem algumas semelhanças com a dos Babilónios, mas com algumas diferenças que demonstram um grande espírito inovador e um enorme contributo para a construção de estradas. Os Romanos usaram uma mistura de solo argiloso e siltoso como almofada entre a fundação em blocos de pedra e a camada superficial também em blocos de pedra, (figura 1). Acredita-se que utilizaram algum método de compactação na camada intermédia constituída por solo. Por outro lado é nesta época que se desenvolve o conceito de movimento de terras numa obra rodoviária com a construção de estradas em directrizes que permitissem a compensação de terras da escavação para aterro e a preocupação com a drenagem através da implantação de superfícies inclinadas com a rasante colocada acima do terreno natural.

Relata-se que os Romanos compactavam a camada de subsolo subjacente à primeira camada de blocos de pedra com recurso a rolos pesados de arrasto para que se criasse uma fundação firme e que permitisse a colocação dos blocos de pedra na configuração horizontal. Era também habitual no caso

da camada de solo intermédia designada (actualmente) de leito de pavimento ser de má qualidade, a colocação de toros de madeira de modo para tornar a camada superficial de blocos mais resistente e menos deformável.

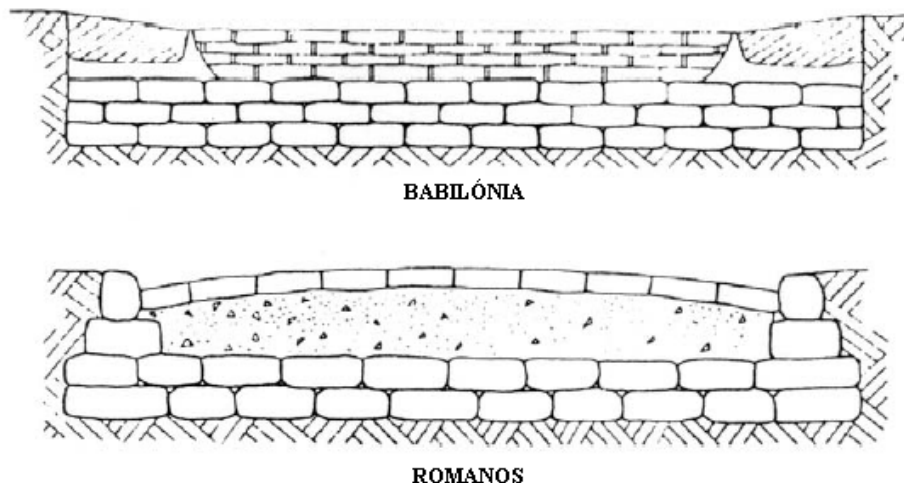


Fig.1 – Plataformas tipo Babilónia e Império Romano [1]

Com o colapso do império Romano o comércio e as viagens, rapidamente, começaram a diminuir. A rede de estradas construídas começou a deteriorar-se, e durante toda a idade média praticamente não existiu actividade de construção de estradas.

Depois da época medieval houve um rejuvenescer da construção de estradas resultado do crescimento do comércio, no entanto em pequena escala e limitado a zonas de mercados e estradas urbanas.

No século XVIII surge a necessidade da construção de estradas interurbanas e vários graduados desenvolvem novas plataformas para a construção de estradas. Surge em França o ‘Corps des Ponts et Chaussess’ com os soldados a serem treinados para o desenvolvimento de infraestruturas, dando origem, anos mais tarde, a uma divisão civil, a ‘Ecole des Ponts et Chaussess’. Especialista nesta escola Pirre-Marie Tresaguet (1716-1796) desenvolve uma estrutura de pavimento com base na experiência Romana idealizando uma plataforma com uma sub base constituída em material rochoso, figura 2.

Na mesma altura, na Escócia e na Inglaterra, Thomas Telford (1757-1834) e John Metcalf (1717-1810) respectivamente aplicam filosofias de projecto similares na Grã Bretanha. As soluções eram caras e difíceis de executar devido á elevada quantidade de material rochoso e às suas dimensões.

Foi também nesta época na Escócia que John Louden McAdam (1756-1836) efectuou uma grande descoberta. Segundo a sua teoria não era necessária a utilização de material rochoso de grandes dimensões nas camadas acima da fundação quando existisse uma camada densa de partículas de pequena dimensão que permitisse um atrito interpartículas. Provavelmente sem perceber porque é estas camadas se tornavam tão rígidas, MacAdam usou o princípio de bloqueio entre partículas para criar rigidez e o aumento de densidade. O aumento da densidade e o bloqueio entre partículas foi

conseguido com a inovadora técnica de primeiro espalhar o agregado grosseiro e depois preencher os vazios com material fino, figura 2.

Com este processo consegue-se reduzir significativamente o custo de estradas, e diminuir a espessura das camadas na estrutura de pavimento, sem a necessidade de utilização de material rochoso de grandes dimensões que nem sempre era abundante. Devido ao seu custo reduzido os organismos públicos na Grã Bretanha adoptaram este tipo de construção, ao que se seguiram muitos outros países.

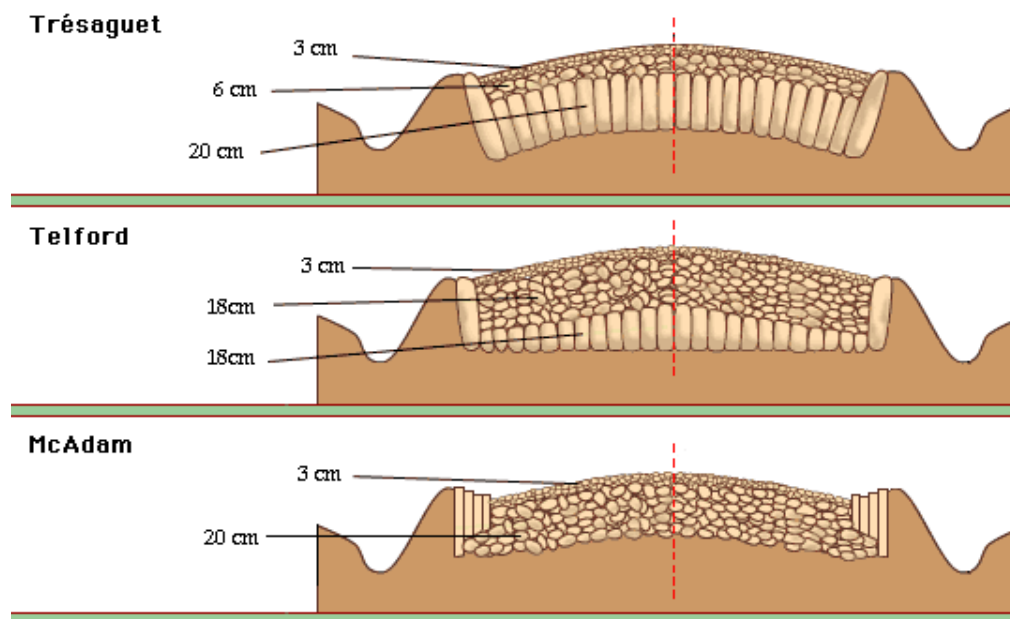


Fig.2 – Plataformas tipo Século XVIII [1]

Com a concepção dos modelos de plataforma referidos iniciou-se em paralelo o desenvolvimento de novas técnicas de compactação. Nos anos 30 do século XIX surgem em França os primeiros rolos puxados a cavalo para a compactação de estradas. Anos mais tarde, e com o desenvolvimento das máquinas a vapor, surge em 1860 o ‘StreamRoller’, causando um impacto significativo na compactação de aterros rodoviários.

O desenvolvimento das técnicas de compactação deve-se também a outros tipos de construção, como a construção de represas, o que na terminologia actual não é mais do que uma pequena barragem em aterro. De facto, estes trabalhos foram pioneiros para a compreensão das propriedades da mecânica dos solos, uma vez que se pretendia reter a água a montante da estrutura e era necessário garantir a sua estabilidade e impermeabilidade.

No início do século XIX utilizava-se em Inglaterra o gado bovino e ovino para comprimir as estruturas de represa. Esta aplicação conduziu ao desenvolvimento, daquilo que hoje designamos como cilindro pés de carneiro. Os primeiros cilindros deste tipo eram constituídos por parafusos no rolo para que a pressão de contacto como o solo fosse maior. O cilindro pés de carneiro acabaria por ser patenteado nos Estados Unidos no ano 1906. Cedo se compreendeu que eram eficazes a comprimir materiais coesivos, evitando a formação de lâminas de solo por onde a água pudesse escoar. O cilindro de pés de

carneiro começa assim a ser utilizado na construção de estradas, especialmente em aterros e leito de pavimento.

No princípio do século XX inicia-se o grande desenvolvimento do equipamento para compactação. Em 1920 os cilindros pés de carneiro foram desenvolvidos para um tamanho, actualmente designado de leve e com o peso variando entre as 2.7 e as 4.5 toneladas a que correspondia a pressão de contacto no solo entre os 414 e 690 KPa. Foi também neste período que se começaram a construir os primeiros cilindros lisos propulsionados com um motor de combustão interna, com pesos a atingirem 30 toneladas.

Em 1930 surgem os primeiros cilindros com rolo de pneus, para comprimirem camadas finas e para compactação final de superfícies pré comprimidas, o seu peso variava entre as 6 e 8 toneladas.

Os cilindros pés de carneiro actuais, pesados, foram desenvolvidos nos anos 30 para utilização em aterros rodoviários e barragens de aterro. O cilindro da época tinha uma massa de aproximadamente 14 toneladas e pressões de contacto à volta de 2100 a 4100 KPa. Os próximos desenvolvimentos deste tipo de cilindros iria abranger principalmente a forma de pé do rolo, o seu tamanho e a mecânica da unidade propulsora.

A consolidação com recurso a técnicas de compactação vibratórias e dinâmicas foi desenvolvida na Alemanha durante os anos 30. Um equipamento autopropulsionado tipo de lagartas com uma placa de vibração com peso de 25 toneladas foi concebido em 1933 antes da Segunda Guerra Mundial.

Durante o decorrer deste conflito a tecnologia que era exigida na construção de pavimentos para aeródromos levou ao desenvolvimento e à utilização em massa de equipamentos pesados. No período 1943-1944 o Corpo de Engenheiros do exército Americano (U.S. Army) concebeu diversos cilindros de pneus equipados com 24 unidades capazes de exercerem carregamentos até 100 toneladas.

Os primeiros cilindros automotores e tractores rebocados foram construídos durante os anos 40. Depois da Segunda Guerra Mundial o desenvolvimento mais significativo nos equipamentos foi no campo da compactação por vibração. Os rolos começaram a ser vulgarmente utilizados e melhoraram a compactação de camadas permitindo um aumento da densidade do material. Inicialmente foram utilizados apenas para a consolidação de solos não coesivos, mas hoje em dia são também utilizados para compactação de materiais coesivos e betuminosos. A carga dinâmica de sucessões repetidas veio permitir o rearranjo das partículas e atingir uma matriz de solo mais densa quando comparada com a compactação estática.

Um outro desenvolvimento interessante após a Segunda Guerra Mundial foi o do rolo de impacto. Estes equipamentos foram construídos com rolos não circulares com um elevado peso, que permitia a consolidação das camadas subjacente recorrendo a uma elevada energia.

A compactação de solos surgiu como uma forma intuitiva para melhorar as propriedades do solo, e tornou-se, ao longo do século XX e na actualidade, consequência do aumento do tráfego e das cargas por eixo um importante objecto de estudo, porque é um dos factores mais importantes que intervêm no desempenho do pavimento de uma estrada.

A par do desenvolvimento dos cilindros compactadores desenvolveu-se o estudo da mecânica dos solos. Diversos organismos e investigadores interessados no apoio ao desenvolvimento da construção de estradas e respectiva manutenção trabalharam para a concepção de documentos, classificações e teorias algumas delas ainda utilizadas na actualidade e abordadas nos diversos capítulos deste projecto.

1.2. ÂMBITO, MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO DO PROJECTO.

O presente trabalho pretende ser um contributo para o Projecto de Terraplenagens e na execução da respectiva obra. A construção de uma obra de terraplenagens inclui inúmeros trabalhos, como a escarificação, carga, transporte, descarga, espalhamento, nivelamento, compactação entre outros e integram o seu projecto diversas peças escritas e desenhadas. Neste trabalho procura-se estudar uma tarefa específica, a Compactação.

A compactação não pode ser vista como uma tarefa simples, devendo ser devidamente articulada com o cálculo de volumes de escavação e aterro, e distribuição de terras. No cálculo dos movimentos de terra deve ser calculada a produção de escavação, transporte, colocação do material e nivelamento para que a compactação se possa desenrolar sem paragens ou atrasos. Neste trabalho procura-se sempre considerar este factor, de modo a que se obtenha uma compactação com qualidade e sem atrasos.

Procura abordar-se as diferentes metodologias e características relativas ao tema da compactação. O LCPC/SETRA serviu como o principal regulamento de base na execução deste trabalho, visto possuir um estudo vasto na área da compactação de aterros. No que diz respeito à produção o a referência principal, foi o Manual de Produção da Caterpillar com a sua vasta informação sobre as características dos equipamentos.

Dentro desta perspectiva foram efectuadas outras pesquisas bibliográficas sobre os assuntos relacionados com o tema, com o objectivo de:

- Caracterizar os solos;
- Definir o equipamento a utilizar;
- Calcular os rendimentos e custos.

Ambiciona-se que o cálculo de uma obra de compactação se efectue de um modo rápido, conciso e sistemático e sem indeterminações. Para que tal aconteça utilizou-se uma ferramenta própria idealizando e desenvolvendo um programa para computador, a ser utilizado em ambiente Windows.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos que se passam a descrever:

- Capítulo 1, *Introdução*, que corresponde a este mesmo capítulo e que pretende enquadrar a compactação no contexto actual, apresentando nomeadamente um resumo da evolução da compactação na construção de aterros rodoviários assim como definir os objectivos e motivos que levaram à realização deste trabalho;
- Capítulo 2, *Caracterização do material para aterro*, onde se aborda o estudo geológico e geotécnico e as classificações de solos e material rochoso para aterro
- Capítulo 3, *Compactação*, onde se apresenta a teoria da compactação, correlacionada com as características do solo compactado e o equipamento utilizado.
- Capítulo 4, *Controlo de Obra. Ensaio*, onde se efectua uma síntese dos procedimentos a ter no controlo de uma obra de compactação e os respectivos ensaios.
- Capítulo 5, *Custos*, onde se efectua a análise do custo de equipamento, e o cálculo proposto por duas marcas de equipamentos.

- Capítulo 6, *Software* SOFTCOMPACT 1.0, onde se descreve o desenvolvimento de um programa de computador, com base no LCPC/SETRA, destinado a calcular uma obra de compactação.
- Capítulo 7, *Conclusões finais e propostas de trabalhos futuros*, que apresenta um conjunto de conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, e onde se propõem alguns possíveis trabalhos a efectuar no futuro.

2

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARA ATERRO

2.1. INTRODUÇÃO

Este Capítulo tem como objectivo analisar as principais classificações de solos a nível internacional e nacional, aplicáveis a obras de terraplenagem. Em bom rigor, grande parte das obras em Portugal segue a caracterização de materiais descrita em dois Cadernos Encargos Tipo, o do EP e da BRISA, os quais se baseiam em algumas das classificações a seguir apresentadas. Considera-se assim pertinente, apresentar de forma breve e concisa, os tipos de materiais, a utilização aplicável, e problemas inerentes.

Na construção de um aterro podem ser utilizados os melhores meios de produção, equipamentos, mão-de-obra, mas se o material não for bem caracterizado, não existir uma colocação adequada na parte de aterro correspondente, uma preocupação para o caso de intempéries (caracterização de parâmetros de natureza, nomeadamente o estado hídrico), teremos com toda a certeza problemas de execução e prazos, por dificuldade de circulação em obra, e tarefas extraordinárias, existindo a agravante de surgirem problemas posteriores à construção bastante graves como assentamentos e roturas no aterro. Em analogia, será o mesmo que dizer que é necessário conhecer o “ingrediente” principal com a máxima precisão, neste caso o solo, ou material rochoso para saber quando e como o devemos aplicar. Nesse sentido, o material deve ser caracterizado correctamente, antes da sua extracção e após esta. Daí a importância do Estudo Geológico e Geotécnico, que funciona como a porta de entrada para um projecto de terraplenagens.

2.2. ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

Devido à importância que este estudo tem no projecto de terraplenagens, constituindo o seu ponto de partida, efectuar-se-á referência neste subcapítulo às prescrições relativas ao Estudo Geológico Geotécnico do CE do EP.

O Estudo Geológico Geotécnico inicia-se na fase de Estudo Prévio, com o objectivo de fixar o traçado, e prolonga-se na fase de Projecto de Execução para definir com mais precisão a sequência de trabalhos para a solução adoptada. Na altura da elaboração dos perfis transversais, o Estudo Geológico Geotécnico deverá ter sido adiantado pelo menos a ponto de permitir conhecer as inclinações dos taludes de escavação e de aterro [2].

2.2.1. ESTUDO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO EM ESTUDOS PRÉVIOS

O estudo nesta fase deve incluir os seguintes elementos:

- Memória descritiva e justificativa;
- Planta geológica;
- Perfil geotécnico interpretativo, longitudinal;

- Dados da prospecção geotécnica e dos ensaios laboratoriais;

A Memória Descritiva e Justificativa deve caracterizar todas as situações geológicas e geotécnicas das várias alternativas, de modo a que seja possível fundamentar a escolha de um traçado.

A planta geológica deve conter todos os elementos de natureza geológica e geotécnica, incluindo os aspectos da geomorfologia, estrutura e tectónica das zonas em estudo. Deve ser elaborada à mesma escala dos outros estudos geométricos do Estudo Prévio.

O perfil geotécnico interpretativo, longitudinal, deve representar todas as unidades geológicas na zona abrangida pela rasante ou fundação dos aterros e obras de arte. Deve-se esboçar um zonamento dos maciços, principalmente nas zonas a escavar, de forma a justificar a geometria dos taludes, técnicas de escavação e leito de pavimento.

A prospecção geotécnica deve ser prevista e organizada, pelo que se deve reunir o maior número de informação possível para o local, como sejam:

- Cartas geológicas e notas explicativas, de forma a conhecer eventuais falhas e dobras;
- Cartas geográficas e topográficas a grande escala;
- Estudo da fotografia aérea;
- Cartas de risco geotécnico como movimentos de terra pré-existentes ou historial do comportamento sísmico;
- Recolha bibliográfica sobre estudos feitos no local;
- Cartas de jazidas de materiais para empréstimo, cartas agrícolas e planos urbanísticos;
- Visita ao terreno.

A prospecção geotécnica deve ser realizada, caracterizando o cenário geológico e geotécnico para cada uma das alternativas, de modo a que seja possível fundamentar a escolha de um traçado. Em conjunto com o reconhecimento de superfície das áreas abrangidas pelo traçado, deve permitir caracterizar os seguintes aspectos:

- Caracterização detalhada dos pontos singulares (zonas instáveis, inundáveis, de solos compressíveis, com falhas ou outras características com mau comportamento geotécnico). Em casos particulares como os referidos poderá ser necessário recorrer a prospecção geotécnica especial, de forma a encontrar soluções e custos;
- Caracterização das formações e zonas aquíferas;
- Localização de potenciais zonas de empréstimo, quando se preveja um desequilíbrio nos volumes de movimentação de terras;
- Quantificação e descrição dos materiais de pavimentação com maior probabilidade de aplicação;
- Definição aproximada do tipo e profundidade das fundações das obras de arte.

Nesta fase de estudo devem ser privilegiados os métodos de prospecção geofísica, pois constituem os ensaios mais económicos, rápidos e que permitem cobrir uma zona mais ampla. Com a correcta localização para a execução das sondagens é possível reduzir o número de sondagens e assim diminuir o custo dos trabalhos de prospecção. Poderá ser necessário recorrer a um tipo de sondagens diferente

do habitualmente utilizado em pontos singulares para situações particulares, requeridas pelo Projectista quando a fiabilidade não é suficiente.

O plano de prospecção geológica e geotécnica e de ensaios laboratoriais contempla:

- Prospecção geofísica, como sísmica e eléctrica;
- Prospecção mecânica como trados, poços, sondagens à rotação ou percussão.
- Ensaios *in situ*, como pressiómetro, penetrómetros, ou molinete;
- Ensaios laboratoriais, para identificação e classificação de solo e auxílio na caracterização mecânica;
- Estudo dos recursos locais em zonas de empréstimo e de depósito, para futura utilização em aterro e leito de pavimento;
- Estudo do regime hidrogeológico, com a colocação de piezómetros, caso seja necessário.

Os ensaios laboratoriais atrás referidos são particularmente importantes para situações, como:

- Aterros sobre solos compressíveis;
- Escavações e aterros de grande altura, particularmente em zonas instáveis;
- Definir as inclinações a dar aos taludes de escavação no aterro. Neste ultimo caso é obrigatório considerar os materiais a reutilizar da obra ou de empréstimo;
- Zonas instáveis, onde é necessário tomarem-se medidas correctivas.

Nesta fase, como se descreveu anteriormente, pretende-se de forma sucinta fundamentar a escolha de um traçado, caracterizando os possíveis movimentos de material possíveis de forma grosseira, e especificando situações particulares, como as atrás descritas e avaliar as características da fundação em presumíveis locais de implantação das obras de arte. Esta avaliação de situações particulares, em que é necessário recorrer a um programa de ensaios laboratoriais mais profundo pretende quantificar os acréscimos de custos, que acarreta uma alternativa sobre outras.

2.2.2. ESTUDO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO EM PROJECTO DE EXECUÇÃO

Este estudo surge no seguimento da fase anterior e segue a mesma filosofia ainda que agora com mais detalhe, uma vez que já foi escolhida a rasante. Deverá incluir:

- Planta com a implantação da geologia à escala conveniente (1:1000 ou 1:2000);
- Perfil geológico geotécnico interpretativo à escala da planta;
- Resultados da prospecção geotécnica, como sejam sondagens, ensaios *in situ* e de laboratório;
- Relatório interpretativo.

A planta geológica deverá definir de forma precisa, a delimitação e caracterização das unidades estratigráficas existentes, incluindo os aspectos relativos à geomorfologia, estrutura e tectónica. Deverá ser elaborada à mesma escala do Projecto Geométrico, 1:1000 ou 1:2000, ou em escalas superiores quando confrontados com situações complexas.

O perfil geológico geotécnico interpretativo, longitudinal, deve permitir uma correcta interpretação das singularidades geológicas e geotécnicas ao longo da rasante, na fundação de aterros e obras de arte. Em geral, o perfil deverá abranger uma profundidade de dois metros na rasante no caso de

escavação e dois metros no terreno natural no caso de aterro e em situações particulares, como no caso de fundações de obras de arte a uma profundidade que se justifique. Se estivermos perante solos moles ou má qualidade e houver necessidade de tratamento da fundação deve ser fornecida a informação geotécnica e delimitada a zona a tratar ou a sanear. Em escavações em rocha, deverá ser referido o zonamento do maciço e a possibilidade de uso de explosivos ou exclusivamente de meios mecânicos.

A prospecção geotécnica, deve ser articulada de modo a permitir a correcta caracterização da zona de influência com o menor volume de recursos possível, dando resposta às seguintes questões:

- Dimensionamento da geometria dos taludes de escavação e de aterro. Devem ser justificadas as inclinações de taludes diferentes de 1/1,5 (V/H), particularmente inclinações superiores em escavação e inferiores em aterro. A inclinação dos taludes de escavação em maciços rochosos, de média e boa qualidade, quando não seja provável ocorrerem roturas globais, deve atender a outro tipo de roturas, à altura dos cortes, à ocupação e ao enquadramento paisagístico principalmente no caso de inclinações muito elevadas e condições hidrológicas difíceis. A análise de volumes a transportar pode condicionar a geometria dos taludes a adoptar e a topografia do terreno;
- Dimensionamento das redes de drenagem interna e externa, longitudinal e transversal, com o objectivo de assegurar as melhores condições de estabilidade dos taludes de escavação, de aterro e do pavimento;
- Definição da espessura da terra vegetal, de decapagem e de saneamento;
- Definição e caracterização de eventuais obras de estabilização de fundação de aterros e de taludes de escavação;
- Avaliação da dificuldade de escavação, para a quantificação dos volumes a escavar com meios mecânicos ou com recurso a explosivos;
- Caracterização geotécnica e mecânica dos materiais a aplicar no leito de pavimento, e terraplanagem, com indicação da sua localização e potencialidades, quer para os materiais produzidos na linha e quer para os provenientes de áreas de empréstimo;
- Definição dos materiais a sanear e caracterização das áreas para depósito e tratamento ambiental a dar;
- Caracterização das condições de fundação das obras de arte, com a definição do tipo de fundação, cota ou profundidade e deformabilidade prevista. A profundidade prevista das sondagens deve ultrapassar, no mínimo, uma profundidade de dois metros relativamente à cota inferior da fundação;
- Definição das classes de solos mais representativas, sendo efectuados ensaios de caracterização e de compactação para esses solos. Para os solos de fundação devem ser realizados ensaios CBR de modo a definir a capacidade de suporte. Em solos muito sensíveis à água, devem apresentar-se, pelo menos, dois ensaios executados com o mesmo número de pancadas, sendo um compactado com o teor em água óptimo e o outro com um teor em água superior em 25% ao óptimo determinado pelo ensaio de compactação. Em solos finos devem ser efectuados ensaios de compactação leve e pesada, de modo a definir as melhores condições de colocação em obra.

Os trabalhos mais comuns, no programa de prospecção geológica geotécnica e ensaios, são os seguintes:

- Medições Geofísicas
- Sondagens com trado, por poço, rotação e percussão
- Poços ou valas em zonas rochosas para avaliação da compartimentação do maciço
- Recolha de amostras intactas
- Ensaios *in situ*, como penetração dinâmica SPT, estática CPT e CPTU, pressiómetros, *Vane Test*, carga em placa.
- Ensaios laboratoriais para determinação das características dos solos, respectiva classificação, proctor, CBR e teor de humidade neutral.
- Ensaios laboratoriais sobre amostras intactas, como ensaio triaxial, de corte directo e edométrico
- Ensaios sobre amostras de rocha, como por exemplo o *Los Angeles*, *Slake Durability Test*, *Point Load Test*
- Análise de águas, e colocação de piezómetros, para o estudo hidrogeológico

O relatório interpretativo, com estrutura de uma Memória Descritiva e Justificativa deve conter a descrição dos estudos realizados e a análise dos resultados e as soluções propostas devidamente justificadas para cada situação geotécnica. Deve incluir os seguintes pontos:

- Geologia do corredor de Projecto, numa faixa de 100 a 200 metros, sendo 50 a 100 metros para cada lado do eixo. Devem ser descritas as unidades estratigráficas ocorrentes como a litologia, estrutura e tectónica. No que diz respeito aos maciços rochosos, devem ser especificados a sua compartimentação, o sistema de fracturas e outras descontinuidades como falhas e o seu estado de alteração;
- Características hidrogeológicas e aspectos hidrogeológicos;
- Zonas geomorfológicas instáveis;
- Clima da região;
- Sismicidade da região;
- Descrição dos trabalhos e prospecção geotécnica realizados;
- Indicação dos ensaios laboratoriais realizados;
- Os solos devem ser classificados com classificações reconhecidamente aceites, nomeadamente **AASHO**, **Unificada** e **LCPC/SETRA**. As rochas devem ser classificadas de acordo com as suas características físico químicas e pela sua possibilidade de reutilização;
- Descrição e caracterização das unidades geotécnicas consideradas.

2.3. TIPOS MATERIAL PARA ATERRO E LEITOS DE PAVIMENTO. CLASSIFICAÇÕES

Os materiais para utilização em aterro, podem ser divididos segundo a granulometria em três tipos: solos, enrocamentos e solo-enrocamento. No quadro 1, mostra-se a classificação adoptada no CE do EP [3].

Quadro 1 – Características granulométricas dos tipos de material

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

A palavra solo tem numerosos significados e conotações para as diferentes classes profissionais que trabalham com este material. Para muitos engenheiros é qualquer material terrestre, excluindo rocha. O solo é composto por grãos de materiais perdidos de diversos tamanhos e formas, material orgânico, água, e gases [4]

Entende-se assim como solo, toda a ocorrência natural de depósitos brandos ou moles, que cobrem um substrato rochoso e que é produzido por desintegração e decomposição física e química de rochas, podendo conter ou não matéria orgânica. Laboratorialmente pode definir-se solo, como o conjunto de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água, sendo os vazios entre as partículas ar e água, separados ou em conjunto.

No presente trabalho não se pretende aprofundar o estudo do uso de material rochoso de grandes dimensões, devendo nestes casos ser avaliado o CE do Dono de Obra e estudadas soluções particulares.

Nos seguintes subcapítulos abordam-se algumas das diferentes classificações existentes, e a sua aplicabilidade no contexto nacional.

2.3.1. CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS AMERICANAS ASTM E AASHO

Nos anos 70 a Federal Highway Administration FHWA iniciou a formulação de critérios de projecto/construção de aterros elaborando um Guia Técnico, composto por várias propostas e recomendações para a sua construção e cuidados a ter na compactação e controlo da mesma.

O primeiro sistema de classificação de solos foi desenvolvido pela U.S. Bureau of Public Roads no ano de 1928, após esta data o sistema sofreu várias actualizações, mas é em 1942 que ganha forma o sistema actual de classificação da AASHO, com um sistema de classificação de solos para utilização em estradas dividido em 8 grupos [5].

A classificação estende-se de A-1 a A-7; em geral os solos com melhores características são classificados de A1 e os mais pobres de A7. Esta classificação será posteriormente estudada no Subcapítulo sobre a Especificação LNEC.

O Professor Arthur Casagrande desenvolveu um sistema de classificação para solos utilizados em aterros de aeródromos e estradas, posteriormente dando origem em 1952 ao designado Sistema Classificação Unificada. O sistema de classificação é baseado nas características de textura para solos com uma percentagem de finos pequena ou onde os finos não afectam o seu comportamento. Está baseado nas características de compressibilidade e plasticidade para solos onde os finos afectam o comportamento.

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

Fig.3 – Classificação Unificada de Solos (ASTM D2487-85) [6]

2.3.2. CLASSIFICAÇÃO ESPANHOLA MOPU

A classificação espanhola MOPU [7], divide a classificação de solos em cinco tipos, Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação de Solos pela Regulamentação Espanhola MOPU

Classificação do Material	Características Granulométricas – peneiros ASTM	Valor limite
Solos Seleccionados	Matéria Orgânica - MO	< 0,2 %
	Sais Solúveis - SS	< 0,2 %
	Dimensão Máxima – D_{max}	≤ 100 mm
	Material passado no peneiro # 0,40	≤ 15 %
	Se não cumpre #40mm $\leq 15\%$	Material passado no peneiro # 2
		≤ 80 %
		Material passado no peneiro # 0,40
		≤ 75 %
		Material passado no peneiro # 0,080
		≤ 25 %
	Limite Liquidez – LL	< 30
	Índice de Plasticidade - IP	< 10
Solos Adequados	Matéria Orgânica - MO	< 1 %
	Sais Solúveis - SS	< 0,2 %
	Dimensão Máxima – D_{max}	≤ 100 mm
	Material passado no peneiro # 2	< 80 %
	Material passado no peneiro # 0,080	< 35 %
	Limite Liquidez – LL	< 40
	Se LL>30 Índice de Plasticidade - IP	>4
Solos Toleráveis	Matéria Orgânica - MO	< 2 %
	Gesso	< 5 %
	Sais Solúveis - SS	< 1 %
	Limite Liquidez – LL	< 65
	Se LL>40 Índice de Plasticidade - IP	> 0,73 (LL-20)
Solos Marginais	Matéria Orgânica - MO	< 2 %
	Inchamento Livre para Proctor Normal	< 2 %
	Limite Liquidez	> 90
	Se LL>90 Índice de Plasticidade - IP	> 0,73 (LL-20)
Solos Inadequados	Os que não se incluam nas classificações anteriores	
	Materiais que contenham ramas ou vegetação	

2.3.3. CLASSIFICAÇÃO FRANCESA LCPC/SETRA

A necessidade de encontrar uma classificação que se adapte à realização de aterros e leito de pavimento, considerando aspectos preponderantes como o estado hídrico dos solos sensíveis à água, o carácter evolutivo de certos materiais rochosos e a dimensão máxima dos elementos maiores que se encontram no Solo levou à criação de um guia. O guia técnico para construção de aterros e leito de pavimento LCPC/SETRA [8] surge assim no seguimento, e em substituição, da classificação do RTR de 1976, com o objectivo de ser um instrumento metodológico para a condução de trabalhos em aterros e leitos de pavimento. O documento encontra-se dividido em quatro pontos principais:

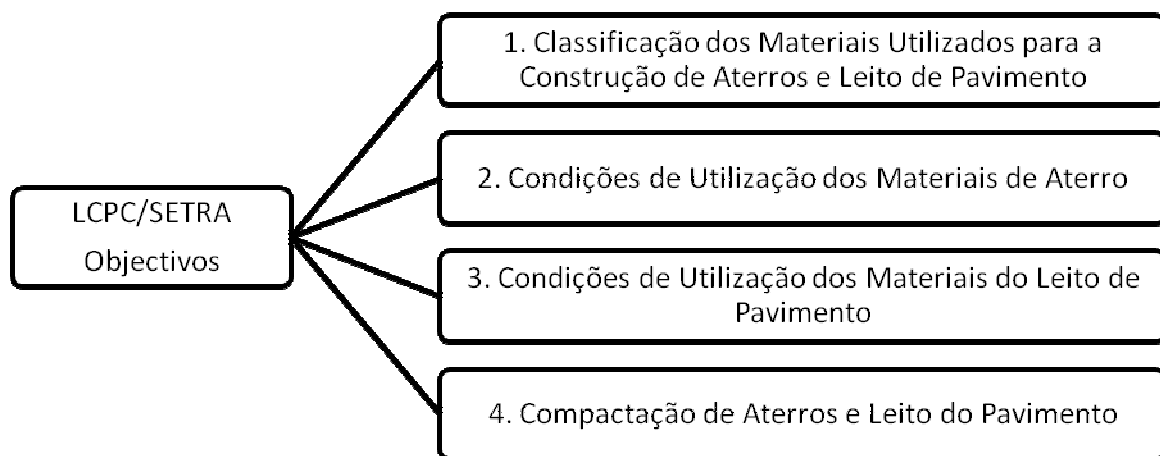


Fig.4 – Estrutura do Regulamento LCPC/SETRA

No presente Capítulo serão analisados os três primeiros pontos, sendo a Compactação estudada em capítulo próprio, (Capítulo 4).

2.3.3.1 Classificação de Solos.

Os parâmetros considerados na Classificação dos Solos agrupam-se em três categorias:

- Parâmetros de Natureza
- Parâmetros de Estado
- Parâmetros de Comportamento Mecânico

PARÂMETROS DE NATUREZA:

Os parâmetros de natureza referem-se às características intrínsecas do solo. No manual são considerados a Granulometria e Argilosidade.

Granulometria

A análise granulométrica, reporta-se ao diâmetro máximo das partículas (D_{max}), e a limites que dividem as classes de solos.

O diâmetro máximo permite avaliar a espessura das camadas elementares e condições para eventual mistura com ligante; por outro lado tem particular interesse para a apreciar os resultados dos ensaios em laboratório.

Os limites considerados pelo LCPC para a divisão granulométrica de solos são os seguintes:

- A dimensão 50 mm, distingue os solos finos e arenosos (com ou sem cascalho) dos solos grossos. No anexo 1 encontram-se as tabelas de classificação de solos onde é possível consultar a classificação de solos correspondente.
- O peneiro de 80 μ m (nº200) que permite distinguir os solos ricos em finos, e de certo modo avaliar a sua sensibilidade à 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;
 - 12%, permite caracterizar a quantidade de finos para materiais arenosos e com cascalho.
- O peneiro de 2mm, é usado para distinguir cascalhos.

Argilosidade

A Argilosidade é avaliada pelo índice de plasticidade (IP) e pelo ensaio do azul de metileno (VBS).

O IP é o parâmetro mais vulgarmente utilizado para caracterizar a quantidade de argila nos solos. Os limites considerados são 12, 25 e 40 e respectivamente, dividem os solos em pouco argilosos, medianamente argilosos, e argilosos ou muito argilosos.

O VBS permite determinar a quantidade e actividade da argila presente no solo e exprime-se em gramas de azul de metileno por 100 gramas de solo. Apresenta 6 limites, que permitem distinguir a plasticidade de solos argilosos e siltosos, e a sensibilidade à água. Os limites são os seguintes:

- 0,1, abaixo deste valor considera-se que o solo é insensível à água;
- 0,2, a partir deste valor o solo começa a manifestar sensibilidade à água;
- 1,5, limite que distingue solos arenosos com argila de solos arenosos com silte;
- 2, limite que distingue solos com siltes muito plásticos de medianamente plásticos;
- 6, limite que distingue solos siltosos de argilosos;
- 8, limite que distingue solos argilosos de muito argilosos.

O VBS é aplicável a todo o tipo de solos. No entanto, para solos medianamente argilosos e muito argilosos, o IP apresenta vantagens, porque é muito mais sensível e por se tratar de um parâmetro não só de identificação mas também de comportamento. Na Classificação de Solos LCPC/SETRA está prevista a utilização destes 2 parâmetros. Em cada caso deverá ser utilizado o que melhor se adapta.

PARÂMETROS DE ESTADO:

Uma das grandes vantagens desta classificação face a outras existentes é considerar o estado hídrico natural. A classificação divide-se em cinco estados, desde muito seco até muito húmido, com a designação (ts), (s), (m), (h), e (th) respectivamente.

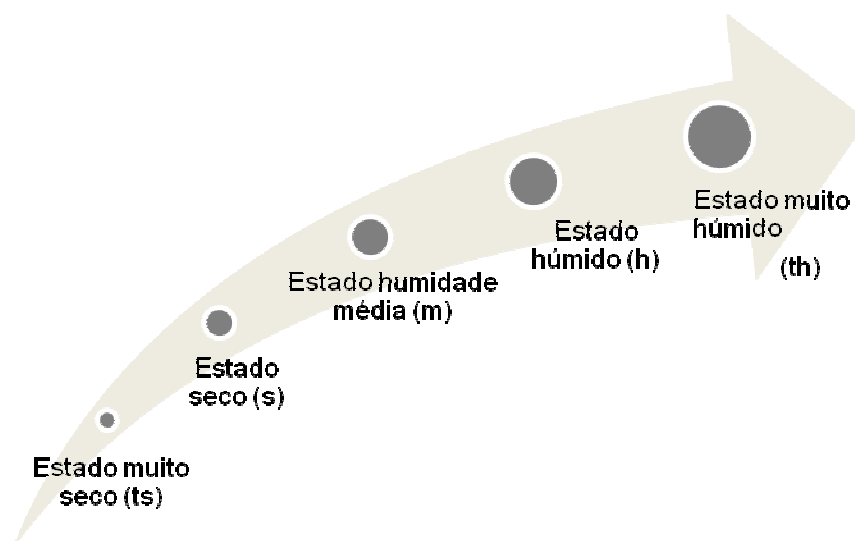


Fig.5 – Estados Hídricos dos Materiais considerado pelo LCPC/SETRA

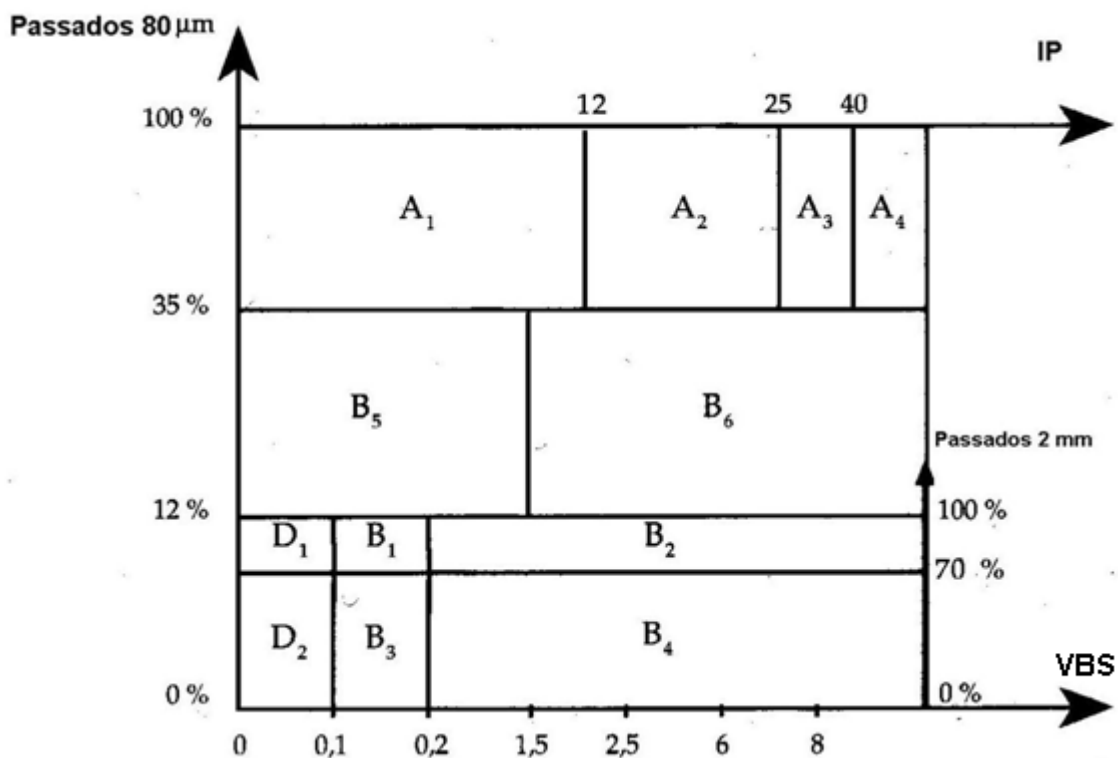
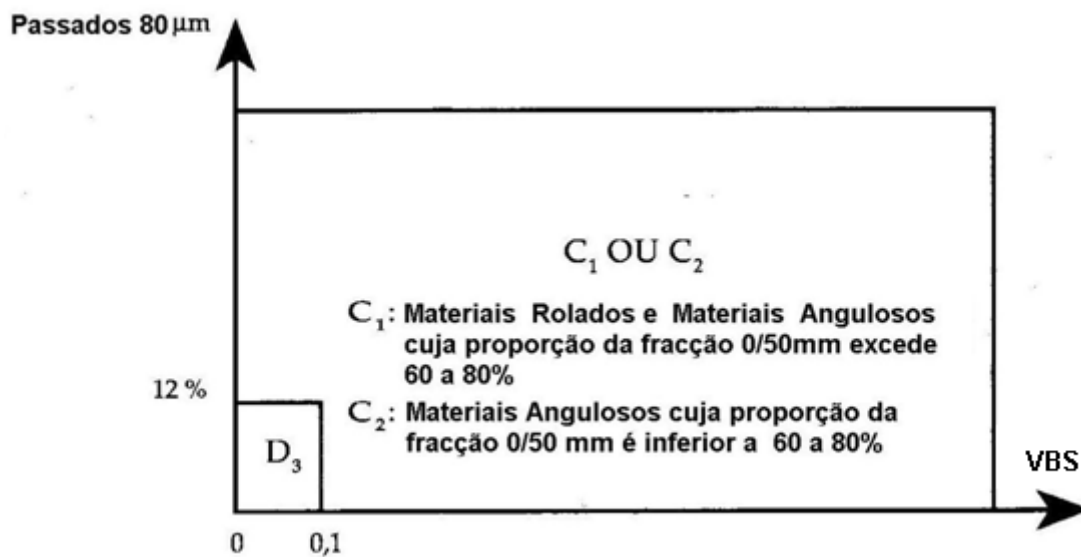
Para caracterizar o estado hídrico são utilizados três parâmetros:

- A posição do teor de humidade natural (W_n) relativamente ao teor óptimo de humidade conseguido no ensaio Proctor Normal (W_{opn});
- A posição do teor de humidade natural relativamente aos limites Atterberg e Índice de consistência;
- O índice de capacidade de suporte imediata IPI, que exprime o valor do CBR imediato.

Para estados secos e muito secos, será mais adequada a utilização do primeiro parâmetro, enquanto para estados húmidos e muito húmidos a utilização do IPI.

O parâmetro referente aos limites de Atterberg poderá ser utilizado para todos os tipos de estados hídricos em solos medianamente finos e muito argilosos, com pelo menos 80 a 90% de elementos $\leq 400 \mu m$.

A classificação em função dos parâmetros descritos encontra-se esquematizada na figura 6 para solos com dimensão máxima $\leq 50 mm$, e na figura 7 para solos com dimensão máxima superior a 50 mm.

Fig.6 – Classificação de Solos LCPC/SETRA para Dimensão Máxima ≤ 50 mmFig.7 – Classificação de Solos LCPC/SETRA para Dimensão Máxima > 50 mm

No quadro 3 mostra-se uma tabela de solos LCPC/SETRA e a disposição utilizada, esta tabela refere-se ao caso de Solos Finos, classificados pelo regulamento como 'CLASSE A', em Anexo encontram-se outros quadros de classificação de solos LCPC SETRA.

Quadro 3 – Classificação de Solos Finos pelo LCPC/SETRA

Classificação segundo a Natureza					Classificação segundo o Estado Hídrico	
Parâmetros de Natureza 1º NIVEL	Classe	Parâmetro de Natureza 2º NIVEL	Subclasse	Características Principais	Parâmetros e Valores Limite	Subclasse
Dmáx (50mm # 80(m > 35 %	A Solos Finos	VBS ≤ 2,5 ou IP ≤ 12	A ₁ Siltes pouco Plásticos Silte Aluvionar Saibros finos Areias pouco plásticas	- Consistência facilmente variável, com fracas variações de Teor em água, quando Wn está próximo de Wopn; - Tempo de reacção curto face às variações das condições hídricas e climáticas; - Permeabilidade pode variar grandes limites conforme Plasticidade, Compacidade e tempo de reacção; - Para Solos Finos pouco Plásticos é preferível identificá-lo pelo valor de VA, já que o valor IP é mais impreciso.	IPI ≤ 3 Wn ≥1,25 Wopn	A ₁ th
			3 < IPI ≤ 8 1,1Wopn≤ Wn < 1,25 Wopn		A ₁ h	
			8 < IPI ≤ 25 0,9 Wopn (Wn < 1,1 Wopn		A ₁ m	
			0,7 Wopn (Wn < 0,9 Wopn		A ₁ s	
			Wn < 0,7 Wopn		A ₁ ts	
		12 < IP ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A ₂ Areias finas argilosas Siltes Argilas Margas pouco plásticas	- Utilizável praticamente por toda a gama de Equipamentos, quando o Teor de Água não é demasiado elevado; - Ip ≥ 12, constitui o melhor critério de identificação.	IPI ≤ 2 IC ≤ 0,9 Wn ≥ 1,3 Wopn	A ₂ th
			2 < IPI ≤ 5 0,9 < IC ≤ 1,05 1,1 Wopn ≤ Wn < 1,3 Wopn		A ₂ h	
			5 < IPI ≤ 15 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 Wopn ≤ Wn < 1,1 Wopn		A ₂ m	
			1,2 < Ic ≤ 1,4 0,7 Wopn ≤ Wn < 0,9 Wopn		A ₂ s	
			Ic > 1,4 Wn < 0,7 Wopn		A ₂ ts	
		15 < IP ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A ₃ Argilas Argilas margosas Siltes (muito plásticos)	- Solos são muito coerentes com teor em água médio e fraco; - Apresentam ligações muito fortes no estado húmido, o que dificulta colocação em obra; - Permeabilidade muito reduzida torna as suas variações de teor em água muito lentas, no local; - Grande variação da consistência para um pequeno aumento do Teor de água.	IPI ≤ 1 IC ≤ 0,8 Wn ≥ 1,4 Wopn	A ₃ th
			1 < IPI (3 0,8 < IC (1 1,2Wopn(Wn<1,4 Wopn		A ₃ h	
			3 < IPI (10 1 < IC (1,15 0,9 Wopn (Wn < 1,2 Wopn		A ₃ m	
			1,15 < Ic (1,3 ou 0,7 Wopn (Wn < 0,9 Wopn		A ₃ s	
			Ic > 1,3 Wn < 0,7 Wopn		A ₃ ts	
		IP > 40 ou VBS > 8	A ₄ Argilas Argilas margosas (muito plásticos)	- Solos muito coerentes, quase impermeáveis; - Mudam o teor em água lentamente e com importantes retracções e deformações; - Normalmente não é aplicado em Aterro nem Leito de Pavimento.	ESTUDO ESPECÍFICO	A ₄ th
			A ₄ h			
			A ₄ m			
			A ₄ s			

2.3.3.2 Classificação de Materiais Rochosos.

Os materiais rochosos são identificados pela sua natureza petrográfica, e caracterizados para a sua utilização em aterros ou leito de pavimento por parâmetros que procuram considerar:

- Aptidão do material em fragmentar-se quando sujeito a solicitações aplicadas que conduzam à produção de elementos finos suficientes para terem um comportamento sensível à água;
- Salvaguardar uma possível evolução após a execução, quando sujeitos a tensões e sob o efeito da água e gelo/degelo;
- O teor de água em materiais muito fragmentáveis, que poderá levar à humedificação de elementos finos produzidos na execução das terraplenagens;
- O teor de elementos solúveis no caso de rochas salinas.

Os parâmetros mais representativos na classificação de materiais rochosos, são os parâmetros de estado e o comportamento mecânico.

Os valores medidos para a caracterização destes parâmetros são o coeficiente *Los Angeles* – LA, o coeficiente *Micro-Deval* na presença de água - MDE, massa volúmica da rocha desidratada no lugar – ρ_d , coeficiente de degradabilidade – DG, teor de humidade natural – Wn, , teor de elementos solúveis. Este tipo de materiais tem a designação de classe na classificação LCPC/SETRA de Classe R.

Quadro 4 – Classificação de Materiais Rochosos LCPC/SETRA

Classificação LCPC/SETRA	Rocha	Família	Natureza petrográfica
R1	Cré	Rochas Carbonatadas	Rochas Sedimentares
R2	Calcários Rochosos Diversos		
R3	Margas Xistos Sedimentares Argilitos	Rochas Argilosas	
R4	Grés “Pudins” “Brechas”	Rochas Siliciosas	
R5	Gesso Sal-gema Anidrite	Rochas Salinas	
R6	Granitos, Basaltos, Antracite, Andesite Gesso, Xistos Metamórficos, Xistos Ardósios		Rochas Magmáticas e Metamórficas

2.3.3.3 Classificação de Solos Orgânicos e SubProdutos Industriais

A presente classificação prevê a utilização de materiais particulares em aterro ou em leito de pavimento, uma vez que são vantajosos do ponto de vista técnico-económico e ambiental

No quadro 5 apresenta-se a classificação adoptada em função da família de materiais e dos parâmetros mais significativos face à sua reutilização.

Quadro 5 – Classificação de Solos Orgânicos e Sub-Produtos Industriais LCPC/SETRA

Classificação LCPC/SETRA	Família de Materiais	Parâmetros significativos face à Reutilização
F1	Materiais Naturais com matérias Orgânicas	Caracterização geotécnica como nos Solos A, B , C Teor MO
F2	Cinzas Volantes Silico-Aluminosas	Relação Wn e Wop IP para Wn
F3	Xistos Carboníferos	Taxa de Combustão Caracterização geotécnica como nos outros materiais
F4	Xistos de minas de Potássio	Teor NaCl Caracterização geotécnica como nos Solos A, B , C
F5	Fosfogesso	Exame de granulometria Teor de Humidade Modo de obtenção com possível neutralização com cal
F6	Escória de Incineração de lixos domésticos	Grau de incineração pela perda ao fogo a 500°C
F7	Materiais de Demolição	Granulometria Presença de elementos indesejáveis como estuques, madeiras, entre outros
F8	Escórias de Alto Forno	Caracterização geotécnica como nos outros materiais
F9	Outros subprodutos	Estudo Específico

2.3.4. CLASSIFICAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, existem um conjunto de documentos de referência, nomeadamente Especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, o Caderno de Encargos da concessionária BRISA, documentos do EP, como sejam o Caderno de Encargos ou Manual de Concepção de Pavimentos para Rede Rodoviária Nacional, que fornecem indicações acerca das características dos materiais a utilizar em aterros e sua classificação.

2.3.4.1 Especificações LNEC

LNEC – E240 - 1970 “Solos. Classificação para Fins Rodoviários”[9] :

Esta Especificação destina-se a classificar os solos e as suas misturas em grupos, com base nos resultados de ensaios de caracterização, análise granulométrica e limites de consistência e atendendo ao seu comportamento em estrada, através da classificação da AASHO [LNEC-E240].

A classificação considera a divisão de material que passa no peneiro de 0,074mm (nº200) ASTM, fazendo a divisão entre solos granulares e solos silto-argilosos para uma percentagem de passados de 35% no peneiro nº200. Efectuam se depois divisões do material em função da granulometria, plasticidade do material, limite liquidez e índice de plasticidade, A classificação fica completa com a determinação do índice de grupo (IG), o qual pode ser determinado usando a fórmula empírica ou os ábacos da referente Especificação. Este índice está compreendido no intervalo 0 a 20, valor que indica a máxima compressibilidade do solo. Em anexo 2 encontra-se quadro LNEC E240.

2.3.4.2 Caderno de Encargos BRISA [10]:

Os solos utilizáveis em aterros encontram se divididos em quatro tipos, solos seleccionados, solos adequados, solos toleráveis e inadequados, todos indicados no quadro 6:

Quadro 6 – Classificação de Solos CE BRISA

Classificação	D _{máx}	#200 ASTM	WL	IP	CBR a 95%
Solos Seleccionados	< 8cm	≤ 12	< 25	< 10	≥ 20
Solos Adequados	< 10 cm	≤ 35	< 40	-	≥ 6
Solos Toleráveis	*	-	≤ 65	<0,6LL - 9	≥3
Inadequados	Não cumprem condições para solos toleráveis				

* Não deverão conter mais de 25% > 15cm

2.3.4.3 Caderno de Encargos EP

Este CE refere-se ao tipo de material para aterro como sendo solo, solo tratado com cal e/ou cimento, material rochoso e material solo-enrocamento.. A mistura de solo com material rochoso dá origem ao que designamos de solo-enrocamento, e a utilização de material rochoso apenas a um enrocamento, como já foi detalhado atrás.

Solos

A classificação utilizada pelo CE do EP para solos em aterro, é baseada na classificação unificada de solos. Divide-se nas classes de S0 a S5, em que S0 representa solos de pior qualidade, e com baixo valor de CBR, como é o caso dos siltes e argilas muito plásticas e S5 solos com CBR superior, como é o caso de cascalhos bem graduados, ver quadro [Subcapítulo Condições de Utilização]

O presente CE permite a utilização de solos tratados com cal e/ou ligantes hidráulicos caso estejamos perante solos coerentes.

Material Rochoso

A classificação utilizada segue os princípios do LCPC/SETRA para o material rochoso.

Dentro da classificação anterior, cada rocha pode ser caracterizada em função das suas características como dura ou pouco fragmentável, média, e fragmentável. Os parâmetros medidos para esta caracterização são o γ , LA, FR e ALT.

Material não Reutilizável

Quanto ao materiais não reutilizáveis, são considerados todos os provenientes de escavação na linha ou de empréstimo que possuem lixo ou detritos orgânicos, argilas cujo o IP seja superior a 50%, materiais com propriedades físico químicas indesejáveis que requeiram medidas especiais, e turfas e materiais orgânicos provenientes de locais pantanosos.

O CE do EP refere-se a materiais para utilização em Leito de Pavimento devidamente expostos no subcapítulo de Condições de Utilização de material.

2.4. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DE MATERIAL EM ATERRO E LEITO DE PAVIMENTO. EXECUÇÃO

O aterro distingue-se em 6 zonas:

- *Fundação do aterro*, terreno sobre o qual serão colocados novos materiais;
- *Parte Inferior de Aterro (PIA)*, é a parte de aterro que assenta sob a fundação. De forma geral é constituída pelas duas primeiras camadas de aterro. No caso de existir a necessidade de proceder a trabalhos de decapagem, as camadas abaixo da superfície do terreno natural também são consideradas integradas na PIA;
- *Corpo de Aterro*, é a parte de aterro compreendida entre a Parte Inferior do Aterro e a Parte Superior do Aterro;
- *Parte Superior do Aterro (PSA)*, é a zona do aterro, com espessura na ordem dos 40 a 85 cm, sobre a qual assenta a camada do Leito de Pavimento;
- *Leito de Pavimento*, é a última camada do aterro;

- *Espaldar*, é a zona lateral do corpo do aterro limitada externamente pelos taludes, e que ocupa uma faixa de cerca de 4 m. Em certos casos tem função de maciço estabilizador.

A Fundação do Pavimento é constituída pela PSA e pelo Leito de Pavimento, esta camada influenciará significativamente o comportamento dos pavimentos.

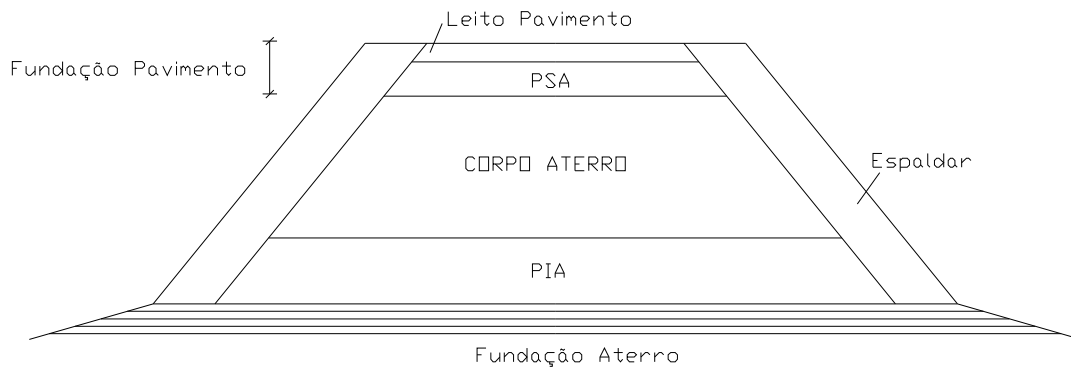


Fig.8 – Esquema com partes de estrutura de aterro.

Devido à importância que o leito do pavimento tem no comportamento dos pavimentos será estudado de forma particular.

O Leito de Pavimento é designadamente a última camada da terraplenagem, pelo que tem uma função muito importante no fecho do aterro, sendo obrigatória a utilização de materiais de boa qualidade e um cuidado acrescido na sua construção, visto que a sua superfície deve ficar lisa, sem ondulações ou material solto, e isenta de fendas.

As principais funções do leito do pavimento são:

- Proteger o aterro de intempéries;
- Garantir boas condições de traficabilidade aos veículos que circulam na obra e que executarão a primeira camada de pavimento, com uma capacidade de suporte suficiente, independentemente das condições meteorológicas;
- Nivelar a plataforma de modo a permitir uma correcta execução das camadas de pavimento;
- Permitir uma correcta execução do pavimento, nomeadamente no que se refere à compactação e regularização de camadas;
- Efectuar a transição da inclinação transversal do final do terraplino de 6%, para a inclinação transversal superficial seja em recta ou curva;
- Permitir uma correcta execução do pavimento, nomeadamente no que se refere à compactação e regularização de camadas;
- Assegurar a capacidade de suporte ao longo da vida da obra, independentemente do estado hídrico a que se encontra sujeito aterro;

- Assegurar uma contribuição na drenagem do pavimento.

2.4.1. RECOMENDAÇÕES LCPC/SETRA

2.4.1.1 Aterro

Como foi referido no subcapítulo de caracterização de materiais, cada classe de material é caracterizado em sub-classes em função do teor de humidade no momento da extracção. Para cada subclasse de material, o LCPC/SETRA procura ajustar a aplicação destes materiais em aterro mediante a situação meteorológica a que se encontra sujeito. Esta caracterização procura por um lado permitir uma qualidade técnica durante a execução em condições habituais e com equipamentos vulgarmente utilizados. Por outro considera os custos médios de modo a que não sejam necessárias medidas ou equipamentos especiais.

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

Quadro 7 – Condições a serem impostas para Utilização de Solos em Aterro

Parâmetro	Procedimento	Código
Extracção E	Nenhuma condição em particular a recomendar	0
	Extracção em camadas de 0,1 a 0,3m	1
	Extracção frontal, para uma frente de altura > 1 a 2m	2
Acção sob a Granulometria G	Nenhuma condição a recomendar	0
	Eliminação dos elementos > 800 mm	1
	Eliminação dos elementos > 250 mm	2
	Fragmentação complementar após extracção	3
Acção sob o teor em humidade W	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	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
Tratamento T	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Tratamento com um reagente ou um aditivo adaptado	1
	Tratamento com cal simples	2
Espalhamento R	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Camadas finas, 20 a 30 cm	1
	Camadas médias, 30 a 50 cm	2
Compactação C	Compactação intensa	1
	Compactação média	2
	Compactação fraca	3
Altura dos aterros H	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Aterro de altura baixa , < 5m	1
	Aterro de altura, < 10m	2

Consultando as tabelas de condições de utilização de materiais em aterro, visando o código correspondente ao solo, é possível saber qual o procedimento a ter como material.

A título exemplificativo, uma areia siltosa pouco argilosa no estado seco, classificada pelo LCPC como solo do tipo B₂s, aplicado em condições meteorológicas médias sem chuva, tem para as suas condições de utilização um código EGWTRCH = 0040120. Ora, consultando o quadro 7, conclui-se

que o solo necessita de ser humidificado para mudança de estado, deverá ser aplicado em camadas finas de 20 a 30 cm, e deverá ter uma compactação de intensidade média.

Esta indicação de compactação média, será considerada nos quadros das modalidades de compactação.

2.4.1.2 Leito Pavimento

O LCPC/SETRA limita a utilização de materiais para construção do LP, e em certos casos sugere o 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 8 – Condições a serem impostas para Utilização de Solos em Leito de Pavimento

Parâmetro	Técnicas de preparação dos materiais	Código
Acção sob a Granulometria G	Nenhuma condição a recomendar	0
	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
Acção sob o teor em humidade W	Nenhuma condição a recomendar	0
	Rega para manutenção do estado hídrico	1
	Humidificação para mudar de estado hídrico	2
Tratamento T	Nenhuma condição a recomendar	0
	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	
Protecção Superficial S	Nenhuma condição a recomendar	0
	Revestimento de cura eventualmente com gravilha	1
	Revestimento de cura com gravilha eventualmente incrustado	2
	Camada final de Regularização	3

2.4.2. ESPECIFICAÇÕES LNEC

LNEC – E241- 1971 - “Solos. Terraplenagens” [11]:

Esta especificação pretende dar indicações sobre os materiais a utilizar na execução de aterros em estradas incluindo a camada de leito do pavimento. Segundo esta Especificação:

- Os materiais não deverão conter detritos orgânicos;
- Os materiais a utilizar deverão ser os classificados, segundo a Classificação para Fins Rodoviários, Especificação LNEC E 240 [], nos grupos A-1-a, A-2-4, A-2-5 ou A-3, podendo, no entanto, ser usados os dos grupos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6 ou A-7 desde que sejam tomadas as devidas precauções no projecto e execução do aterro quanto à sua distribuição, compactação e drenagem, especialmente em relação aos solos dos grupos A-6 e A-7.
- Os materiais xistosos, os muitos alteráveis ou aqueles que contêm pedra demasiadamente branda, poderão ser utilizados em aterros desde que se tomem as devidas precauções baseadas em estudo especial e/ou se tenha em conta o seu comportamento em obras anteriores na região.

Como se pode constatar, estas recomendações são um pouco vagas, pois não têm em conta o tipo de argila, e o seu comportamento na presença de água, contemplando apenas a quantidade de materiais finos presentes no solo.

LNEC – E242- 1971 - “Execução de Terraplenagens de Estradas” [12]:

Esta especificação destina-se a dar indicação do modo de execução de aterros e leito de pavimento e aborda as etapas na execução de terraplenagens de uma estrada.

Na preparação da superfície onde assentam os aterros, deverá garantir-se uma correcta ligação entre o material de aterro. Para tal poderá ser necessário dispor a superfície em degraus, e/ou aplicar uma camada granular que suporte a passagem de equipamento, recompactando o material à baridade específica para o aterro.

A especificação prevê a construção de aterros experimentais para o estudo do comportamento à compactação, um procedimento bastante incómodo que requer a mobilização de diversos equipamentos e acarreta custos significativos.

No que diz respeito à construção de aterros, a especificação distingue duas situações: quando é efectuado o estudo em aterro experimental e no caso contrário.

Quando é efectuado estudo experimental, recomenda-se que os solos devem ser aplicados por ordem crescente de qualidade a partir da base, e que na utilização de rocha escavada, esta deverá ser colocada na base do aterro, enchendo os vazios com material fino e compactando, criando assim um solo-enrocamento.

O LNEC alerta para o facto de poder existir um arrastamento de finos das camadas superiores, e sugere a construção de uma camada de granulometria adequada sobre a camada de rocha. Hoje em dia, este fenómeno poderá ser evitado com a utilização de um geotêxtil.

No caso de não se proceder ao estudo experimental, a espessura das camadas deverá estar limitada a 20 cm, o material não deverá conter pedras que impeçam a utilização de equipamento corrente, como é o caso de cilindros compactadores, presentes no mercado, limitando o diâmetro de 7cm para a camada superior com 30cm.

No que se refere ao leito de pavimento, a especificação é ainda mais vaga falando apenas na utilização de material seleccionado, e definindo a espessura desta camada em função do tráfego. Não clarifica, qualquer particularidade quanto à construção do leito do pavimento.

Como se pode constatar esta especificação, apesar de procurar servir de guia para a construção do aterro, é muito sucinta, sem tomar qualquer consideração acerca do estado do solo, nem de procedimentos específicos ou tratamentos.

2.4.3. CADERNO ENCARGOS EP

2.4.3.1 Aterro

A utilização do tipo de solo a aplicar por zona de aterro definida no CE do EP, é apresentada no Quadro 9.

Quadro 9 – Utilização de solos em aterro CE do 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 seixo, 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 d	areia siltosa;	S	S	S
		SM u	areia siltosa.	P	S	N
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
		GW	cascalho bem graduado; cascalho bem graduado com areia.	S	S	S

S - admissível; N - não admissível; P-possível.

PIA - parte inferior do aterro

PSA - parte superior do aterro

O presente CE apresenta uma série de procedimentos e condições que devem ser cumpridas na execução do aterro e compactação, abordados no capítulo 3.

2.4.3.2 Leito de Pavimento

A caracterização de materiais para utilização em leito de pavimento divide-se em solos, materiais granulares não britados, materiais granulares britados, solos tratados com cal e/ou cimento. Faz-se de seguida a pormenorização:

Solos

Os materiais em camadas de leito de pavimento, devem ser constituídos por solos de boa qualidade, isentos de detritos, matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas, obedecendo às seguintes características:

- Dimensão Máxima - D_{max} 75mm
- Percentagem de material que passa no peneiro nº 200 ASTM, máxima.....20%
- Limite liquidez - WL, máximo.....25%
- Índice de plasticidade - IP, máximo 6%
- Equivalente de areia, mínimo 30%
- Valor de azul de metileno – VBS (material de dimensão inferior a 75µm), máximo.....2,0
- CBR a 95% de compact. relativa, e teor óptimo em água (Proctor Modificado), mínimo...10%
- Expansibilidade, ensaio CBR (máxima).....1,5%
- Percentagem de matéria orgânica – MO 0%

Material Granular não Britado

Quanto ao material granular não britado, aluvionar ou resultante de escavação em rocha, deve ter as seguintes características:

- A granulometria deve respeitar o seguinte fuso:

Quadro 10 – Fuso material granular não britado para L.P. segundo o C.E do EP

Peneiro ASTM	Percentagem Acumulada do Material que passa
75,0 mm (3")	100
63,0mm (2 1/2")	90 – 100
4,75mm (nº4)	35 – 70
0,075mm (nº200)	0 -12

- Limite Liquidez – WL, máximo.....25%
- Índice de Plasticidade - IP, máximo.....6%
- Equivalente de areia, mínimo.....30%
- Valor de azul de metileno – VBS (material de dimensão inferior a 75µm), máximo.....2,0
- Perda por desgaste na máquina de *Los Angeles* – LA, máxima.....45%
- No caso de o equivalente de areia ser inferior a 30%, o valor de azul de metileno corrigido (VA_c) deverá ser inferior a 35, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$VA_c = VA \frac{\%P\#200}{\%P\#10} \times 100$$

Com VA, obtido pelo método da mancha no material de dimensão inferior a 75µm

- Se a percentagem de material passado no peneiro de 0,075mm (nº 200 ASTM) for inferior ou igual a 5, a aceitação do material passa unicamente pelo respeito do especificado para o valor de LA, desde que FR < 7 e ALT > 20.

Material Granular Britado

Outro dos materiais utilizados em LP é o Material Granular Britado. Este é proveniente de centrais de britagem anexas à obra, na maior parte dos casos aproveitando o material que é escavado e que possui as características ideais para este tipo de aplicação. Deverá estar obviamente isento de argilas, de forma a ser insensível à água, não deverá conter matéria orgânica nem qualquer outro tipo de substâncias que possam comprometer a qualidade do LP.

Deverá ter as seguintes características:

- Percentagem de material retido no peneiro ASTM de 19 mm (3/4’’), máximo.....≤45%
- Limite de Liquidez – WL, máximo.....25%
- Índice de Plasticidade – IP, máximo.....6%
- Equivalente de Areia, mínimo.....30%
- Valor de azul de metileno – VBS (material de dimensão inferior a 75µm), máximo.....2,0
- No caso de o equivalente de areia for inferior a 30%, o valor de azul de metileno corrigido (VBS) deverá ser inferior a 35, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$VA_c = VA \frac{\%P\#200}{\%P\#10} \times 100$$

Com VA, obtido pelo método da mancha no material de dimensão inferior a 75µm

- Se a percentagem de material passado no peneiro de 0,075mm (nº 200 ASTM) for inferior ou igual a, a aceitação do material passa unicamente pelo respeito do especificado para o valor de LA, desde que FR < 7 e ALT > 20.

No valor do desgaste de LA referido acima, refere-se o valor de 50% em granitos.

- A granulometria deve respeitar o seguinte fuso:

Quadro 11 – Fuso do material granular britado segundo EP

Peneiro ASTM	Percentagem Acumulada do Material que passa
37,5 mm (1 1/2")	100
31,5 mm (1 1/4")	75 – 100
19,0 mm (3/4")	55 – 85
9,51 mm (3/8")	40 – 70
6,3 mm (1/4")	33 – 60
4,75 mm (nº4)	27 – 53
2,00 mm (nº10)	22 – 45
0,425 mm (nº40)	11 – 28
0,180 mm (nº80)	7 – 19
0,075 mm (nº200)	2 – 10

3

COMPACTAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo procura ser uma breve compilação da bibliografia sobre a teoria da compactação e a sua influência nas propriedades dos solos. Por outro lado, será caracterizado o tipo de equipamento a ser utilizado.

Serão abordadas as prescrições para a compactação do LCPC/SETRA, a especificação que melhor se adapta aos tipos de solo utilizado no nosso país, e que melhor define o número de passagens e espessura das camadas na execução de um aterro sem ter que proceder a estudos e aterros experimentais ou recorrer a outras especificações menos precisas que poderiam conduzir a uma mobilização de meios sobredimensionada, levando a uma compactação excessiva e consequentemente ao aumento dos custos na obra ou a uma compactação insuficiente acarretando o atraso na obra.

Entende-se como compactação, “O processo pelo qual uma massa de solo constituída por partículas sólidas, água e ar vê diminuído o seu índice de vazios por redução do volume da sua fase gasosa conseguida à custa da aplicação repetida de cargas. O teor em água, razão do peso da água sobre o peso das partículas sólidas, é normalmente o mesmo para uma massa de solo solta e descompactada e a mesma massa num estado mais denso conferido pela compactação. A compactação permite um aumento da resistência ao corte, e uma redução da deformabilidade e permeabilidade do solo.” [13]

3.2. CONSIDERAÇÕES DA TEORIA DA COMPACTAÇÃO

Em meados dos anos 30, PROCTOR procurou-se aprimorar a técnica da compactação, com os primeiros trabalhos sobre a compactação de aterros. Estes trabalhos permitiram uma grande evolução nas técnicas de compactação, que antes eram realizados de forma empírica sem qualquer fundamento técnico. Proctor desenvolveu um ensaio dinâmico para a determinação experimental da curva de compactação, representada pela relação peso volúmico seco e teor de humidade.

Observou que o peso volúmico, resultante da aplicação de uma determinada energia de compactação, é função do teor de humidade do solo. Para cada teor de humidade, obtêm-se uma maior ou menor eficiência do efeito de compactação na densidade do solo. Isto deve-se essencialmente ao efeito de atrito entre a água e as partículas. A adição de água no solo reduz as forças capilares, a resistência ao atrito e resistência ao corte do solo. Para humidades muito baixas, o atrito é alto o que prejudica a redução de vazios. À medida que aumenta o teor de humidade, verifica-se que há um efeito de lubrificação entre os grãos, o que facilita a saída do ar que se encontra no solo, em forma de canículos intercomunicados. Segundo Proctor, a partir de um determinado teor de humidade, a água impede a expulsão do ar, não reduz o atrito nem influencia o rearranjo de partículas do solo, não sendo obtido qualquer acréscimo de densidade. Há, portanto, para uma dada energia, uma densidade máxima que é obtida para um certo teor de humidade, designado como o teor de humidade óptimo, representativo da relação ideal entre solo, água e ar (Figura 9).

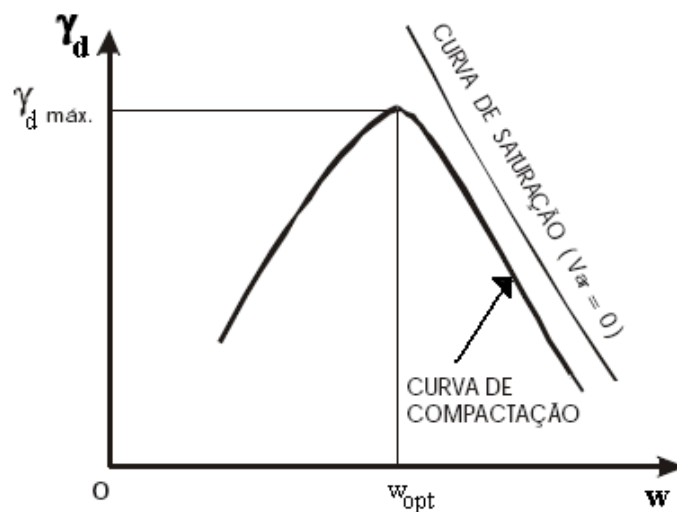


Fig.9 – Curva de Compactação – Peso Volúmico máximo ($\gamma_{d \text{ máx.}}$) - Teor de Humidade Ótimo (w_{opt})

Alguns anos depois outros pesquisadores apresentaram também as suas teorias, em função da capilaridade, lubrificação, viscosidade da água, interação físico-química e tensões efectivas com vista a explicar o comportamento da curva de compactação. De realçar HOGENTOGLER na década de 30, e um pouco mais tarde LAMBE e WHITMAN.

HOGENTOGLER apresentou uma teoria que se baseia na viscosidade da água e mostra que a curva de compactação passa por quatro estados de humidade: hidratação, lubrificação, inchamento e saturação do solo.

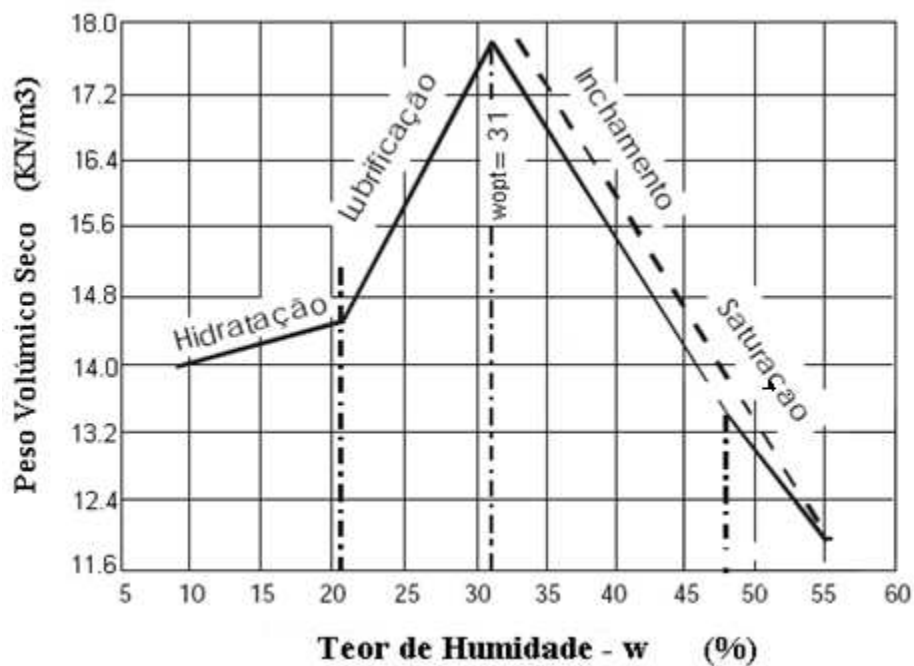


Fig.10 – Teoria de Hogentogler (adaptado)

Segundo este autor na fase de *hidratação* com o aumento do teor de humidade aumenta a espessura da água aderente às partículas de solo, na forma de filme, havendo uma redução da viscosidade da água, o que se reflectirá numa diminuição do atrito entre partículas e no aumento do peso volúmico do solo. O filme de água que se forma na superfície dos grãos de solo, permite caracterizar os diferentes estados, à medida que o teor de humidade aumenta. Quando se atinge uma determinada humidade, a adição de água acaba por lubrificar as partículas sem influência na viscosidade da água, até de atingir o teor de humidade óptimo. Estamos perante a fase designada de *lubrificação*. Assim que se atinge o teor de humidade óptimo, o aumento de água no solo provoca um deslocamento das partículas, ao que designamos de *inchamento*, com a subsequente redução da densidade. Quando os vazios do solo se encontrarem todos preenchidos com água designamos de estado de *saturação* do solo.

LAMBE e WHITMAN apresentaram uma teoria que explica as alterações na concentração electrolítica das partículas devido ao efeito da compactação no solo. Obtiveram a conclusão que, quanto maior for a energia, maior o grau de dispersão das partículas, para o mesmo teor de humidade. Quando a humidade cresce, aumenta a repulsão entre partículas, o que permite um melhor arranjo entre as mesmas para uma dada quantidade de energia. Ao aumentar essa quantidade de energia, as partículas tendem a orientar-se da forma mais paralela possível. Na figura 11 é possível analisar estas conclusões, a orientação das partículas em função do teor de humidade. Com o aumento da humidade as partículas tendem a orientar-se da forma mais paralela possível.

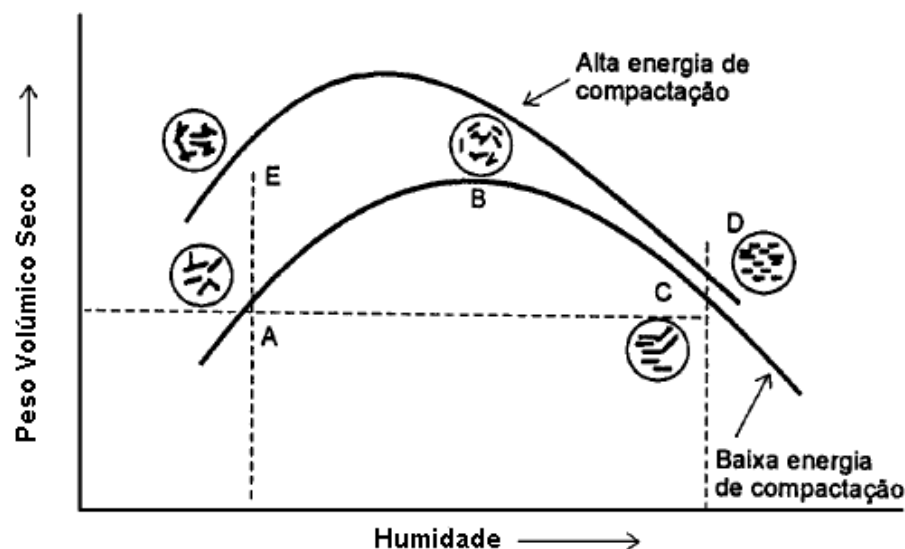


Fig.11 – Teoria de Lambe [14]

O grau de compactação é definido como sendo a razão entre o peso volúmico obtido na obra e o peso volúmico seco máximo determinado em laboratório. O controlo da obra no final de execução será avaliado por este parâmetro, medida a baridade seca *in situ*, e a baridade padrão obtida em laboratório.

O controlo referido será estudado no capítulo de Controlo de Obra.

“No caso de solos coesivos, a experiência mostra que a resistência ao corte é máxima quando o solo é compactado do lado seco, decrescendo com o aumento do teor de água, mesmo quando se aproxima do ótimo, isto é quando cresce a compactidade” [13].

“A compactação com um teor em água um pouco abaixo do ótimo é favorável, em termos de resistência ao corte pois a ligeira redução no valor do ângulo de atrito é largamente compensada com o decréscimo que se obtém nas pressões neutras positivas geradas durante o corte, logo com o aumento das tensões efectivas” [13].

A compactação de argilas é bastante complexa. Se o teor de humidade não estiver próximo do ótimo não é possível obter a compactação com recurso à utilização de cilindros. Nesses casos devem ser previstos pelo projectista outros métodos no caso de a argila ser solo de fundação. Com o objectivo de reduzir a água existente no solo, as soluções vulgarmente utilizadas são a construção de um aterro provisório ou de uma malha de colunas de brita, ou de colunas geotêxtil, utilizando equipamento próprio que permite cravar o geotêxtil no solo com elevada produção. No caso de argilas provenientes de escavação, estas podem ser tratadas com cal, e escarificadas para que se alterem as suas características ou se reduza o teor em água respectivamente. Assim que se considere que o teor de humidade do solo se aproxima do ótimo, o cilindro pés de carneiro cumpre a função de compactação.

“Pode concluir-se que um dado solo coesivo compactado do lado seco exhibe a resistência ao corte mais elevada no fim da compactação” [13].

“No caso de solos não coesivos, como é o caso de areias e cascalhos, verifica-se que o teor em água de compactação tem uma influência muito menos marcante na resistência ao corte nas condições correspondentes ao fim da compactação. A saturação não acarreta uma quebra sensível na resistência, quer os solos tenham sido compactados do lado seco ou do lado húmido [Matos Fernandes]

3.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O método vulgarmente utilizado para avaliação dos materiais compactados é designado por ensaio Proctor, consiste na aplicação de um determinado pilão com um peso especificado, que cai a uma altura padrão um número de vezes também especificado, sobre uma amostra de solo.

O ensaio Proctor permite determinar o teor de humidade ótimo (w_{op}) e o peso volúmico seco máximo (γ_d).

A energia específica de compactação pode ser definida pela seguinte expressão:

$$E_c = \frac{Phn}{V} \times N \quad (N.cm/m^3)$$

Em 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.

Esta energia de compactação descrita, procura reproduzir em laboratório as condições de compactação que o equipamento vai exercer sobre o solo em obra.

A seguir apresentam-se o número de camadas e número de pancadas para Proctor Normal e Modificado (Quadro 12).

Quadro 12 – Quadro indicativo das características dos Ensaio Proctor

ENSAIO	Número de camadas	Pilão	Tipo de Molde	Número de Pancadas
Proctor Normal	3 camadas	Pequeno	Molde Pequeno	25
		Grande	Molde Grande	55
Proctor Modificado	5 camadas	Pequeno	Molde Pequeno	25
		Grande	Molde Grande	55

Resultados do Ensaio de Compactação

Para cada solo existem diferentes energias de compactação que podem ser aplicadas. No caso de ensaios de laboratório normalizados, como é o caso do Proctor Normal e Modificado, existe uma curva teor de humidade – peso volúmico seco associada a cada uma destas energias aplicadas. Cada curva procura indicar o efeito real que o equipamento vai exercer no solo por uma dada energia de compactação, (Figura 12). Através dos teores de humidade ótimo e dos pesos volúmcicos secos máximos da curva respectiva a cada energia aplicada, é possível definir a curva ótima. Do lado húmido, as curvas aproximam-se da respectiva curva de saturação.

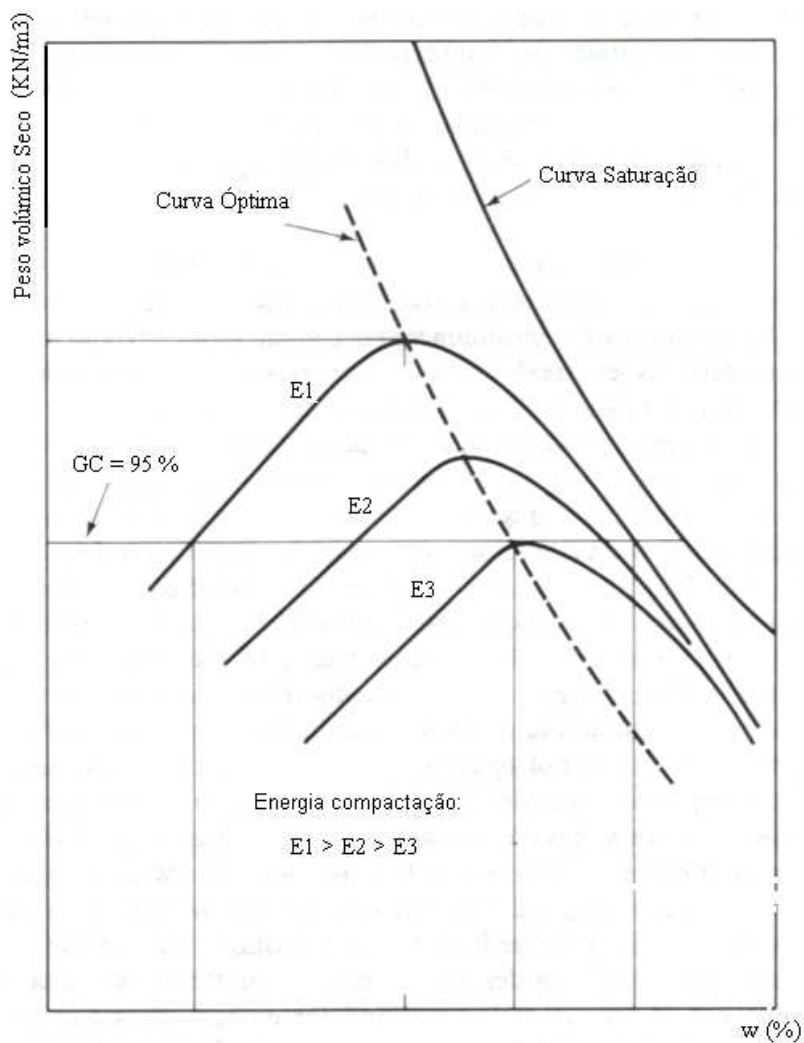


Fig.12– Curva de compactação num solo para diferentes energias aplicadas [15].

Como seria de esperar, para uma dada energia de compactação aplicada a diferentes tipos de solos, existe um respectivo teor de humidade óptimo e densidade máxima obtida, a seguir apresentados na figura 12, em que os solos A, B, C e D, são respectivamente areia siltosa, argila com baixa compressibilidade, silte e argila com alta compressibilidade e argila gorda ou plástica.

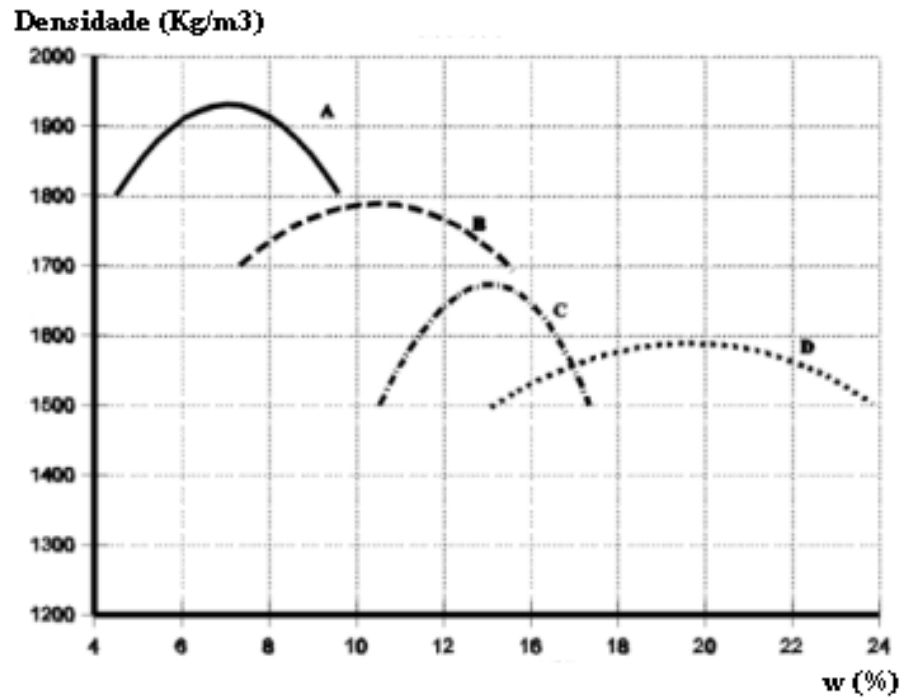


Fig.13 – Curva de compactação de solos diferentes compactados com a mesma energia [15].

Quadro 13 – Valores médios de Peso Volúmico Seco e Teor de umidade ótimo em diferentes tipos de Solo (adaptado) [16].

Classificação Unificada de Solos	Designação	γ_d (KN/m ³)	w_{opt} (%)
SW	Cascalho bem graduado	22	7
SC	Areia Argilosa	19	12
SP	Areia mal graduada	18	15
CL	Argila magra	18	15
ML	Silte	17	17
CH	Argila Gorda	15	25

3.4. EQUIPAMENTO

3.4.1. TIPOS DE CILINDROS

Uma correcta selecção do equipamento de compactação é fundamental para se obter a densidade do solo esperada, no mínimo de tempo possível e com o menor a energia de compactação.

O Esforço de Compactação é a percentagem de energia necessária para compactar uma massa de solo, e dependerá das propriedades do solo, da sua graduação do solo, da existência ou não de coesão e da densidade pretendida.

Os compactadores são projectados para usar 4 tipos de esforços, ou uma combinação deles:

- Estático;
- “*Kneading*”;
- Impacto;
- Vibração.

Os equipamentos de compactação vulgarmente utilizados em Portugal, podem ser classificados em 4 tipos:

- Cilindro Vibrador
- Cilindro Pés de Carneiro
- Cilindro de Pneus
- Cilindro Rolo Liso

Podem existir combinações destes tipos, os designados cilindros mistos. Como exemplo pode-se referir o cilindro vibrador na parte dianteira combinado com cilindro de pneumáticos na parte traseira (Figura 14).

Quanto ao rodado existem os tandem, e os monocilindros, os mais utilizado em compactação de aterro. Estes monocilindros são aqueles em que apenas um dos rolos exerce a função de compactação ou tandem se estivermos perante dois eixos compactadores.

Em alguns países são também utilizados compactadores vibradores por impacto, constituídos por rolos com forma aproximadamente quadrada com os cantos arredondados, normalmente utilizados em solos arenosos e soltos.



Fig.14 – Cilindro Misto (Rolo Liso – Pneus) [17]

3.4.2. CILINDRO PÉS DE CARNEIRO

A designação deste tipo de compactador remonta à utilização de rebanhos para pisar o solo até este ser compactado.

São constituídos por ‘pés’ com forma cúbica ou trapezoidais com uma ligeira inclinação das faces laterais e uma face paralela ao rolo. Este desenho permite que o rolo consiga uma melhor penetração nas passagens iniciais, permitindo uma compactação mais ao menos uniforme ao longo da espessura de camada.

As características mais importantes são o seu peso e a pressão transmitida por cada pé, o efeito de compactação exercido é o designado “*Kneading*”.

É adequado para a compactação de solos finos e granulares com finos, e especialmente para solos que têm tendência para a lamelação. No caso de solos com este comportamento, como é o caso das argilas, o compactador ao penetrar no solo evita a lamelação, o que consequentemente proporciona um aumento da resistência global do aterro.

Estes cilindros podem compactar uma espessura até à ordem dos 10 cm por cada passagem, e têm efeito para camadas com profundidade até 30 cm. No caso de espessuras superiores ao valor indicativo de 20cm para espessura de camada, deve ser utilizada uma selecção de equipamentos em conjunto com cilindros de pneus, e/ou cilindros vibradores lisos para obter melhores resultados.

Se o material for solto e razoavelmente trabalhável, permitindo ao cilindro de pés penetrar na camada na passagem inicial, é possível obter uma densidade uniforme ao longo de toda a profundidade da camada.

Com a passagem do cilindro e à medida que os pés saem do solo num movimento de rotação, vai haver uma porção de material que é expelido. O resultado será uma pequena camada de material solto à superfície.

No caso de estarmos perante a última camada, ou perante o final da jornada diária de trabalho, devem ser aplicados outros cilindros de forma a nivelar a superfície do solo uma vez que o acabamento não é liso.

Existe a distinção entre o Cilindro Pés de Carneiro vulgarmente utilizado no nosso país que é constituído por rolo único, figura 16 e o designado '*Tamping Roller*' equipado com quatro rodas metálicas de pés, figura 15.

Geralmente os cilindros de rolo liso, permitem a conversão do tipo de compactador pela substituição do rolo liso por um rolo pés de carneiro. As marcas de equipamentos anunciam que estas alterações se podem realizar sem qualquer alteração do sistema hidráulico, o que em empresas com pequena frota constitui uma mais valia.

Os '*Tamping Roller*' têm maior maneabilidade, podem atingir velocidades elevadas, na ordem dos 20km/h e desenvolvem os quatro tipos de esforços de compactação. Estas características reflectem-se numa elevada produtividade do equipamento, que compacta espessuras de 30 cm em poucas passagens. São cilindros com um custo de aquisição e operação elevado, o que os leva a serem aplicados apenas em grandes obras, onde possam trabalhar ininterruptamente para serem rentabilizadas.

O peso dos modelos no mercado varia entre aproximadamente 30 KN e 400KN, e podem ser tractores rebocados ou autopropulsionados. Estes últimos são os mais frequentes em Portugal.



Fig.15 – '*Tamping Roller*' [18]



Fig.16 – Cilindro Pés de Carneiro Hamm 3411P [19]

3.4.3. CILINDRO DE PNEUS:

Os cilindros com pneumáticos apresentam dois tipos de esforços de compactação: o estático e o kneading. O número de pneumáticos pode variar em função do tipo de equipamento. No entanto os mais utilizados têm vulgarmente 5 pneus por eixo. A superfície de contacto pneus solo, pode ser ajustada em função da pressão no pneumático e da carga no equipamento. Este tem um compartimento em forma de depósito na secção frontal, onde são vulgarmente colocados blocos de betão ou material granular húmido para adicionar peso ao veículo.

A pressão de contacto destes cilindros no solo é obtida pelo peso transmitido aos pneumáticos dividido pela sua superfície de contacto. A superfície de contacto é obtida pelo quociente entre carga no pneu e a pressão do pneu. A carga no pneu poderá ser afectada com um coeficiente minorativo, já que o pneu ao deformar-se dissipa cerca de 10% nas faces laterais.

A superfície coberta pelo cilindro é determinada pelo somatório da superfície de contacto do pneu, que por sua vez, pode variar. Deve ser ajustada a pressão do pneu em função do contacto que pretendemos.



Fig.17 – Cilindro de Pneus [20]

3.4.4. CILINDRO VIBRADOR ROLO LISO

Este tipo de cilindro, como o próprio nome indica está equipado com rolo liso metálico. Pode ser mono ou tandem. No caso de ser tandem cresce o efeito de compactação face ao mono. No entanto possui uma capacidade de manobra inferior o que diminui o rendimento do equipamento caso estejamos numa obra em que sejam necessárias várias inversões de marcha. Por este motivo, e pelo facto de existirem no mercado cilindros mono com maior peso e dimensões, são estes privilegiados na compactação de aterros. Os do tipo tandem são reservados para os pavimentos betuminosos.

A vibração de um cilindro é definida pela sua amplitude e pela sua frequência. A amplitude determina a altura a que a vibração é transmitida ao solo, enquanto a frequência determina o número de pancadas que são transmitidas no período de tempo entre impactos. As marcas geralmente definem a frequência em vibrações por minuto (vpm) ou em hertz (Hz).

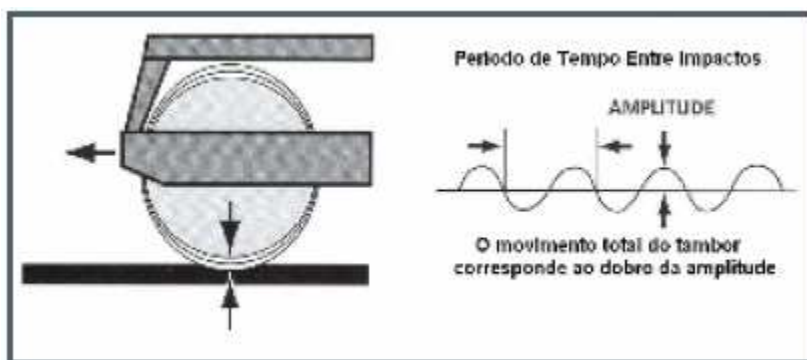


Fig.18– Cilindro em modo Vibratório [21] .

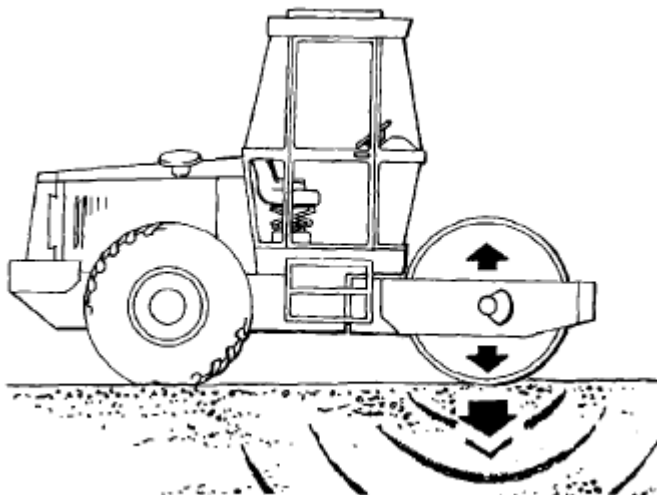


Fig. 19 – Efeito de um cilindro vibrador no solo [22].

O equipamento mencionado encontra-se equipado com um sistema vibratório, que pode ser representado pelo um modelo físico simplificado (Figura 20).

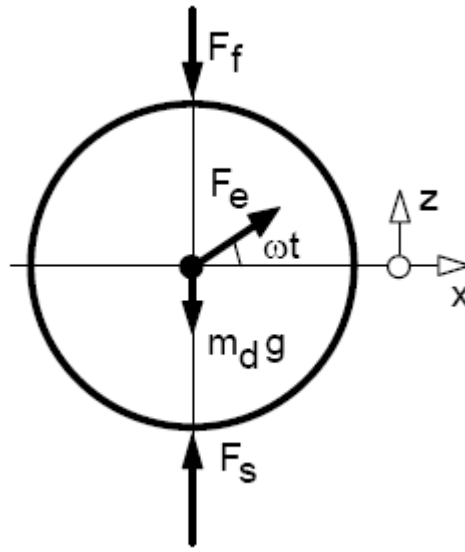


Fig.20 – Forças a actuar no rolo de um Cilindro Vibratório [22].

Em que:

- F_f : representa a parcela estática do peso do equipamento transmitida ao eixo do rolo;
- $F_e(\omega t)$: representa a força gerada pelo sistema de peso excêntrico, assumindo que tem uma força harmónica a uma frequência simples;
- m_d : representa a massa do rolo
- F_s : representa a reacção do solo, que é uma complexa função do movimento do rolo e da deformação do solo.

Todas estas forças podem ser facilmente calculadas, à excepção de F_s , que requer a utilização de um modelo que simule as condições de deformação do solo. O movimento vertical (z) e horizontal (x) podem ser calculados pelas equações (3.1) e (3.2) respectivamente [22].

$$m_d \frac{d^2 z}{dt^2} = F_e \sin(\omega t) + F_s - F_f - m_d g \quad (3.1)$$

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} = F_e \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

Este cilindro é muito eficaz na compactação de solos não coesivos ou não plásticos, já que o efeito vibratório permite um rearranjo das partículas.

O acabamento que o rolo proporciona é bastante eficiente, a superfície fica lisa, e densa, o que evita o acumular de água à superfície.

A figura 21 representa o estudo do comportamento cilindros com pesos diferentes em vários tipos de solo. Este estudo pode ser um bom ponto de partida para o dimensionamento do modelo de equipamento, nomeadamente o seu peso.

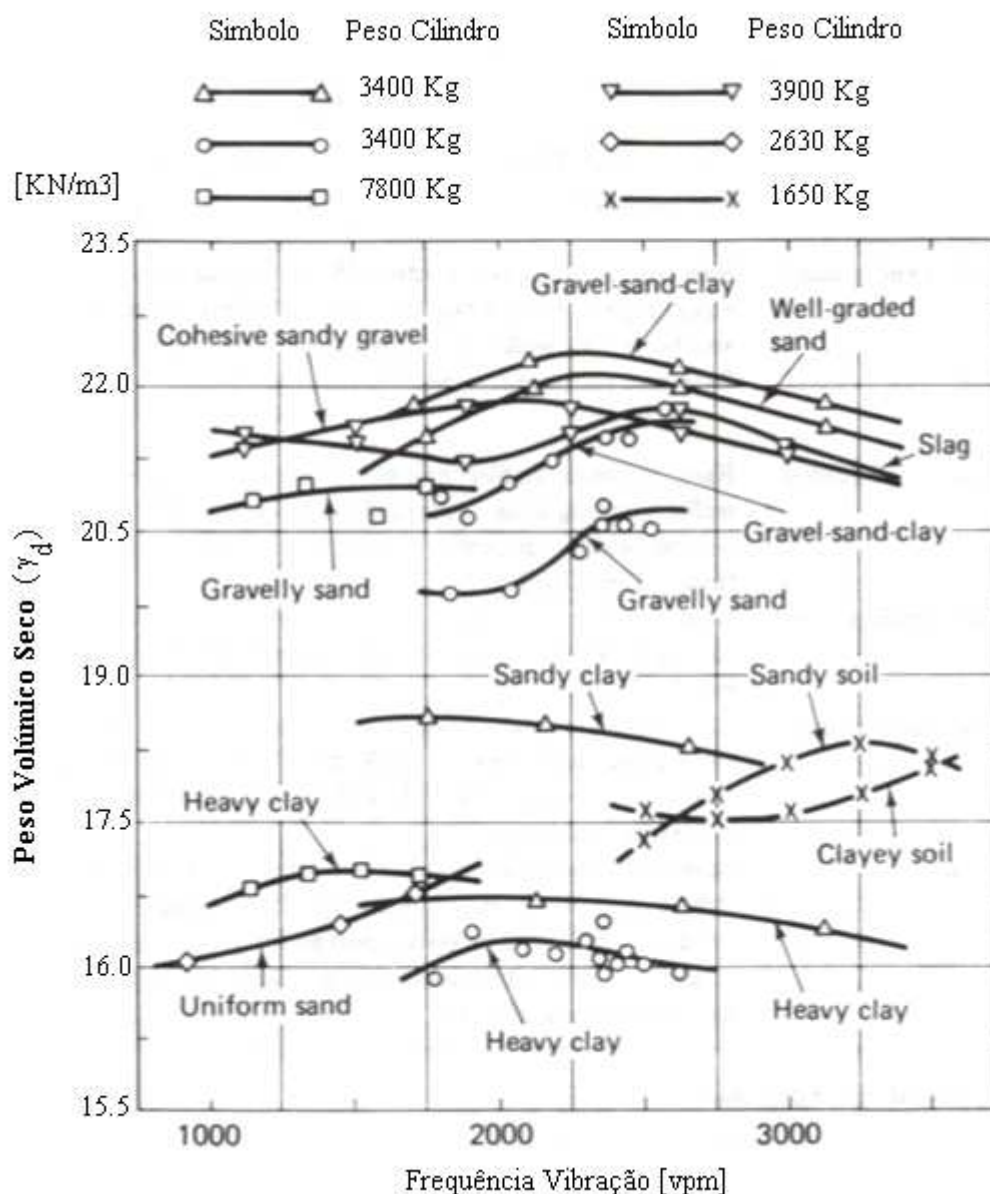


Fig.21 – Frequência de Vibração Ótima - Máxima Densidade [23].



Fig.22 – Cilindro Vibrador Rolo Liso Volvo SD122D [24].

O cilindro da figura 22, segundo as características técnicas oferecidas pela Volvo tem uma massa de operação de 12000 kg, e uma força centrífuga de vibração compreendida no intervalo de 206 a 281KN e uma frequência de vibração de 1850 a 2025 vibrações por minuto (vpm).

A marca de cilindros Hamm inclui nos seus equipamentos uma tecnologia com rolos oscilatórios e vibradores. Este sistema garante um contacto permanente do rolo no solo, ao contrário dos vibradores que têm apenas movimento vertical. Este fenómeno é possível graças à substituição do usual contrapeso no eixo do rolo que permite a vibração do rolo (figura 23), por dois contrapesos (figura 24). O efeito destes dois pesos que rodam no mesmo sentido provocando um efeito contrário ao do rolo, impede-o de perder o contacto com o rolo.



Fig.23 – Modo Vibratório [25]



Fig.24 – Modo Oscilatório [25]

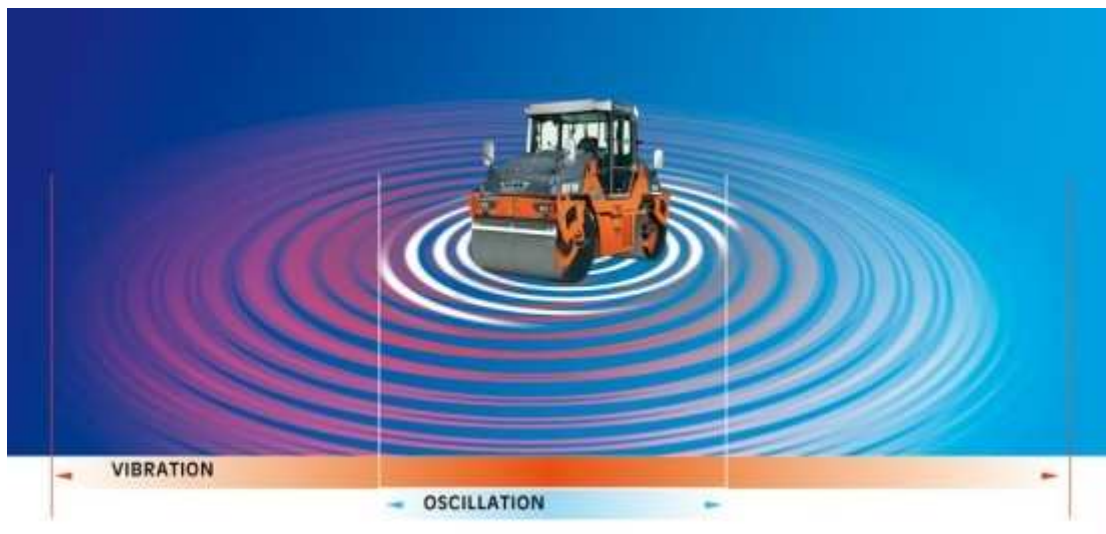


Fig.25 – Efeito da Vibrador e Oscilador num Cilindro [25]

3.4.5. CILINDRO DE IMPACTO

Este tipo de cilindro foi desenvolvido na África do Sul, e praticamente não tem sido utilizado na Europa. Permite compactar vários tipos de solos, apresentando bons resultados para o caso de solos granulares e material rochoso, pois aliado ao seu elevado peso estático, aplica uma força de impacto forte que permite o reajustamento dos materiais atrás citados. A sua aplicação apresenta-se bastante útil em grandes aterros como é o caso de aeroportos ou aterros com grande largura, pois atinge velocidades altas, e compacta uma grande espessura de material. Nestes casos permite a redução de custos, já que executa a compactação necessária em menor tempo.

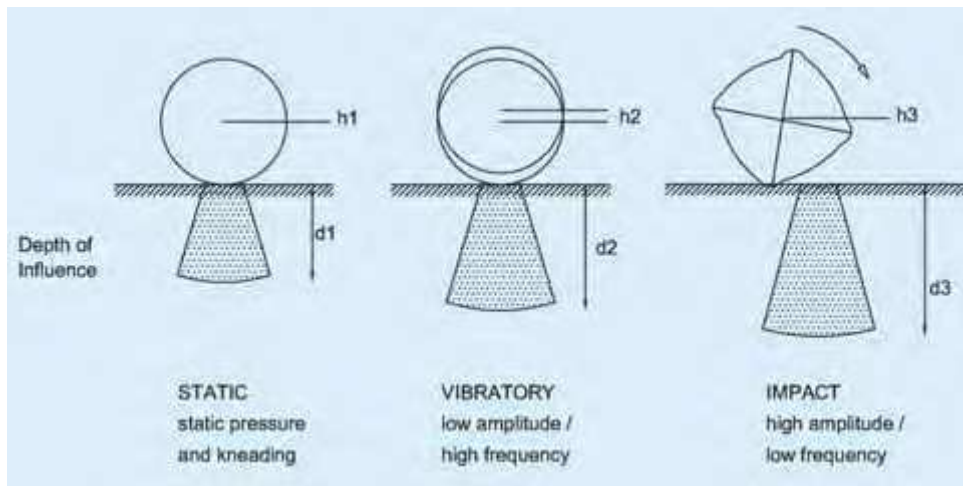


Fig.26 – Efeito da Vibrador e Oscilador num Cilindro [26]



Fig.27 - Cilindro de Impacto [27]

3.4.6. SELECÇÃO DE EQUIPAMENTO

Uma correcta selecção do equipamento de compactação é fundamental para se obter a densidade esperada para o solo, no mínimo de tempo possível e com o menor esforço compactação, logo reduzindo tempos e custos.

Na selecção de equipamento para compactação deverá privilegiar-se:

- Tipo e propriedades do solo;
- Densidade desejada;

- A dimensão do trabalho;
- Equipamento de compactação disponível.

Analisando a gama de aplicações propostas de utilização do tipo de equipamento gama de solos do Department of US Army [28], dos autores HOLDZ and KOVACS [23], e pelo Manual Caterpillar de 1998 [29] e procurando uma actualização para os equipamentos actuais, desenvolveu-se um esquema adaptado apresentado na figura 29.

Considera-se ainda que as operações de compactação serão dimensionadas com base no capítulo de compactação do LCPC estudado no subcapítulo 3.6.

Após serem dimensionados os equipamentos de compactação a utilizar, deve-se ter o cuidado de prever os camiões necessários para que não haja paragem dos cilindros. A localização do material para aterro vai determinar o tempo do ciclo de cada camião. Deve ser evitado qualquer tempo de espera com a paragem de cilindros.

A articulação da compactação com o transporte de material permitirá redução de custos. Poderá optar-se pelo espalhamento de toda a camada e posteriormente efectuar-se à sua compactação. Caso existam outros trabalhos de compactação na obra, eles poderão ser alternados de modo a não haver imobilização do equipamento da compactação.

O esquema de compactação por camadas encontra-se representado na figura 28, com um camião basculante, um dozer para espalhamento do material e o cilindro compactador. Este esquema poderá ter algumas variantes no equipamento de transporte, utilizando camiões articulados ou dumpers se estivermos perante grandes volumes de terras a serem movimentados. Quanto ao espalhamento pode ser efectuado por dozer e em conjunto com a motoniveladora para controlar de forma mais precisa as cotas previstas no projecto. O dozer poderá ser de lagartas ou de rodas pneumáticas conforme o esforço de tracção necessário.

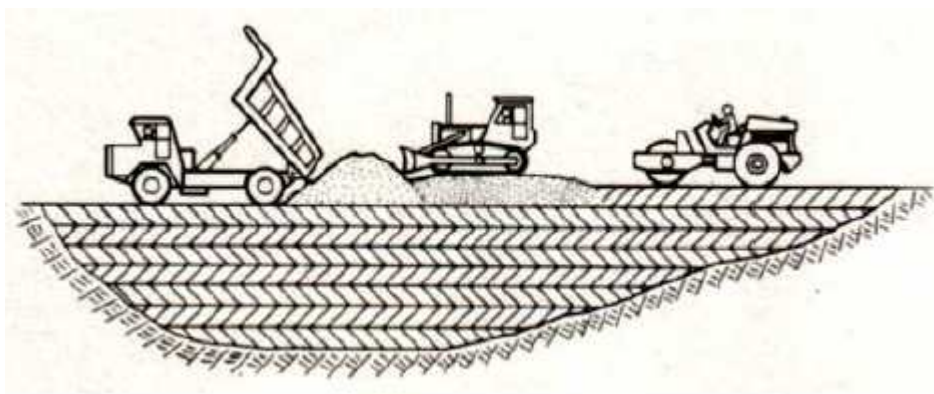


Fig.28 – Esquema de compactação por camadas [30]

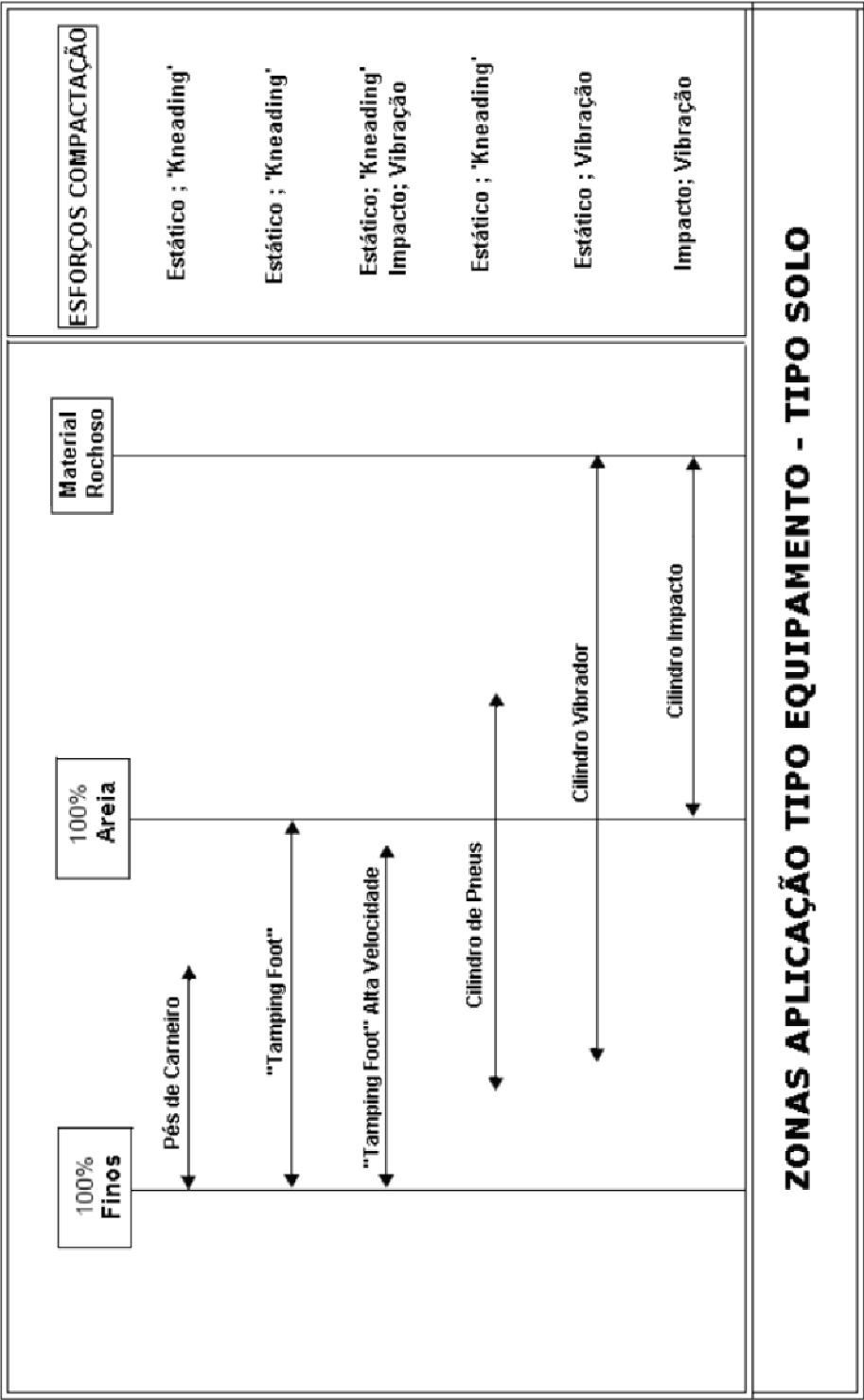


Fig. 29 – Zonas aplicação Tipo Equipamento – Tipo Material

3.4.7. TRATAMENTO DO TEOR DE HUMIDADE. EQUIPAMENTO

Como foi referido, a compactação deve ser efectuada para um teor de humidade próximo do óptimo para o solo em questão, para que sejam cumpridos os Cadernos de Encargos, os quais em Portugal geralmente limitam o valor do Proctor a 95% em aterro, e de 100% em leito de pavimento

Nem sempre é fácil que o solo no seu estado natural tenha os níveis de humidade pretendidos para uma correcta compactação. Geralmente admite-se um valor marginal de 2% face ao teor de humidade óptimo. Factores como as características dos solos, a pluviosidade, elevadas temperaturas dificultam o processo de compactação. Como se compreende, podem acontecer duas situações distintas que requerem um tratamento do solo; são elas:

- Solo muito seco;
- Solo muito húmido.

3.4.7.1 Teor de Humidade inferior ao Óptimo

Para solos muito secos, em que o valor do teor de humidade se encontra abaixo do limite inferior do teor de humidade dado pelo Ensaio Proctor definido pelo CE, é necessário adicionar água ao solo. Nestes casos deve estudada a percentagem de água necessária, a taxa de aplicação de água, o método de aplicação e prever eventuais efeitos da chuva.

A água pode ser adicionada em local de empréstimo ou no local da construção do aterro, e deve envolvida no solo para que se distribua uniformemente.

Equipamento:

O equipamento mais usual para este tipo de tratamento é o camião cisterna, ou um tractor com uma cisterna atrelada, constituídos por um tanque de água equipado com bomba de água; possuem aspersores na parte posterior do veículo junto ao rodado, que permitem regular o caudal de água, e pressão.

Após ter sido calculada a quantidade de água necessária, em função da variação do teor de humidade desejado, deve ser implementada a velocidade do veículo, a pressão de água ou usá-la simplesmente por gravidade. O tipo de modelo e a tecnologia também influenciam o dimensionamento.



Fig.30 – Camião cisterna, aplicação água [31].

3.4.7.2 Teor de Humidade superior ao Ótimo

Os solos que apresentam um teor de humidade superior ao dado pelo ensaio Proctor, e que não cumpram o CE, terão de ser secos antes de serem compactados. Estes solos podem ser colocados em local próprio de modo a serem arejados, ou serem escarificados de modo a serem estabilizados antes da sua compactação.

Equipamento:

A mistura do solo poderá realizar-se com um simples tractor agrícola com fresa especial para o efeito, ou, no caso de grandes volumes por equipamento especial, (Figura 31 e 32). Também é vulgar remexer o solo com motoniveladora equipada com um ripper para permitir melhores rendimentos.

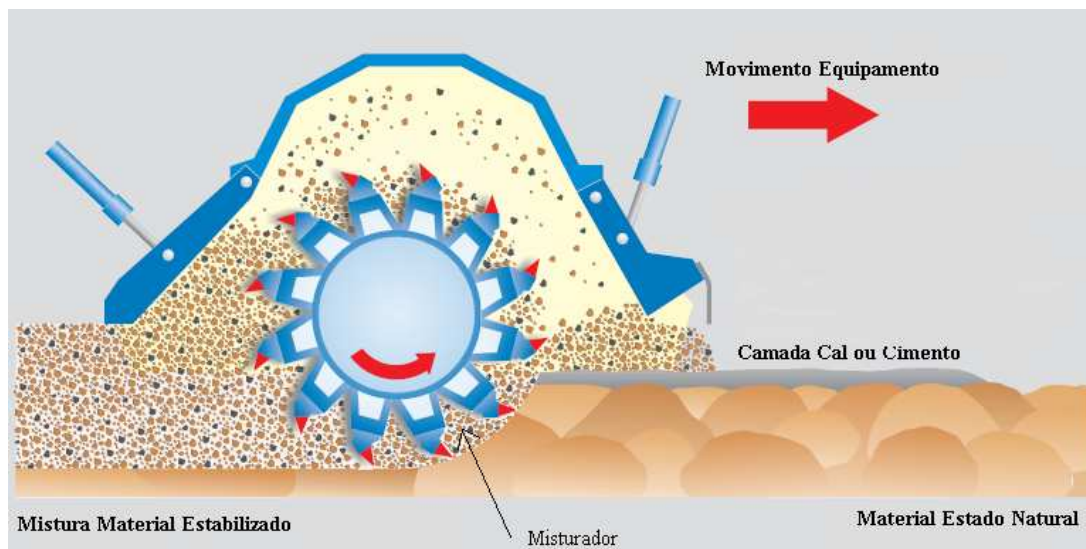


Fig.31 – Esquema funcionamento de um misturador - escarificador (adaptado) [32].



Fig.32 – Estabilizador -misturador de solo BOMAG [27].

3.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE COMPACTAÇÃO SEGUNDO O CADERNO ENCARGOS EP

Neste subcapítulo apresentam-se as considerações tomadas pelo CE do EP relativamente à compactação.

O Caderno de Encargos do EP, no que diz respeito à compactação em aterros de solos, faz referência ao ensaio de compactação (Proctor Modificado). Em relação a este o G.C, para solos coerentes deverá ser de pelo menos 90% no corpo do aterro e 95% na PSA. No caso destes solos se apresentarem muito húmidos com teor de humidade natural superior a 1,4 vezes o teor óptimo de humidade, considera-se que existe o designado “efeito de colchão”, e os valores da compactação relativa devem ser reportados ao Proctor Normal. Estes dados referem-se a solos naturais ou tratados com cal, exigindo-se uma redução da energia de compactação. Neste caso sugere-se que sejam usados cilindros pés de carneiro. No caso de solos incoerentes, com equivalente de areia superior a 30 %, os valores de referência voltam a ser reportados ao ensaio Proctor Modificado e devem ser aumentados para 95% no corpo de aterro.

No caso de aterros em enrocamento ou solo-enrocamento é obrigatória a utilização de cilindros vibradores com carga estática por unidade de comprimento da geratriz superior a 45 kgf/cm. É sugerido que o número de passagens do cilindro seja de 6 a 10 passagens. Neste tipo de aterros o CE define que a espessura de camadas, número de passagens, energia de compactação, a quantidade de água e velocidade de circulação sejam determinadas através de aterro experimental e ensaios de laboratório.

Para solos tratados, em aterro e leito de pavimento, no início da compactação, o material deverá apresentar-se solto, e o teor em água não deverá diferir mais de 1 % da fórmula de trabalho. A compactação deverá efectuar-se longitudinalmente a partir do bordo mais baixo das diferentes faixas, com uma sobreposição mínima de 0,5 metros das sucessivas passagens longitudinais do equipamento.

O equipamento requerido para compactação de solo misturado deverá ser, nas primeiras passagens um cilindro de rolo vibrador com carga estática mínima de 25 kg/cm de geratriz, e seguidamente por meio de cilindro de pneus com carga mínima por roda de 3 toneladas, de forma atingir-se o grau de compactação final superior a 98% relativamente ao ensaio de compactação leve. Antes de colocar o material com mistura deverá garantir-se que o equipamento disponível é capaz de efectuar a compactação em menos de 4 horas, ou 3 horas no caso de a temperatura ser superior a 30°C.

Na compactação de leito de pavimento deverão utilizar-se cilindros de rasto liso com carga estática mínima de 45 kg/cm na geratriz do rolo nas primeiras passagens, e cilindros de pneus com carga por roda mínima de 3 toneladas nas passagens finais. Na última fase da compactação quando os solos a tratar apresentem uma percentagem de material passado no peneiro ASTM 0,075 mm (nº200) superior a 50%, é obrigatória a utilização de cilindros de pneus de modo a evitar o fenómeno de “foliação” (estratificação superficial e fissuração aleatória sem ligação). O CE admite que poderão ser aceites equipamentos mais leves se a espessura da camada for inferior a 20 cm.

3.6. CLASSIFICAÇÃO LCPC/SETRA

3.6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS. TABELAS LCPC/SETRA

O LCPC/SETRA desenvolveu quadros de compactação que enquadram a utilização dos compactadores para cada Solo - Compactador. Os quadros para compactação foram determinados a partir de análises experimentais para um grande número de trechos em obra, com medidas precisas e repetidas da massa volúmica e ajustados por um modelo matemático baseado nesses resultados.

A caracterização divide-se em 2 tipos de obras, Aterro e Leito de Pavimento. No caso de Aterros procura-se limitar os assentamentos no corpo do Aterro, e assegurar a sua estabilidade, enquanto no Leito de Pavimento o objectivo é garantir as características de rigidez e resistência.

Organização dos quadros, parâmetros:

- Material a compactar, pela classificação de solos LCPC
- Equipamento de compactação, pela classificação LCPC
- Espessura da camada a compactar
- Intensidade da Compactação

A Energia de Compactação divide-se em três níveis, Fraca, Média, Intensa. Estes níveis estão definidos nas Condições de Utilização de Material do LCPC. Pode se dizer que a compactação fraca deve ser utilizada em materiais húmidos para evitar a sua saturação e a compactação intensa para materiais secos.

Numa camada compactada, o peso volúmico tem uma variação não linear ao longo da espessura, com a parte inferior a ser a ser condicionante para a verificação do grau de compactação. O LCPC considera o efeito descrito, e releva dois indicadores: a massa volúmica seca média de toda a camada compactada (ρ_{dm}) e a massa volúmica seca no fundo da camada (ρ_{dfc}), o valor médio de uma fatia de 8cm de espessura situada na parte inferior da camada, (Figura 33).

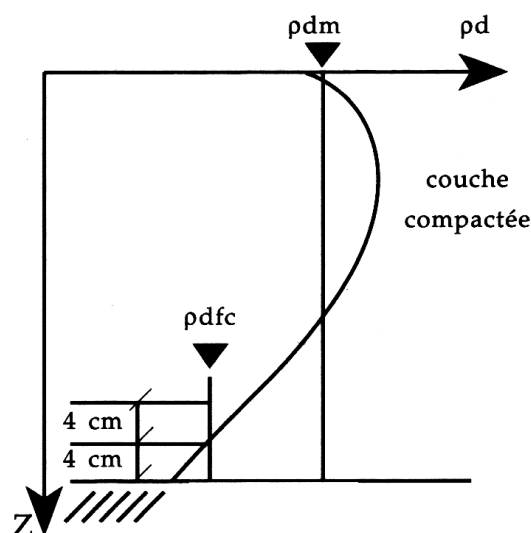


Fig.33 – Variação do peso volúmico seco – espessura da camada

Os quadros de compactação do LCPC, foram determinados de forma a atingirem-se os valores mínimos característicos destes dois indicadores em leito de pavimento e aterro, de:

Leito de Pavimento

- ρ_{dm} maior que 98,5% do peso volúmico para o teor de humidade óptimo (W_{op})
- ρ_{dfc} maior que 96% do peso volúmico para o teor de humidade óptimo (W_{op})

Aterro

- ρ_{dm} maior que 98,5% do peso volúmico para o teor de humidade óptimo (W_{op})
- ρ_{dfc} maior que 96% do peso volúmico para o teor de humidade óptimo (W_{op})

Quando um cilindro compactador não é capaz de compactar uma camada superior a 20cm, não é considerado o valor correspondente. No caso de cilindros de pés de carneiro é considerado que a sua utilização não é eficaz para solos não coesivos, sendo suprimida a situação na tabela correspondente ao equipamento.

Os parâmetros que definem a modalidade de compactação são:

- Q/S;
- Espessura da camada compactada;
- Velocidade de translação do cilindro;

O parâmetro Q/S, é obtido dividindo Q, que é o volume de solo compactado durante um dado tempo e representa o ritmo de produção do atelier do terrapleno, e S a superfície percorrida pelo compactador durante o mesmo tempo. Q/S representa o ritmo de utilização de um compactador e é expresso em m^3/m^2 .

Na prática a superfície percorrida pelo compactador, é obtida pelo produto da distância D medida no conta-quilómetros do equipamento pela largura do rolo.

O valor Q/S representa a espessura do solo compactado por cada passagem do cilindro, ou seja a espessura unitária de compactação. Por exemplo, para um cilindro vibrador tipo V2 na compactação de um solo A2 (areia fina siltosa), com compactação média, tem um valor de $Q/S = 0.035$. Este valor Q/S representa que por cada passagem deste cilindro a espessura compactada será de 3.5cm. Se pretendemos compactar uma camada do solo referido com 17,5cm de espessura, e energia média, terá de efectuar 5 passagens do equipamento.

A espessura da camada compactada indicada nos quadros representa um valor máximo de espessura.

Pela classificação de compactadores LCPC, os cilindros compactadores dividem-se em:

- Compactador de pneus: Pi
- Compactador vibrador de cilindro liso: Vi
- Compactador vibrador pé de carneiro: VPi
- Compactador estático pé de carneiro: SPi
- Placas Vibradoras: PQi

Em que i é o número da classe, e cresce com a eficácia do compactador no seio de cada família.

3.6.2. CILINDROS COMPACTADOR DE PNEUS (Pi)

A classificação é efectuada mediante a carga por roda (CR).

Quadro 14 – Classificação de Cilindros de Pneus LCPC/SETRA

Classificação LCPC	Carga por Roda (KN)
P1	≥ 25 a <40
P2	≥ 40 a <60
P3	≥60

3.6.3. CILINDRO COMPACTADOR VIBRADOR DE CILINDRO LISO (Vi)

A classificação é efectuada a partir do parâmetro $(M1/L)(A0)^{1/2}$ e um valor mínimo de A0. Com M1/L expresso em Kg/cm e A0 em mm. Em que:

M1 é a massa total aplicável sobre a geratriz dum cilindro vibrador ou estático, expresso em Kg.

L é o comprimento da geratriz do cilindro vibrador ou estático, expresso em cm.

A0 é a amplitude teórica a vazio, calculada pela relação momento da excentricidade no veio de balanceamento (me) com a massa da parte vibrante solicitada pelo veio de balanceamento (M0).

$$A0 = 1000 \frac{me}{M0}$$

Quadro 15 – Classificação de Cilindros Vibradores Rolo Liso LCPC/SETRA

Classificação LCPC	$(M1/L)(A0)^{1/2}$	A0
V1	≥15 a <25	≥ 0.6
	≥ 25	≥0.6 a <0.8
V2	≥25 a <40	≥ 0.8
	≥ 40	≥0.8 a <1
V3	≥40 a <55	≥ 1.0
	≥ 55	≥1.0 a <1.3
V4	≥55 a <70	≥1.3
	≥ 70	≥1.3 a <1.6
V5	≥ 70	≥ 1.6

3.6.4. CILINDRO COMPACTADOR VIBRADOR PÉS DE CARNEIRO (Vpi)

Na sua classificação tomam-se os mesmos critérios utilizados pelos cilindros vibradores de rolo liso, (Quadro 16).

Quadro 16 – Classificação de Cilindros Vibradores Pés de Carneiro LCPC/SETRA

Classificação LCPC	$(M1/L)(A0)^{1/2}$	A0
VP1	≥ 15 a < 25	≥ 0.6
	≥ 25	≥ 0.6 a < 0.8
VP2	≥ 25 a < 40	≥ 0.8
	≥ 40	≥ 0.8 a < 1
VP3	≥ 40 a < 55	≥ 1.0
	≥ 55	≥ 1.0 a < 1.3
VP4	≥ 55 a < 70	≥ 1.3
	≥ 70	≥ 1.3 a < 1.6
VP5	≥ 70	≥ 1.6

3.6.5. CILINDRO COMPACTADOR ESTÁTICO PÉS DE CARNEIRO (SPi)

O cilindro compactador estático pés de carneiro é classificado segundo a carga estática média por unidade de largura (M1/L), (Quadro 17).

As características destes equipamentos designados como ‘Tamping Roller’ de alta velocidade, permitem velocidades significativas, na ordem dos 12 Km/h. No entanto o LCPC recomenda que as primeiras passagens sejam executadas com velocidades mais baixas, na ordem dos 3 Km/h.

Quadro 17 – Classificação de Cilindros Estáticos Pés de Carneiro LCPC/SETRA

Classificação LCPC	$(M1/L)$ [kg/cm]
SP1	≥ 30 a < 60
SP2	≥ 60 a < 90

3.6.6. PLACAS VIBRATÓRIAS (PQi)

Como se compreende este tipo de equipamento não é aplicável a aterros de estradas, já que a sua produção é muito baixa. É adequado para utilização em aterros muito reduzidos, em zonas pontuais, como na compactação de solo sobre valas de pequena largura.

Existe uma nota técnica específica para este tipo de equipamentos. No caso de aterros só são considerada as classes com maior capacidade de compactação. É classificada a pressão estática que exerce no solo, com a designação de '(Mg/S), em que Mg representa o peso da placa e 'S' a superfície de contacto da placa com o solo.

Quadro 18 – Classificação de Placas Vibratórias LCPC/SETRA

Classificação LCPC	(M1/L) [kg/cm]
SP1	≥ 30 a <60
SP2	≥ 60 a <90



Fig.34 – Placa Vibradora Bomag BPR 100/80 D [41]

4

CONTROLO DE OBRA. ENSAIOS

O presente capítulo procura fazer uma síntese do controlo que deve ser realizado na construção de aterros, e leito de pavimento. São referidos os ensaios laboratoriais que devem ser efectuados e os campos a verificar. Por fim, e uma vez que é um dos objectivos deste documento, analisam-se com mais pormenor o controlo de execução na compactação, os respectivos ensaios e considerações a ser tomadas.

4.1. CONTROLO DE OBRA EM LEITO DE PAVIMENTO E ATERROS DE SOLOS

Para a verificação das condições de execução do aterro devem ser realizados por parte do empreiteiro, os seguintes Ensaio Laboratoriais.

Quadro 19 – Ensaio para que se verifiquem condições execução em aterro

Ensaio/Controlo	Especificação/Norma
Análise Granulométrica	LNEC E196 -1967
Limites de Consistência	NP143 – 1967
Azul de Metileno	NF P94 – 068
Proctor Modificado	LNEC E197 – 1967
CBR	LNEC E198 -1967
Teor em Matéria Orgânica	LNEC E 201 -1967
Equivalente de Areia	LNEC E199 -1967
Teor em Água Natural	NP 84 -1965
Peso específico das Partículas	NP 83-1965
Presença de Sulfatos	LNEC E 202 -1971

Após a construção do aterro deverá realizar-se o seguinte tipo de controlo na obra, quadro 20.

Quadro 20 – Controlo de execução do aterro

Tipo de Controlo	Objectivos
Inspecção Visual	Devem ser verificados à superfície:
	Solos impróprios
	Pontos de Acumulação de água
	Zonas mal compactadas
Baridade e Teor em Água (<i>in situ</i>)	Material solto
	Verificar GC
	Maximizar resistência
	Diminuir deformabilidade
Espessura da camada	Evitar variações volumétricas
	Verificar espessura definida no Projecto
Ensaio de carga com placa	Avaliar capacidade de suporte da PSA
Nivelamento	Verificar cotas do projecto
Inclinação Transversal	Verificar inclinação de 6% em aterro
	Verificar inclinação de 2,5% em LP

No caso do LP, a análise das irregularidades à superfície deve ser bastante rigorosa para que haja uma correcta sobreposição das camadas superiores definidas no projecto de pavimentos, e para um escoamento correcto, impedindo infiltrações. Nos casos onde se preveja existir um grande intervalo de tempo para a execução das camadas de pavimento, ou quando as condições meteorológicas prevejam pluviosidades significativas deverá revestir-se a superfície do LP para proteger as características do aterro. Uma das soluções será aplicar uma rega de impregnação.

4.2. CONTROLO DE OBRA EM ENROCAMENTOS E SEMI ENROCAMENTOS

Na execução de aterros com material rochoso, referem-se alguns dos ensaios que deverão ser realizados:

- Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas
- Compressão simples
- *Point*

Como já foi dito, não será objecto deste documento a execução de aterros em material rochoso. Neste sentido e sobre o assunto limitar-se-á o desenvolvimento á apresentação dos ensaios a realizar durante a execução deste tipo de aterro.

Quadro 21 – Ensaio para que se verifiquem condições execução de Enrocamento

Ensaio/Controlo	Especificação/Norma	Objectivo	
Análise Granulométrica	LNEC E233 - 1970	Caracterizar solos para reutilização	
Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas	ASTM – D2845-18985	Estimar a resistência à escavabilidade	*
Compressão Simples	ASTM – D2850 1982	Determinar resistência à rotura da rocha	*
Point Load Test	ISRM 72	Avaliar resistência da rocha	*
Resistência à tracção	ASTM - C496	Determinar resistência à tracção da rocha	*
Absorção de água	NP 581	Determinar a resistência a agentes atmosféricos e avaliar a sua variação	*
Alteração por Sulfato de Sódio e Magnésio	LNEC E238 - 1971	Avaliar a alteração da rocha face a agentes químicos e temperatura	*
Desgaste Los Angeles	LNEC E237 - 1971	Avaliar a resistência da rocha ao desgaste, face a cargas dinâmicas	
Desgaste em meio húmido (Slake Load Test)	LNEC E 237 -1971	Avaliar a resistência da rocha ao desgaste, em meio húmido	*
Ensaio de Fragmentabilidade	NF P94 – 066	Avaliar comportamento materiais rochosos pelo LCPC/SETRA	
Ensaio de Degradabilidade	NF P94 - 67	Caracterizar materiais provenientes de rochas argilosas em contacto com água	
Dimensão da Máxima das Partículas	CE - EP	Evitar problemas na operação com equipamento e compactação	
Forma dos Blocos Pétreos	CE - EP	Evitar formação de estruturas lamelares	

4.3. NORMAS EUROPEIAS - EN

De acordo com a Directiva Europeia 89/106/CE para a homogeneização da marcação CE, os materiais deverão ter um controlo segundo as normas a seguir expostas [33].

Encontramo-nos numa fase de transição, pelo que parece pertinente fazer uma simples referência aos ensaios a entrar em vigor, na consulta dos quadros abaixo. Pela designação do ensaio e pela respectiva norma facilmente se estabelece uma equivalência entre as normas vigentes e aquelas que deverão ser utilizadas.

4.3.1. NORMAS EN DE MATERIAL PARA ATERRO

Pela EN 13242:2002 com marcação CE: 01.06.2004, os ensaios para materiais em aterros de solos, são os referidos no quadro 22.

Quadro 22 – Normas EN de material para aterro

Ensaio	Norma
Perda por ignição	EN 196-2
Análise granulométrica. Método de peneiração	EN 933-1
Forma das partículas. Índice de achatamento	EN 933-3
Forma das partículas. Índice de forma	EN 933-4
Percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	EN 933-5
Teor de finos. Ensaio do equivalente de areia	EN 933-8
Teor de finos – Ensaio do azul de metileno	EN 933-9
Resistência ao desgaste – Micro Deval	EN 1097-1
Resistência à fragmentação	EN 1097-2
Massa volúmica e absorção de água	EN 1097-6
Resistência ao gelo/degelo	EN 1367-1
Ensaio de sulfato de magnésio	EN 1367-2

Quadro 22 (continuação) – Normas EN de material para aterro

Ensaio	Norma
Teste de ebulição para basalto Sonnerbrand	EN 1367-3
Análise química	EN 1744-1
Água solúvel constituinte	EN 1744-3

4.3.2. NORMAS EN DE MATERIAL PARA ENROCAMENTO E SEMI ENROCAMENTO

Pela EN 13383-1:2002 com marcação CE: 01.06.2004, os ensaios para materiais para enrocamentos, são os referidos no quadro 23.

Quadro 23 – Normas EN de material para enrocamento

Ensaio	Norma
Análise granulométrica. Método de peneiração	EN 933-1
Forma das partículas. Índice de achatamento	EN 933-3
Resistência ao desgaste – Micro Deval	EN 1097-1
Ensaio de sulfato de magnésio	EN 1367-2
Análise química	EN 1744-1
Água solúvel constituinte	EN 1744-3
Distribuição granulométrica	EN 13383-2
Distribuição de massa	
Densidade	
Absorção de água	
Gelo e degelo	
Ebulição do basalto Sonnerbrand	

4.4. CONTROLO DA COMPACTAÇÃO

4.4.1. DETERMINAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA

Os métodos vulgarmente utilizados para a determinação do teor em água no laboratório são:

- Método de Estufa;
- Método de infravermelhos.

Os ensaios referidos baseiam-se no mesmo procedimento, diferindo apenas no processo de secagem. O procedimento do ensaio consiste em submeter uma amostra de solo, depois de pesada a um processo de secagem em estufa durante 24 horas a uma temperatura de 105°C, de modo a que toda a água existente nos vazios se evapore. Quando terminar a secagem efectua-se à pesagem da amostra seca, e calcula-se o teor de humidade. Este ensaio encontra-se descrito na Norma NP-84 Solos. A vantagem do método de infravermelhos face a ao método de estufa, é que a secagem se efectua em 30 minutos.

Os métodos vulgarmente utilizados para a determinação do teor em água em obra são:

- Método do speedy;
- Método do álcool;
- Método reactivo ou gamadensímetro.

O método de speedy consiste em fazer reagir carboneto de cálcio no interior da garrafa speedy. A reacção da água no solo com o carbonato de cálcio dá origem à libertação de gás acetileno que origina um aumento da pressão no interior da garrafa. Para maior quantidade de água no solo a pressão referida será maior. É normalmente utilizado para rápidas determinações do teor de água em solos granulares, e não funciona com tanta precisão em solos finos pela dificuldade em desagregar as partículas.

O método do álcool consiste na adição de álcool etílico a uma amostra de solo com a sua posterior queima, o teor em água é determinado por uma relação entre o peso da amostra húmida e o peso da amostra seca. Este ensaio não é muito utilizado, salvo nas raras excepções em que é requerido pela Fiscalização e para o caso de solos granulares.

O método reactivo, consiste na utilização de um aparelho designado de gamadensímetro, que mede teores de humidade e o peso volúmico seco do solo. A medição do teor de humidade faz-se por emissão de neutrões rápidos no solo, que por colisão com os átomos de hidrogénio se transformam em neutrões lentos. Quanto maior o número de neutrões lentos registados, maior será o teor de humidade do solo.



Fig. 35 – Equipamento Ensaio Speedy [34]

4.4.2. PESO VOLÚMICO SECO IN SITU

Os ensaios para compactação in situ, dividem-se em dois grandes grupos, os destrutivos e não destrutivos.

Dentro dos ensaios destrutivos, temos:

- Método da garrafa de areia;
- Método do balão ou densímetro de membrana;
- Método do volume de água deslocado;
- Extractor ou anel volumétrico;

O método garrafa de areia é o método destrutivo mais utilizado no nosso país (Figura 34). Este método descrito pela especificação LNEC E-204, consiste em determinar o volume de cavidades abertas no terreno. Pela relação do peso de solo retirado e do teor de humidade determinado, é possível determinar o peso volúmico seco.

O método do balão, é outro dos métodos destrutivos também utilizados que requer a abertura de uma cavidade no solo. Não existe especificação própria nacional para este ensaio. Deve-se seguir a norma ASTM D-1556. Não deve ser aplicado em solos poucos consistentes, porque a pressão exercida pelo balão pode alterar o volume da cavidade.

O método do volume de água deslocado encontra-se descrito na especificação LNEC E-205. É aplicável em solos com alguma coesão. Este método consiste em determinar o volume de uma amostra colhida no terreno revestida em parafina, e a sua pesagem. A determinação do teor de humidade do solo colhido permite a determinação do peso volúmico seco.

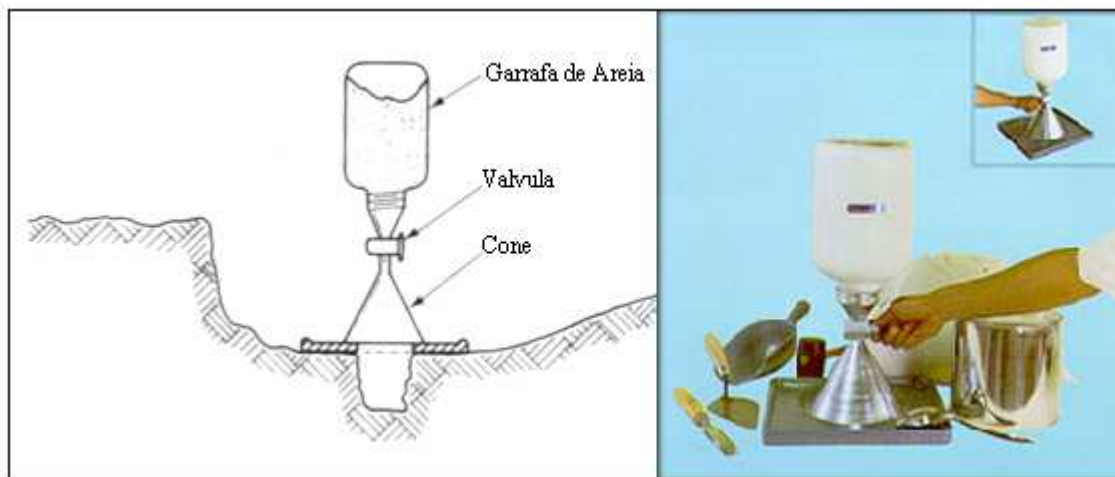


Fig.36 Ensaio Garrafa de Areia [34]

O ensaio não destrutivo constituído pelo método nuclear radioactivo utiliza o equipamento gamadensímetro. Este método é sem dúvida o mais prático: é rápido, e fácil de efectuar leituras o que permite efectuar mais ensaios com menor custos.

O gamadensímetro pode ter a sua fonte de emissão colocada de duas formas: por transmissão directa, com a fonte cravada no solo ou por fonte indirecta com o aparelho sobre o solo e a respectiva fonte junto à superfície do solo;

Este equipamento é constituído por uma fonte radioactiva e por receptor contador. A fonte pode emitir raios gama para determinação do peso volúmico ou neutrões, com os quais se determina o teor de água.

A transmissão directa é utilizada quando pretendemos efectuar medições a maiores profundidades. A precisão, depende do tempo de medição.

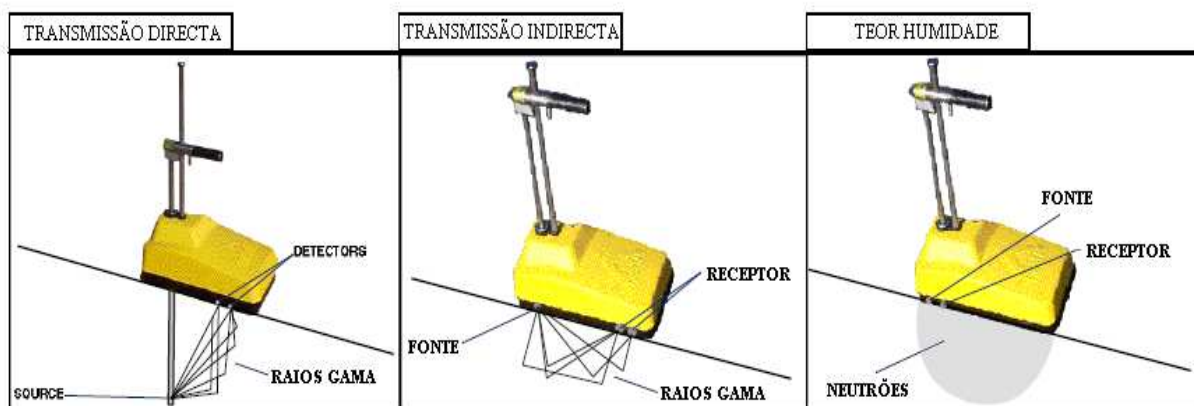


Fig.37 Gamadensímetro (adaptado) [35].

Compactação Insuficiente

Uma compactação insuficiente, avaliada pelo GC requerido pelo Dono de Obra, poderá dever-se a um dos seguintes problemas:

- Número insuficiente de passagens do cilindro
- Peso insuficiente do cilindro ;
- No caso de serem utilizados cilindros vibradores, a utilização de uma frequência inadequada;
- Defeitos no rolo do cilindro;
- Tipo de equipamento não adequado;
- Alteração no tipo de solo.

Todos estes problemas poderão ser evitados com uma boa análise prévia à compactação. Se por algum motivo não obtivermos os resultados pretendidos, deveremos então actuar nos factores atrás descritos.

5

CUSTOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O custo de um equipamento envolve três grandes parcelas o custo de propriedade, custo de operação e custo de manutenção. É peremptório que os usuários devam equilibrar a produtividade e o custo para atingirem o desempenho ideal da máquina. O máximo desempenho da máquina é dado por:

$$\frac{\text{Menor custo horário possível}}{\text{Maior produtividade horária possível}}$$

É assim necessário distinguir a hora produtiva da hora improdutiva. A hora produtiva de um equipamento é a hora de trabalho efectivo, em que o seu custo é dado pelas parcelas de custo de propriedade (depreciação e juros), custos de operação (pneus, combustível, lubrificantes, dependendo do método de análise o custo do operador) e custos de manutenção. A hora improdutiva corresponde à hora de trabalho em que o equipamento está disponível mas não está a ser utilizado, tem em conta apenas o custo de propriedade e o custo do operador dependendo da situação. A título de exemplo, apresenta-se o caso de um cilindro compactador que se encontra a aguardar que seja reposta uma nova camada de material.

“ Nas grandes empresas de construção de estradas, o equipamento é debitado às obras por Preços de Transferência Interna (PTI) calculados ao nível do Departamento de Equipamento. Parte diária de equipamento, uma máquina pode estar a ser utilizada para várias funções num dia. Através dos PTI's fornecidos por valor/hora e de partes diárias de equipamento, onde deverá ser mencionada a tarefa(s) efectuada(s), é calculado o custo do equipamento em cada tarefa.” [36].

Como se compreende, os custos horários para um determinado modelo, poderá variar significativamente em função do tipo de trabalho, do preço dos combustíveis, das taxas de juros, entre outros.

5.2. Os Custos

5.2.1. CUSTOS DE PROPRIEDADE

A aquisição de um equipamento representa um investimento através de um custo anual do capital aplicado, normalmente convertido em custo hora. De modo a rentabilizar o investimento, deve ser recuperada durante a vida útil do equipamento, uma importância igual à sua perda em valor de mercado, ou seja deverá apresentar um cashflow positivo para o período de vida útil previsto para o equipamento. O período de vida útil deverá ser minuciosamente determinado com base na consulta do manual de fabricante e utilização prevista, e/ou complementado pela experiência da empresa com registos efectuados para equipamentos semelhantes.

O custo de propriedade engloba o valor mais significativo do equipamento, a depreciação. No momento em que o bem é adquirido, o equipamento começa imediatamente a desvalorizar, devido a inúmeros factores, como sejam a idade, o tempo de uso, o desgaste da máquina e obsolescência, com o constante desenvolvimento de novos modelos e tecnologias por parte das marcas.

O cálculo da depreciação pode ser efectuado por vários métodos. O método vulgarmente utilizado, é o linear [37] em que se admite uma variação linear da desvalorização do equipamento na sua vida, dada por:

$$\frac{\text{Valor aquisição} - \text{Valor residual}}{\text{Vida Útil (horas)}}$$

Dentro de outros métodos destacam-se, o método das unidades de produção que considera que a amortização é apenas resultado da utilização do equipamento, e que a passagem do tempo não representa nenhum papel no processo de depreciação, normalmente calculado em função do número de unidades previstas na utilização da vida útil do equipamento. No caso da unidade aplicada ser o quilómetro, dará origem a um custo €/Km. Outro método também utilizado, o da depreciação decrescente que considera que nos primeiros anos existe uma elevada depreciação, que se vai reduzindo até ao limite do período de vida útil do equipamento. Poderão ainda existir considerações tributárias por parte das empresas, que levarão a um estudo específico para o cálculo da depreciação, já que devido ao elevado preço de alguns equipamentos, é, em alguns casos, preferível manter esses equipamentos em funcionamento após o período expectável de vida útil. Pode ainda acontecer a situação oposta, a opção de reduzir o período de utilização do equipamento, caso existam incentivos fiscais. As estatísticas revelam que mais de 90% das grandes empresas de construção a nível mundial optam por estimar a depreciação por um método linear, com um valor residual estimado para o equipamento.

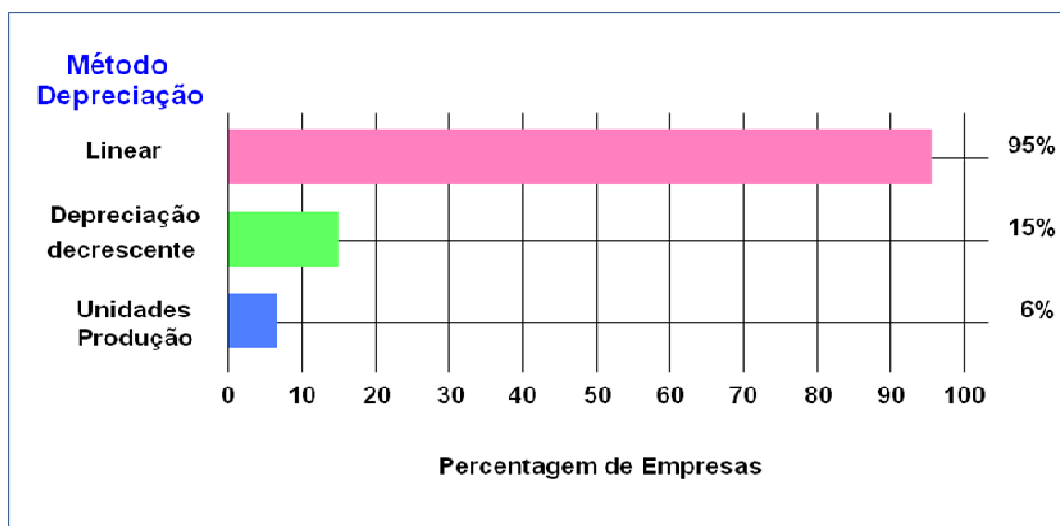


Fig.38 Método de depreciação utilizado por 600 grandes empresas mundiais.

Por outro lado quando o construtor investe na aquisição de um equipamento, está a realizar um investimento, com uma determinada quantidade de dinheiro que se não fosse investido na aquisição do equipamento, seria empregue noutra aplicação financeira que garantiria uma taxa mínima de retorno, os juros de investimento. O cálculo dos juros baseia-se no conceito de investimento médio pois o valor inicial da aplicação será depreciado anualmente, até atingir o valor residual ao fim da vida útil. O valor do investimento médio anual é dado por:

$$I_m = (V_0 - V_r) \frac{(n + 1)}{2n} + V_r$$

Em que :

V_0 = valor inicial

V_r = valor residual

n = vida útil do equipamento, em horas

Os juros horários do investimento são dados por:

$$J_h = \frac{I_m \cdot j}{a}$$

Em que:

j = taxa de juro do mercado

a = utilização anual do equipamento, em horas

Devem ainda ser considerados os custos de seguro e impostos de propriedade.

5.2.2. CUSTOS DE OPERAÇÃO

São os custos considerados quando o equipamento se encontra em operação, a realizar algum trabalho, ou seja são custos variáveis. Associados a este custo estão o preço dos combustíveis, lubrificantes, filtros, pneus, e custo de mão-de-obra e encargos sociais. As parcelas deste custo podem ser estimadas tendo por base os dados relativos a cada equipamento fornecidos pelo fabricante, ou tendo por base registos efectuados pela empresa por observação dos equipamentos em situações similares.

Com o disparar do preço dos combustíveis, esta parcela é dos que mais intervêm no custo horário final. Para a determinação do custo associado, deve ser estimada com precisão a subida diária que se faz sentir no preço dos combustíveis, e as condições em que o equipamento vai ser utilizado que irá fazer variar o consumo médio horário.

Os lubrificantes utilizados dependem do equipamento, mas muito sucintamente pode referir-se, o óleo do cárter do motor, óleo para a transmissão, e óleo para comandos e sistemas hidráulicos.

O custo dos filtros irá depender do número de unidades de filtragem existentes na máquina. No caso de não existirem dados específicos do fabricante será correcto estimar o custo dos filtros como sendo metade das despesas dos lubrificantes.

O custo de mão-de-obra deve ser associada a cada hora de operação. O valor previsto depende da especialização do manobrador e da necessidade ou não de um ajudante para execução da tarefa. Deverão ainda ser tidos em conta os encargos sociais vigentes.

O cálculo do custo dos pneumáticos é similar ao da depreciação, bastando dividir o custo de vida dos pneus pelo seu período de vida útil. Neste caso, obviamente, sem valor residual. No acto da compra do equipamento será boa política retirar o valor dos pneus do custo de aquisição inicial e entrar com esta parcela no custo de operação.

5.2.3. CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Em bom rigor, os custos de manutenção poderão ser considerados uma despesa operacional, já que incorre directamente na razão da utilização do equipamento, e conseqüente desgaste de peças. No entanto não se poderá dizer que estes custos sejam lineares. Apresentam-se como uma linha ascendente, com algumas descontinuidades, ou seja enquanto a máquina é nova apresenta uma elevada fiabilidade; com o decorrer do tempo aumenta a necessidade de efectuar reparações, e o tempo em que a máquina vai estar parada para manutenção também será maior. Poderão ser estimados tendo em conta aproximações efectuadas pelo fabricante, ou por estatísticas efectuadas pela empresa para equipamentos do mesmo tipo ajustadas à inflação do preço das peças e da mão-de-obra associada. Estes custos incluem actividades de limpeza, lavagem, inspecção, ajuste, calibração, trocas de rotina, reparações e substituição de peças e partes danificadas ou defeituosas. Uma correcta política de manutenção do equipamento, com um plano de revisões e manutenção como acção preventiva e não interventiva diminuirá certamente os custos associados e aumentará o período de vida da máquina e o aumento do valor residual do equipamento para o período estipulado.

5.2.4. CUSTOS INDIRECTOS

Sobre o custo directo de utilização obtido pela soma das parcelas anteriormente descritas, deverão ser acrescidas as despesas gerais da empresa, tais como as despesas com instalações, publicidade, administração, impostos e outras. Estas despesas subsistem no caso do equipamento estar inactivo. Dependendo da empresa, um bom valor para aproximação deste custo será de aproximadamente 35% do custo directo.

5.2.5. CUSTO UNITÁRIO DE UM SERVIÇO DE TERRAPLENAGEM

O custo unitário de um serviço de terraplenagem inclui o custo horário dos diversos equipamentos empregues no trabalho e os seus respectivos custos horários. Pode assim obter-se o custo unitário como sendo:

$$\text{Custo unitário do serviço} = \frac{\sum \text{Custo horário}_{\text{equipamento utilizado}}}{\sum \text{Produção horária da equipa}}$$

No caso de um trabalho de execução de um aterro, deverão ser calculados os custos unitários que englobam todos os serviços associados, como escavação, carga, transporte, descarga, compactação, entre outros. É necessário ter algum cuidado em associar o custo unitário de transporte ao custo unitário de serviço, sendo prática corrente exprimir o custo de transporte separado das outras tarefas, e expresso através do momento de transporte, de forma a que possa ser aplicado a distintas distâncias desde que a faixa de valores não se estenda muito.

5.3. CUSTOS PELO MANUAL DE PRODUÇÃO CATERPILLAR

O fabricante de equipamentos Caterpillar apresenta um manual muito completo que permite estimar a produção de cada equipamento [29], o consumo de combustível, lubrificantes, filtros, manutenção e horas de vida útil previstas para cada equipamento. Apresenta ainda um processo de cálculo generalizado para a determinação do custo horário de propriedade e operação.

O método utilizado distingue dois custos: o custo de propriedade e custo de operação.

5.3.1. CUSTO DE PROPRIEDADE

Para o cálculo do custo de propriedade é aplicado o método simples de depreciação linear. O manual apresenta um guia de depreciação para cada equipamento, em que são distinguidas três zonas. As zonas consideradas foram classificadas em função das condições de aplicação e operação, sendo que a Zona A é aplicável para condições de trabalho moderadas, a zona B para condições médias e a zona C para condições severas.

No caso de Cilindros Compactadores o manual classifica o período de depreciação.

Quadro 24 – Classificação tempo vida útil equipamento em função zona aplicação [29]

ZONA A (Moderada)	ZONA B (Média)	ZONA C (Severa)
15000 Horas	12000 Horas	8000 Horas
Serviços gerais leves. Serviços em aterros planos. Poucas cargas de impacto.	Condições de utilização médias.	Condições de alto impacto. Compactação de aterros com grande inclinação.

Para o cálculo do custo de propriedade devem ser então considerados:

- Preço de entrega do equipamento, ao qual deverá ser deduzido o valor dos pneus;
- Período estimado de propriedade em anos;
- Utilização estimada em horas;
- Valor residual do equipamento estimado;

- Estimativa do custo dos juros;
- Valor do seguro;
- Valor dos impostos de propriedade.

O valor a ser recuperado por trabalho é obtido pela diferença entre o valor pago pelo equipamento e o valor residual do equipamento. O custo por hora será igual ao valor a ser recuperado, dividido pela utilização total do equipamento em horas.

O custo dos juros pode ser estimado como sendo a média de investimento anual durante um período de uso, com a taxa de juro e utilização anual esperada:

$$\frac{\left[\frac{N+1}{2N} \cdot \text{Valor aquisição do equipamento} \right] \cdot (\% \text{ de juros simples})}{\text{horas/ano}}$$

em que N é o número de anos de utilização do equipamento.

O custo de seguro pode estimado como sendo:

$$\frac{\text{Valor de Seguro}}{n^{\circ} \text{ de anos}}$$

ou

$$\frac{\left[\frac{N+1}{2N} \cdot \text{Valor aquisição do equipamento} \right] \cdot (\% \text{ de taxa de seguro})}{\text{horas/ano}}$$

O custo dos impostos pode estimado como sendo:

$$\frac{\text{Valor dos Impostos}}{n^{\circ} \text{ de anos}}$$

ou

$$\frac{\left[\frac{N+1}{2N} \cdot \text{Valor aquisição do equipamento} \right] \cdot (\% \text{ de imposto})}{\text{horas/ano}}$$

O custo final de propriedade é obtido pela soma do custo por hora atrás referido, do custo de juros, do custo do seguro e do custo de impostos de propriedade.

5.3.2. CUSTO DE OPERAÇÃO

Como já foi referido o consumo de combustível deverá ser avaliado em função dos trabalhos idênticos já realizados. No entanto, cada fabricante prevê um consumo para cada equipamento. No caso da Caterpillar, o consumo de combustível é ajustado a cada utilização com uma correcção através do factor de carga. Este representa a máxima potência nominal para o valor 1,0, o que raramente acontece visto existirem paragens e manobras no decorrer da operação. Tendo isto em conta, o manual apresenta um guia para o factor de carga, que se distingue em baixo, médio e alto dependendo da aplicação.

No caso de compactadores os factores de carga considerados são:

- Alto: vibração de 80-100%;
- Médio: vibração de 50-80%;
- Baixo: vibração de 30 a 50%.



Fig.39 – Caterpillar 815F [18]

A título de exemplo, um compactador de solo do fabricante Caterpillar modelo 815F, apresenta os seguintes consumos horários:

Quadro 25 – Quadro Indicativo do consumo médio horário modelo Caterpillar 815F [29].

Factor de carga BAIXO	Factor de carga MÉDIO	Factor de carga ALTO
26 – 30	36 - 42	44 – 47
(Litros/hora)	(Litros/hora)	(Litros/hora)

O consumo horário aproximado de lubrificantes é sugerido no manual, assim como o intervalo de troca dos filtros.

Para o cálculo da vida útil dos pneus, é possível utilizar as curvas de vida útil dos pneus expressas no manual. Para consulta das referidas curvas é necessário distinguir três zonas de aplicação:

- ZONA A: os pneus apresentam um desgaste em toda a faixa devido a abrasão;
- ZONA B: os pneus desgastam-se normalmente, podendo existirem cortes e rasgos causados por pedras, impactos e sobre carregamentos;
- ZONA C: os pneus não sofrem desgaste em toda a faixa devido à abrasão, acabando por se deteriorarem devido a cortes causados por pedras, impactos e sobre carregamentos.

Como se compreende o desgaste dos pneumáticos será maior em equipamentos de transporte, e pás carregadoras. No caso de cilindros compactadores simples, com um eixo apenas de rodado pneumático, ou cilindros de pneus, trabalham tipicamente em zona A, sendo o seu desgaste apenas por abrasão. Os valores típicos para o período de vida nestas condições serão de 8000 a 12000 horas.

No caso de situações mais particulares em que se pretende determinar o período de vida útil do pneu com mais precisão, poderão ser seguidos sistemas de cálculo dos fabricantes de pneumáticos.

O custo horário do pneu é assim dado por:

$$\text{Custo horário de pneu} = \frac{\text{Custo de reposição de pneu}}{\text{Vida útil do pneu estimada em horas}}$$

No referido manual os custos de manutenção são incluídos no custo de operação, e designados de reservas para reparos. Os custos fornecidos pelo manual são obtidos por uma média, que será afectado por um factor de correcção de zona. O custo horário resultante da aplicação desses factores básicos e multiplicadores será a média do custo horário durante todo o período, ou seja produz um excesso de custo para as primeiras horas de uso, que cobrirão os aumentos de reparação que a máquina vai requerer à medida que envelhece. Poderão ainda ser aplicados factores de extensão de vida útil, para períodos de depreciação mais elevados.

No caso de Compactadores de Solos, a distribuição de custos apontada é de 60% para peças e de 40% para mão-de-obra.

5.4. CUSTOS PELO MANUAL DE MOVIMENTO DE TERRA VOLVO

O manual do fabricante Volvo [38] segue a mesma filosofia de cálculo para o custo horário. Apresentam-se resumidamente as parcelas que intervêm no custo a determinar:

- Preço de aquisição;
- Preço de aquisição sem pneumáticos;
- Tempo de depreciação;
- Valor Residual;
- Juros;
- Custo dos Juros;
- Imposto do equipamento;
- Seguros;
- Preço do combustível;
- Consumo do combustível;
- Preço do óleo;
- Consumo do óleo;
- Preço dos pneumáticos;
- Tempo de vida dos pneumáticos;
- Reparações e manutenção;
- Custo do operador;
- Horas de trabalho por ano.

O manual apresenta um modelo de cálculo para determinação do custo de manutenção. Para o tempo de depreciação escolhido existe um custo de reparação associado, ao qual são aplicados factores correctivos em função do local de trabalho, operador, manutenção diária e modo como se efectuam as reparações.

Quadro 26 – Relação tempo de depreciação – custos de manutenção, pela Volvo.

Tempo de depreciação em horas	4000 h	6000 h	8000 h	10000 h	12000 h	14000 h
Custos de Manutenção						
(% do preço de aquisição)	12%	20%	29%	39%	49%	61%

Quadro 27 – Factor correctivo para o tempo de depreciação em função das condições, segundo Volvo.

Factores Correctivos	Valor	Condições
Local de Trabalho	0,75	Condições muito boas
	0,9	Condições boas. Areia ou material fino.
	1,0	Condições Normais. Construção de estradas em geral
	1,2	Condições difíceis. Manipulação de rochas.
	1,5	Condições muito difíceis.
Operador	1,0	Experiência superior a 1 ano.
	1,1	Experiência de 6 meses a 1 ano
	1,2	Experiência inferior a 6 meses.
Manutenção Diária	1,0	Segundo as recomendações do fabricante.
	1,1	Esporádica.
	1,3	Deficiente.
Reparação	0,9	Contrato de serviço com oficina oficial do fabricante.
	1,0	Em oficina oficial do fabricante.
	1,05	Oficina própria.
	1,15	Outras oficinas.

O cálculo do preço horário é dividido em custo fixo por hora, custo variável, e custo do operador.

Quadro 28 – Quadro de cálculo para custo de equipamento.

Veículo: _____	
Custos fixos por hora:	
Depreciação:	_____
Juros:	_____
Impostos:	_____
Seguros:	_____
TOTAL CUSTO FIXO:	_____
Custos variáveis por hora:	
Combustível:	_____
Óleos, lubrificantes, filtros:	_____
Pneumáticos:	_____
Reparação e manutenção:	_____
TOTAL CUSTO VARIÁVEL:	_____
Custos operador(es) por hora:	_____
TOTAL CUSTO POR HORA:	 (€/hora)

6

SOFTWARE SOFTCOMPACT 1.0

Um dos objectivos na execução deste projecto foi o cálculo de rendimentos teóricos e a criação de um mapa de quantidades e orçamento. Após uma análise ao mercado verificou-se que o cálculo da compactação numa obra de terraplenagem, é efectuado por métodos empíricos, com recurso a tabelas, ou bases de dados de solo compactado o que é um processo bastante moroso. Tendo em conta que a Engenharia Civil actual utiliza processos que procuram facilitar o cálculo e ajustar-se a situações não previstas, e ainda na perspectiva de inovar, optou-se pelo desenvolvimento de um programa que permitisse o cálculo facilitado da compactação. O software criado tomou a designação de SOFTCOMPACT 1.0. A linguagem eleita para a programação foi a .NET incluída no Visual Studio 2005 da Microsoft [39]. Em complemento ao programa foi necessária a utilização de um motor de base de dados que permitisse guardar informação, o motor utilizado foi o SQL Server 2005 [40] também da Microsoft.

6.1. A CONCEPÇÃO DO PROGRAMA

Para proceder ao cálculo da compactação foi necessário utilizar uma base sólida, que fornecesse garantias de qualidade nos resultados obtidos. Não fugindo ao habitualmente adoptado para o cálculo de uma obra de compactação em Portugal, utilizaram-se como base as tabelas de compactação do LCPC/SETRA. Como já foi referido em capítulo anterior, este manual é constituído por tabelas para consulta que permitem calcular a produção, em função do tipo de solo, do equipamento de solo e da espessura da camada. Com o desenvolver deste software pretende-se que o processo de consulta das tabelas se faça de forma mecanizada e rápida.

Pretendeu-se que o programa fosse acessível, sem que fosse necessária uma formação específica para a sua utilização. Para tal optou-se por uma disposição de visualização a que qualquer utilizador estivesse habituado, uma janela em ambiente Windows.

O programa é constituído por vários módulos, de modo a permitir ao utilizador, o cálculo de uma obra de compactação sem recurso a outros elementos ou manuais. Podem classificar-se os módulos do programa em dois grupos: módulos de consulta e módulos de cálculo.

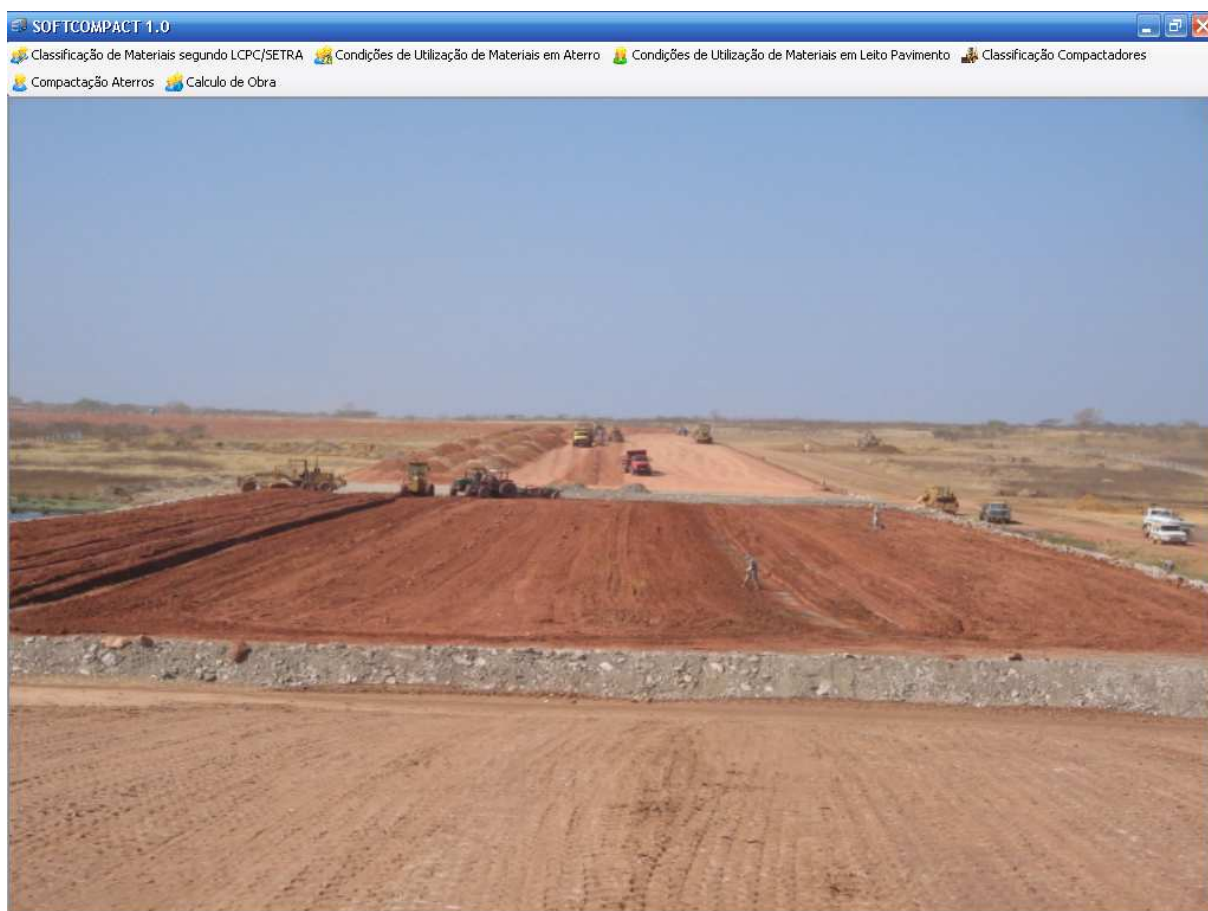


Fig.40 - Janela Principal software SOFTCOMPACT 1.0

6.2. MÓDULOS DE CONSULTA

Uma vez, que o utilizador terá, à partida, de conhecer o material que irá aplicar, é essencial que o possa classificar e que conheça as suas condições de utilização. Optou-se assim pela utilização de três módulos de consulta: classificação de materiais segundo o LCPC/SETRA, condições de utilização de materiais em aterro e condições de utilização de materiais em leito de pavimento.

Na figura 41 apresenta-se a janela que permite a consulta da classificação do material segundo o LCPC/SETRA. Conhecida a dimensão do material e o VBS é possível abrir uma tabela para consulta.

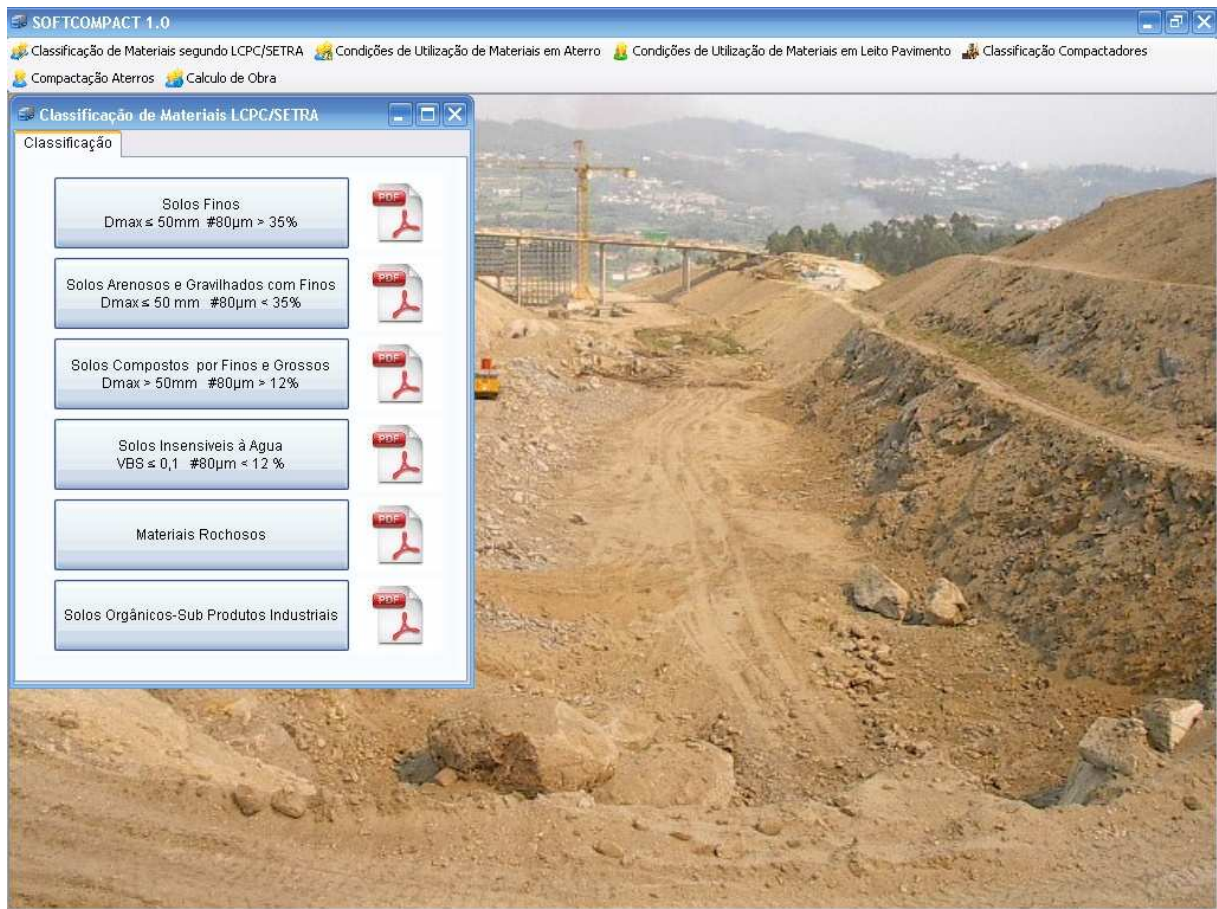


Fig.41 - Janela para Classificação de Materiais segundo LCPC/SETRA

6.3. MÓDULOS DE CÁLCULO

Os módulos de cálculo são três: classificação de compactadores, compactação de aterros e cálculo de obra.

6.3.1. MÓDULO CLASSIFICAÇÃO DE COMPACTADORES

Para cada tipo de cilindro existe uma classificação de cilindros pelo LCPC, já descrito no capítulo de compactação. O utilizador deve seleccionar o cilindro e introduzir o parâmetro correspondente. Pressionando o botão de cálculo é fornecida a classificação.

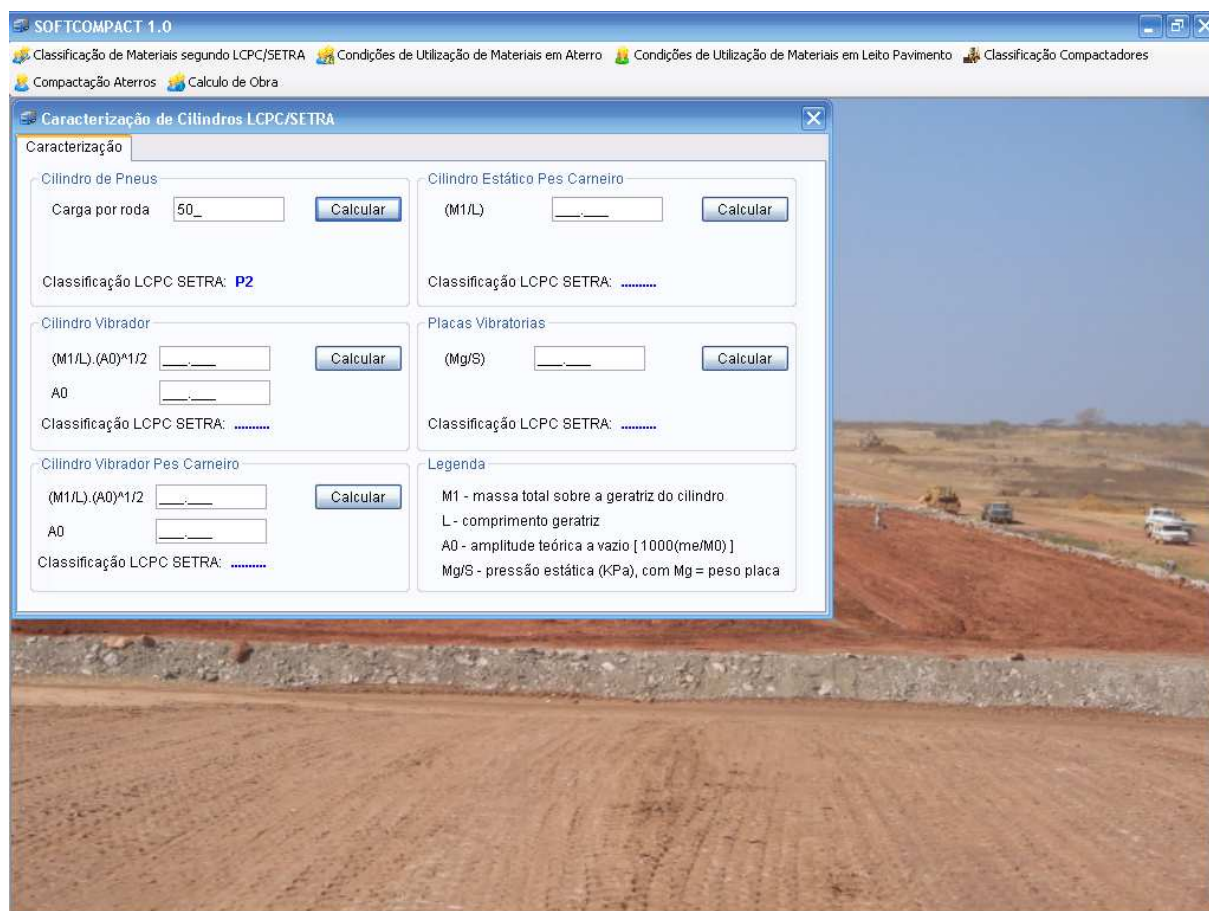


Fig.42 Janela para Classificação de Cilindros LCPC/SETRA

6.3.2. MÓDULO COMPACTAÇÃO DE ATERRO

Na versão inicial (BETA) do programa prevê-se apenas o cálculo da produção de compactação com recurso a um único cilindro. Não é mais do que a consulta das tabelas de forma automática, e a determinação do volume de solo compactado por hora. Para que se procedesse à consulta foi necessária uma base de dados com a inserção das tabelas de compactação LCPC. Introduziram-se assim todas as tabelas de compactação existentes no LCPC numa base de dados SQL.

O acesso às tabelas de compactação é possível definindo o tipo de solo, tipo de cilindro e tipo de compactação. Com a introdução destes dados o utilizador pode visualizar numa sub-janela os dados da respectiva tabela. Esta consulta permite que o utilizador conheça imediatamente qual a espessura máxima que a camada pode ter. Como se compreende é uma mais valia, antes de proceder ao cálculo do rendimento poder visualizar a espessura máxima admitida, a velocidade máxima e o débito esperado para a velocidade máxima.

Os restantes dados a introduzir para o cálculo da produção são a espessura da camada, o coeficiente de rendimento, a opção de utilização de um cilindro mono ou tandem (através do N/n), a largura do cilindro e a velocidade.

A velocidade adoptada, em princípio, será sempre a velocidade máxima de modo a atingir-se a produção máxima. No entanto, considera-se pertinente neste módulo o utilizador poder definir uma velocidade menor, para casos de excepção.

Os dados anteriormente citados encontram-se todos validados, ou seja se os valores não se encontrarem dentro do intervalo permitido, o programa não executa o cálculo e coloca um aviso de dados inválidos, como é o caso por exemplo o caso de uma espessura introduzida ser superior à máxima ou um N/n diferente de 1 ou 2.

Na figura seguinte apresenta-se um exemplo de cálculo para um solo tipo B4, tipo de compactação média, com um cilindro de pneus do tipo P1, com os respectivos resultados a serem apresentados no quadro do lado direito. A espessura da camada a compactar igual a 25 cm foi neste caso igual à máxima dada pela tabela do LCPC, a velocidade adoptada igual a 5 Km/h igual à máxima admitida, e o cilindro é um tandem (N/n=2) com uma largura de 2 metros. O cilindro apresenta assim um débito teórico de 1200 m³, que afectado pelo factor de correcção do rendimento, neste caso admite-se 0.6, compacta 720 m³ em uma hora. A indicação a dar ao manobrador serão 5 passagens a uma velocidade de 5 Km/h.

SOFTCOMPACT 1.0

Classificação de Materiais segundo LCPC/SETRA Condições de Utilização de Materiais em Aterro Condições de Utilização de Materiais em Leito Pavimento Classificação Compactadores

Compacção Aterros Cálculo de Obra

Compacção de Aterro

Compacção de Aterro

Tipo Solo

A1
A2
A3
B1
B2
B3
B4
B5
B6
C1A1
C1A2
C1A3
C1B1

Tipo Compactação

Compactação Fraca
Compactação Média
Compactação Intensa

Tipo Compactador

P1
P2
P3
V1
V2
V3
V4
V5
VP1
VP2
VP3
VP4
VP5

Resultado - Compacção Aterro

Tipo Solo: B4
Tipo Compactação: Compactação Média
Tipo Compactador: P1
N/n = 2 - Tandem
L (Largura do cilindro) = 2 (m)
K (Coeficiente de rendimento) = 0.6
N - Numero Passagens = 5
Espessura camada = 0.25 (m)
Velocidade adoptada = 5. (Km/h)

DEBITO TEORICO
 $Q/L = 1000 * Vel. adoptada * Q/S = 300$
 $Q Teorico = Q/L * L * N/n = 1200 (m^3/h)$

DEBITO PRATICO
 $QPrat = K * Q/L * L * N/n = 720 (m^3/h)$

Calcular

Tabela LCPC
Q/S = 0,060
e = 0,250 (m)
V = 5,000 (km/h)
N = 5
Q/L = 300

Introduzir Dados
Espessura camada? 0.25 (m)
Coef. Rendimento? 0.6
Velocidade adoptada? 5 (km/h)
Valor de N/n? 2
Largura cilindro? 2

Fig.43 Cálculo da Compactação de Aterro

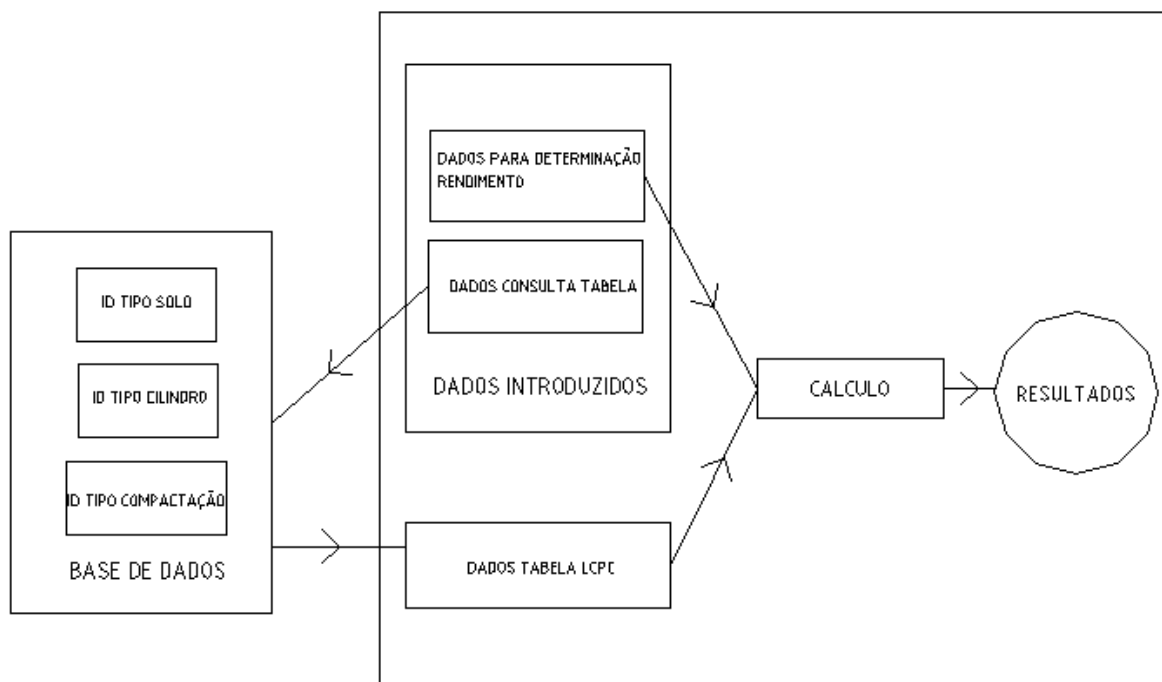


Fig.44 - Processamento de dados módulo Cálculo de aterro

6.3.3. MÓDULO CÁLCULO DE OBRA

O módulo de compactação de aterro apesar de útil, apresenta-se no entanto bastante rudimentar. Procurando adaptar a realidade às necessidades da empresa de construção, considerou-se que seria necessário desenvolver um módulo que permitisse o cálculo automático de uma obra de compactação.

Com módulo de cálculo de obra pretende-se que uma empresa possuidora de uma dada frota de equipamentos tenha a possibilidade de efectuar a estimativa dos rendimentos e custos da obra.

À base de dados inicial foram adicionadas as tabelas relativas à compactação de leito de pavimento. Desta forma passa a ser possível o cálculo de compactação em leito de pavimento através da selecção do item correspondente. Repare-se que em concordância com as tabelas, quando é seleccionado a compactação de leito de pavimento, o programa imediatamente impossibilita a selecção do tipo de compactação.

Neste módulo as características dos cilindros serão armazenadas numa base de dados dinâmica. A base de dados permite que a qualquer momento seja possível introduzir ou retirar cilindros. Uma empresa que possui um determinado número de cilindros pode assim a qualquer instante adicionar um novo cilindro, ou eventualmente retirar modelos que deixem de fazer parte do parque de máquinas. No caso de a empresa não ser proprietária do equipamento, mas conhecer as características e custo por hora em regime de aluguer pode também facilmente adicioná-lo.

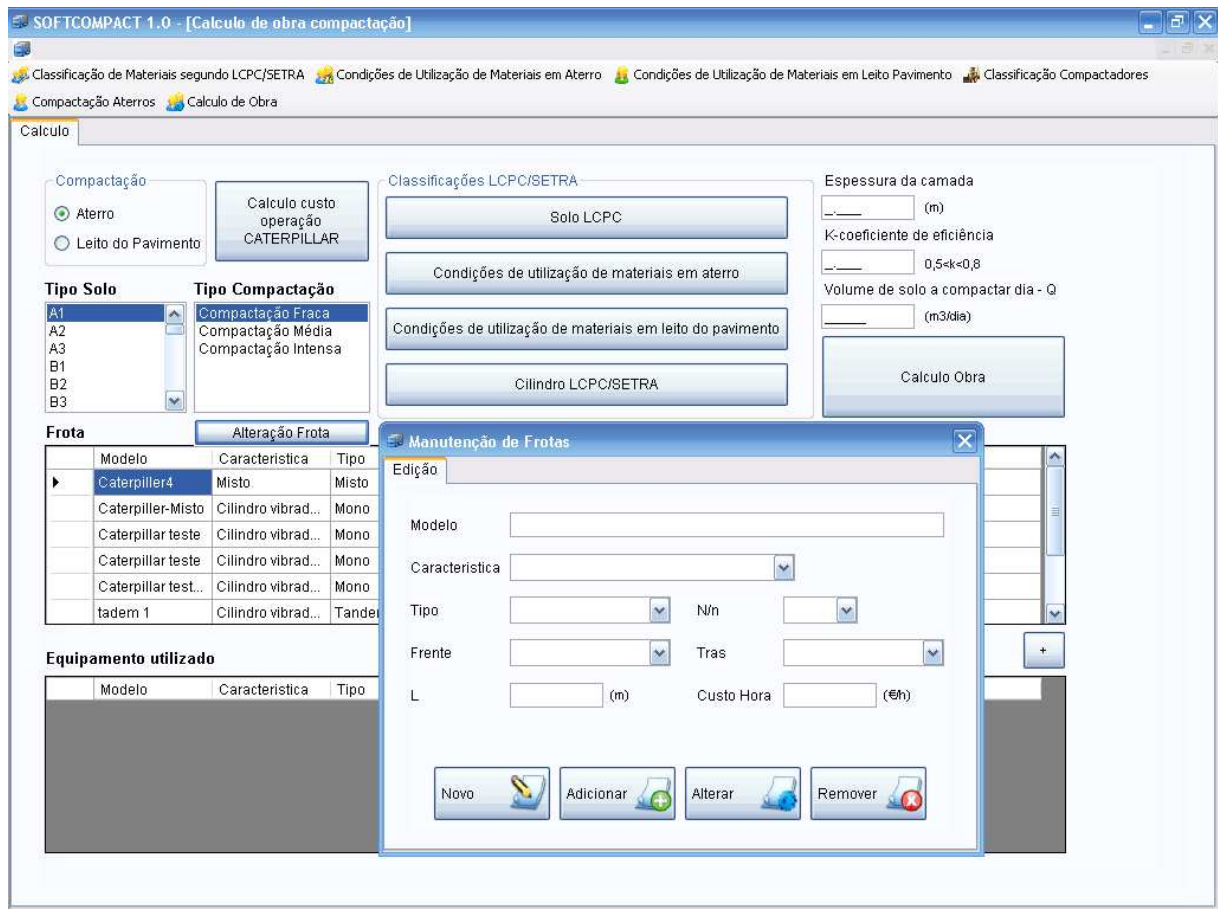


Fig.45 - Manutenção de Frota

A figura acima apresenta a janela que permite a manutenção da frota, as alterações efectuadas nesta janela serão guardadas na base de dados dinâmica e apresentadas numa grelha da janela principal do módulo de cálculo de obra.

Um dos dados que é necessário na introdução das características do cilindro é o custo horário do equipamento. O cálculo do custo horário utilizado é o previsto no manual da Caterpillar, já analisado no capítulo de Custos. Clicando no botão de custos, é possível abrir outra janela com um formulário que após preenchido, calcula o custo horário.

O utilizador deve possuir o equipamento da frota o mais actualizado possível, devendo verificar antes do cálculo de cada obra o valor fixado para o custo horário do equipamento.

O processo para o cálculo de uma obra com o SOFTCOMPACT 1.0 é simples e metódico. Deve proceder-se à selecção, aterro ou leito de pavimento, o tipo de solo e tipo de compactação se for o caso. Se existir alguma dúvida no tipo de solo facilmente se pode clicar no botão de 'Solo LCPC' e consultar a classificação.

Por outro lado a espessura da camada a compactar a ser introduzida deve ser inferior ao valor determinado no LCPC, caso contrário não será possível executar o cálculo.

Deverá ser definido o coeficiente de eficiência do cilindro compactador, conhecidas as características locais, e introduzido o volume de material a compactar.

Na grelha de equipamentos frota, deverá ser seleccionado o equipamento que se pretende utilizar. O equipamento seleccionado aparecerá na grelha inferior. Todos os equipamentos visíveis nesta grelha serão os utilizados para o cálculo. Se tivermos equipamentos iguais, estes devem ser adicionados várias vezes na frota, apesar de as referências serem as mesmas. O número de equipamentos da frota deve ser sempre igual ao número de equipamentos disponíveis pela empresa.

O programa, por defeito, calcula a compactação para uma distribuição de tempos iguais. A distribuição para tempos iguais, aproxima o grau de compactação ao valor unitário. Quando se pressiona o botão 'Cálculo de Obra' na janela principal do módulo, abre-se outra janela em que é possível visualizar os tempos calculados e o número de passagens de cada equipamento.

É possível alterar o tempo calculado para cada cilindro ou o número de passagens de cada cilindro. Com esta alteração pretende-se que o utilizador possa ajustar os condicionamentos existentes ao programa, como é o caso por exemplo da disponibilidade parcial de um cilindro.

As alterações efectuadas podem conduzir a cálculos da compactação insuficiente. Para que o utilizador não seja induzido em erro, quando é gerada o mapa de custos aparecerá um output com o valor do grau de compactação, que deverá o mais próximo de 1.0 possível e sempre superior à unidade. O valor do grau de compactação permite avaliar a eficiência da solução adoptada.

Sugere-se alterações de número de passagens no caso de aterros rodoviários, visto que estamos perante um elevado comprimento face à largura, nestes casos a superfície deverá ser coberta da forma mais homogénea possível, dando indicações ao manobrador o número de passagens que deve efectuar e a velocidade. Outra situação distinta são as obras de compactação de grandes superfícies, com áreas aproximadamente quadradas ou rectangulares de comprimento aproximadamente igual à largura, neste caso sugere-se a alteração dos tempos.

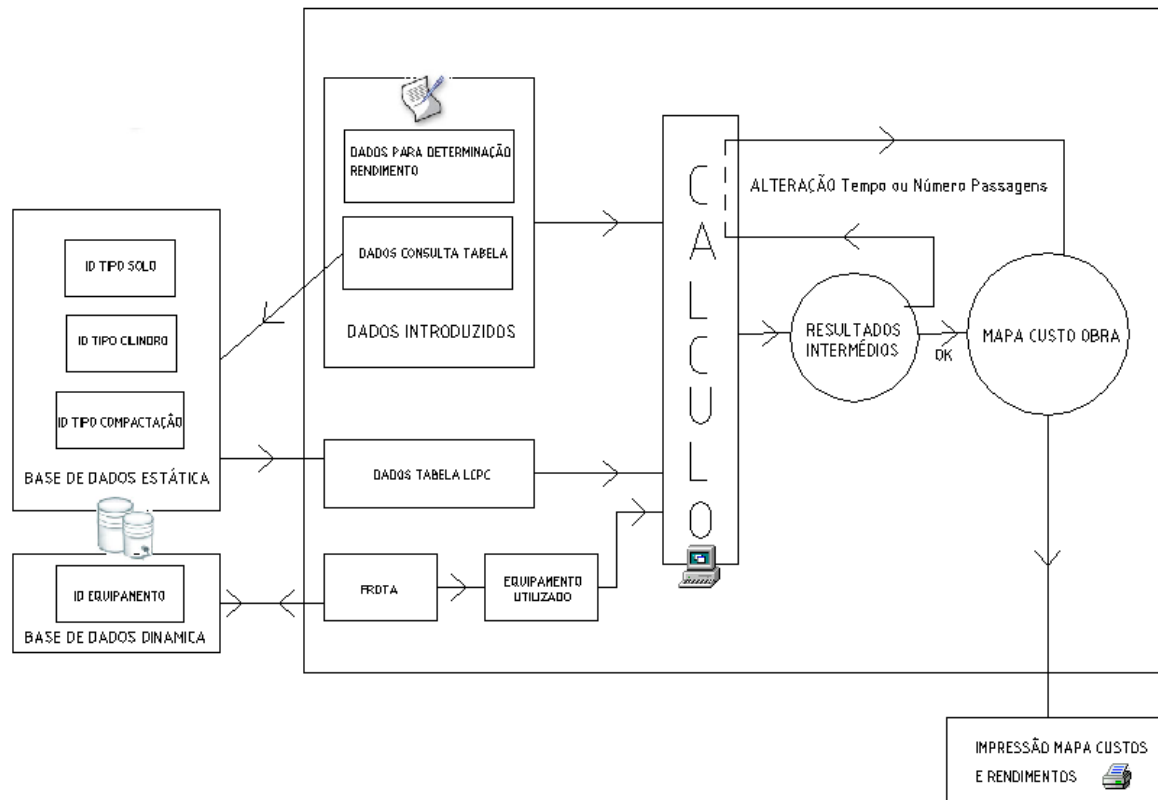


Fig.46 - Processamento de dados módulo Cálculo Obra

6.3.4. EXEMPLO FUNCIONAMENTO CÁLCULO OBRA.

O utilizador deve abrir o módulo de cálculo de obra, na parte superior da janela.

Neste exemplo efectuar-se-á ao cálculo da compactação de uma camada de solo de silte pouco plástico. Pressionando sob o botão de classificação de solo LCPC, abre-se uma tabela que permite a consulta da classificação segundo o LCPC e o material é classificado de A1. Deve então seleccionar-se a coluna referente ao tipo de solo, o tipo A1. Neste caso admite-se que se pretende compactação fraca. Deverá então ser seleccionada a coluna correspondente ao tipo de compactação. Os dados seleccionados nas colunas de tipo de solo e tipo de compactação encontram-se sublinhados a azul.

Para o tipo de cilindro a utilizar, um bom ponto de partida será a consulta da figura 47 referente às Zonas aplicação Tipo Equipamento – Tipo Material. Após consulta da referida figura, toma-se a decisão de utilizar um cilindro de pneus.

Na frota existem dois cilindros de pneus disponíveis. Opta-se por utilizar na obra os dois cilindros de modo a acelerar o processo de construção, 2 cilindros Hamm modelo GRW5.

A espessura da camada a compactar será de 0,25 cm e o coeficiente de rendimento, admitindo que existem boas características na zona, sem grandes rampas ou sem dificuldades de inversão de marcha, e alguma experiência do manobrador será de 0,7. O volume de solo compactado poderá ser obtido pela superfície que pretendemos compactar multiplicada pela espessura da camada. Neste caso admite-se que o volume de solo compactado é igual a 2000 metros cúbicos.

Na figura 47 apresenta-se a janela tem todos os dados de entrada devidamente preenchidos.

Assim que é pressionado o botão ‘Cálculo obra’ abre-se a janela intermédia que permite alterar a distribuição dos tempos ou número de passagens, (Figura 48).

Neste exemplo não se procedeu à alteração do número de passagens nem o tempo dos cilindros em obra, que é possível efectuar na janela de distribuição dos tempos (resultados intermédios), gerou-se o mapa de custos.

SOFTCOMPACT 1.0 - [Calculo de obra compactação]

Classificação de Materiais segundo LCPC/SETRA Condições de Utilização de Materiais em Aterro Condições de Utilização de Materiais em Leito Pavimento Classificação Compactadores

Compacção: ☒ Aterro ☐ Leito do Pavimento **Calculo custo operação CATERPILLAR**

Tipo Solo: A1, A2, A3, B1, B2, B3 **Tipo Compactação**: Compactação Fraca, Compactação Média, Compactação Intensa

Classificações LCPC/SETRA: Solo LCPC, Condições de utilização de materiais em aterro, Condições de utilização de materiais em leito do pavimento, Cilindro LCPC/SETRA

Espessura da camada: 0.25 (m) **K-coeficiente de eficiência**: 0.7 (0.5 ≤ k ≤ 0.8) **Volume de solo a compactar dia - Q**: 2000 (m3/dia)

Calculo Obra

Frota **Alteração Frota**

Modelo	Característica	Tipo	Frente	Tras	N/n	L	Custo
Bomag BW 172	Cilindro vibrad...	Mono	V3		1	2,50	112,00
Dynapac CC 1...	Cilindro vibrad...	Tandem	V1	V1	2	1,00	77,00
Hamm 3411P	Cilindro pés d...	Mono	VP4		1	3,00	150,00
Caterpillar 825...	Cilindro pés d...	Tandem	SP2	SP2	2	2,50	160,00
Hamm GRW 5	Cilindro de pn...	Tandem	P2	P2	2	2,00	92,00

Equipamento utilizado

Modelo	Característica	Tipo	Frente	Tras	N/n	L	Custo
Hamm GRW 5	Cilindro de pn...	Tandem	P2	P2	2	2,00	92,00
Hamm GRW 5	Cilindro de pn...	Tandem	P2	P2	2	2,00	92,00

Fig.47 - Dados Introduzidos para cálculo de compactação.

Distribuição Tempos

Sugere-se uma distribuição de tempos de trabalho iguais para todos os equipamentos.
Se pretender outra distribuição de tempos, realize a alteração na coluna de "Tempo".

Gerar Relatório

Modelo	Característica	Tipo	Frente	Tras	Custo	Tempo
Hamm GRW 5	Cilindro de pn...	Tandem	P2	P2	92,00	0,5952380952...
Hamm GRW 5	Cilindro de pn...	Tandem	P2	P2	92,00	0,5952380952...

Fig.48 - Janela com resultados intermédios.

O mapa de custos que o SOFTCOMPACT 1.0 gera, encontra-se em anexo 3.

Neste caso o resultado obtido para o grau de compactação foi de 1.37, ou seja seria possível encontrar outras soluções que atingiriam um grau de compactação próximo de 1.0.

O utilizador pode assim simular diversas situações com utilização de outros equipamentos, tempos diferentes, ou o número de passagens diferente.

6.4. APRECIÇÕES FINAIS

A construção de um aterro efectua-se em várias camadas. Para o cálculo da obra global de compactação de um trecho em aterro, o projectista terá definido o número de camadas, a sua geometria e os respectivos materiais aplicar. Com o programa será possível calcular o custo para a compactação camada a camada.

Em cada camada deverá ser determinada a solução final dos equipamentos utilizados. A vantagem de não utilizar um modelo matemático para a minimização dos custos da obra é poder-se utilizar vários equipamentos e proceder-se à alteração dos tempos. Neste tipo de obra, a compactação é muitas vezes efectuada com cilindros de tipo diferente, utilizando nas primeiras passagens um tipo de cilindro e nas passagens finais outro cilindro, o programa possibilita a execução destes cenários. É necessário que o utilizador tenha alguma sensibilidade para estes pormenores de modo a que os resultados obtidos estejam próximos da compactação óptima. Pretende-se que o programa facilite o processo de cálculo, mas que não seja utilizado de forma inconsciente. Por isso idealizou-se que o utilizador deveria ter o controlo das simulações de compactação.

O custo global é obtido pela soma das soluções de cada camada. O software não calcula o custo global automaticamente. Um dos próximos desenvolvimentos do programa poderá ser a criação de uma base de dados (dinâmica) em que seja possível calcular o custo total da obra e consultar o custo da compactação por camada. Ao colocar os dados da obra numa base, seria possível desenvolver um módulo de consulta de obra, em que a empresa poderia aceder a obras transactas.

Outro dos pontos que se tem em mente será a exportação directa do orçamento a dar ao cliente. A folha de custos apresentada serve apenas para ser utilizada internamente pela empresa, mas como se entende terá informação em excesso para o exterior, além de que os custos não estão afectados da percentagem de lucro. No caso de efectuarem serviços externos em que é pedido um orçamento por parte de um cliente, pretende-se que apenas seja fornecido o tempo de execução e o custo final com a discriminação do imposto sobre o valor acrescentado.

No estado actual de desenvolvimento do programa, poderá incluir-se a percentagem de lucro e impostos no custo horário de cada equipamento.

7

**CONCLUSÕES FINAIS. PROPOSTAS
DE TRABALHOS FUTUROS**

Face aos múltiplos assuntos que foram abordados dentro do âmbito da compactação, as conclusões foram divididas em diversos pontos.

Quanto ao material a utilizar considera-se que os cadernos de encargos da BRISA e EP incluem uma informação completa do material a utilizar. O estudo do material segue ensaios para classificação segundo a AASHO, ASTM e LCPC/SETRA. O LCPC/SETRA é um dos regulamentos mais completos para condições de utilização de material em aterro.

Conclui-se que na execução de uma obra de compactação, deverá escolher-se o cilindro adequado ao tipo de solo para que seja possível atingir o máximo rendimento com a devida qualidade de execução. Poderiam estabelecer-se patamares de relação tipo de solo equipamento, mas não corresponde à realidade das empresas que recorrem ao equipamento disponível. Os rendimentos apresentados pelo LCPC/SETRA são os mais completos para este tipo de obra.

O programa SOFTCOMPACT 1.0 veio facilitar o cálculo da compactação evitando o habitual processo de consulta de tabelas e cálculo para cada cenário de equipamento. Permite que se simule a compactação com vários equipamentos em que fornece produções e custos. De forma modesta, julga-se ter dado um contributo para o cálculo de uma obra de compactação e aspira-se que o programa possa vir ser utilizado por gabinetes de projecto e por empresas de construção.

Num novo recurso, a utilidade e aplicabilidade, sem nunca desvanecer o fundamento teórico que lhe deu origem, ditam o sucesso ou insucesso logo à nascença. A aceitação dos módulos agora desenvolvidos por parte de todos aqueles que são detentores do conhecimento e da experiência em obras rodoviárias e geotécnicas serão determinantes para as propostas a seguir apresentadas.

Para trabalhos futuros prevê-se a optimização do programa de compactação na primeira fase com a actualização e validação dos módulos para compactação e posteriormente o cálculo de outras operações de terraplenagem.

No que diz respeito à compactação considera-se oportuno um módulo relativo a ensaios. Deste modo pretende-se que o utilizador possa caracterizar o solo com a introdução de dados obtidos em campo ou laboratório. Por outro pretende-se que este módulo também deva permitir a aquisição de dados relativos aos ensaios de compactação, com a possibilidade do programa gravar essa informação e os dados dos módulos agora desenvolvidos, num registo, desta forma o utilizador poderá guardar uma obra, com a descrição e designação do cliente, para posterior consulta. Com recurso ao registo, será possível a sua utilização para interacção com o controlo de obra, com a criação de fichas técnicas para controlo por parte da Fiscalização e Directores de Obra.

Numa fase mais avançada pensa-se que será possível o desenvolvimento de módulos referentes a outras operações de terraplenagem. Pretende-se que com estes desenvolvimentos seja possível o cálculo total da produção e custos de uma obra em aterro ou escavação com recurso a uma ferramenta

informática, como muito regularmente acontece noutras áreas da Engenharia Civil, como é o caso das estruturas, hidráulica e tráfego entre outras.

Resta ainda dizer que o Homem criou a máquina, mas não delegou as suas competências, consciente das limitações que esta pode ter, deve ser crítico na avaliação dos resultados.

“O futuro do homem não está nas estrelas, mas sim na sua vontade.”

Shakespeare

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.original.britannica.com , 1999 Encyclopedia Britannica Inc., Março 2008.
- [2] FRANÇA, A. *Sebenta de Vias de Comunicação II*. FEUP, 2000.
- [3] Caderno de Encargos da Estradas de Portugal – Ex-JAE, 1996.
- [4] The Asphalt Institute, *Soils Manual for design of Pavement Structures*, March 1978. Edition
- [5] Krebs, Robert D., Walker, Richard D., *Highway Materials*, McGraw-Hill ,Virginia, 1971
- [6] Fernandes, M., *Mecânica dos Solos Volume I*, FEUP Edições, Porto, 2006.
- [7] Regulamentação Espanhola *Orden FOM/1382/02*
- [8] SETRA/LCPC – *Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 et 2*, 1992
- [9] Especificação LNEC – E240, *Solos. Classificação para Fins Rodoviários*, 1970.
- [10] Caderno de Encargos Brisa, 1996.
- [11] Especificação LNEC – E241, *Solos. Terraplenagens*, 1971.
- [12] Especificação LNEC – E242, *Execução de Terraplenagens de Estradas*, 1971
- [13] FERNANDES, M. *Sebenta de Mecânica dos Solos, Vol.I*. FEUP, Porto, 1994.
- [14] Lamb, T.W., Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons , 1979
- [15] Korytynski, A., *Compaction Control Article*, Sabatini Earth Technologies Inc., 2003.
- [16] Gresser, C., *Soil Compaction and Stability*, Construction Materials Testing Division Manager, 1996.
- [17] *Dynapac Brochure* , modelo Dynapac CC222CHF.
- [18] *Caterpillar Brochure*, modelo 815F series 2 CAT.
- [19] *Hamm Series 3K Brochure*, Hamm 3411 P.
- [20] *Dynapac Brochure* , modelo Dynapac CP271.
- [21] Ribeiro, J.Q., Azevedo,M., Micaelo,R., *A influência dos parâmetros de compactação na qualidade final de misturas betuminosas*, V Jornadas Luso Brasileiras de Pavimentos, 2006.
- [22] *Numerical Simulation of a vibratory on cohesionless soil*, Geodynamic.
- [23] Holtz, R.D, Kovacs, W.D., *An introduction to Geotechnical Engineering*, Washington, 1981.
- [24] Volvo Soil Roller – SD Series Brochure –,Volvo Construction Equipment.
- [25] www.hamm-ag.de/en/technologien/oszillation/index.html, Abril 2008.
- [26] www.hamm-ag.de/ , Abril 2008.
- [27] www.fhwa.dot.gov/ Abril 2008.
- [28] US Army - *FM 5-434 Earthmoving Operations introduction to Geotechnical Engineering*, Washington, 2000.
- [29] Caterpillar – Manual de Produção Caterpillar, 1998.

- [30] www.meusite.mackenzie.com - *Apontamentos de Compactação Prof Dr^a Rita Moura Fortes.*
- [31] www.pacific.net.au, Abril 2008.
- [32] *Soil Stabilizers and cold Recyclers*, WIRTGEN Technical Data.
- [33] www.cen.eu/cenorm/homepage.htm, Abril 2008.
- [34] www.materialstestingequip.com, Abril 2008.
- [35] *TROXLER 3451 Product Brochure*, TROXLER equipment
- [36] Vieira, C. R. Lopes, *Direcção de Obra de Estradas – FEUP*, Porto, 2004.
- [37] Nunnally, S.W., *Construction Methods and Management* -Fifth Edition, Prentice Hall, North Carolina, 2001.
- [38] Volvo BM – *Manual de Movimento de Terra* - 3^a Edição.
- [39] MacDonald M., *The Book of Visual Basic 2005: .NET Insight for Classic VB Developers*, Ebrary Inc, San Francisco, 2005.
- [40] Bain, T. , *Visual Basic.NET and SQL server 2000 building an effective data layer*, Wrox Press, Birmingham, 2002.
- [41] *Bomag Brochure*

Anexo 1 -

Compactação : Aterro

Tipo solo A1

Tipo Compactação : Compactação Fraca

Volume de solo a compactar dia - Q : 2000 (m3/dia)

Espessura camada : 0,25 (m)

K-coeficiente de eficiência : 0,7

Compactação Cilindros Idênticos - Superfície de trabalho repar

Dados do Equipamento								Dados de Produção				Dados de Custo			
Modelo	Característica	Tipo	Frente	Tras	N/n	L(m)	Custo €/h	Q/S	Q/L	Qteor(m3/h)	Qprat(m3/h)	Passagens	V(km/h)	Horas	Custo Total €
Hamm GRW 5	Cilindro de pneus (Pi)	Tandem	P2	P2	2	2,00	92,00 €	0,120 600,000		2.400,00	1.680,00	2	5.0	0.60	54,76
Hamm GRW 5	Cilindro de pneus (Pi)	Tandem	P2	P2	2	2,00	92,00 €	0,120 600,000		2.400,00	1.680,00	2	5.0	0.60	54,76

Grau de compactação: 1,37

Custo Total Obra: 109,52€