

Leca®

manual técnico Geo Leca®

a original

leveza

drenagem

rapidez

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$rs \times (t - tr)$$

$$E_r = E_r^{ref} \left(\frac{\sigma_{mean}}{P_{ref}} \right)^m$$

cia

Índice

Introdução	5
------------------	---

Capítulo 1

Geo Leca®: definições e propriedades básicas	7
1.1. O que é a Geo Leca®	7
1.2. Caracterização básica da Geo Leca®	9
1.2.1. Características dimensionais.....	9
1.2.2. Porosidade e volume de vazios	10

Capítulo 2

Propriedades mecânicas.....	13
2.1. Enquadramento	13
2.2. Deformação instantânea sob uma determinada tensão ..	14
2.2.1. Ensaio de compactabilidade e capacidade de carga ..	14
2.2.2. Módulo edométrico M	17
2.3. Resistência ao esmagamento	19
2.4. Deformações diferidas sob tensão de compressão constante (fluência)	20
2.5. Deformações residuais produzidas por acções cíclicas (fadiga)	23
2.6. Envolvente de tensões – ensaios triaxiais estáticos	24
2.7. Resiliência – ensaios triaxiais cíclicos	26
2.8. Pesos volúmicos e absorção de água.....	29

Capítulo 3

Comportamento em aterros rodoviários e ferroviários.....	32
3.1. A compactação	32
3.2. Limitação das tensões de serviço	35

Capítulo 4

Recomendações para o projecto e aplicação.....	39
4.1. Considerações e recomendações gerais.....	39
4.2. Confinamento dos aterros leves em vias de comunicação.....	40

4.3.Recomendações para a compactação.....	43
4.4.Aterro leve armado.....	47
4.5.O transporte da Geo Leca®	48
4.6.Considerações finais	51
Glossário	53
Conversão de unidades para o Sistema Internacional.....	56
Índice de figuras e quadros.....	57
Bibliografia.....	59

Introdução

Este manual contém um resumo das propriedades do agregado leve Geo Leca® com importância para o dimensionamento de aterros leves. Procurou-se enquadrar e apresentar uma série de definições importantes para a compreensão do comportamento do material.

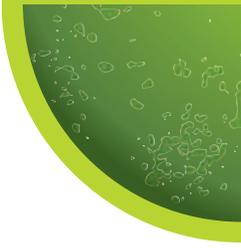
O manual foca apenas as aplicações da Geo Leca® sem ligante, mais difundidas em obras geotécnicas.

A caracterização do material produzido em Portugal, bem como a sua aplicação a obras de Geotecnia, tem sido objecto de estudos levados a cabo em laboratórios da especialidade tanto em Portugal como no estrangeiro tais como o LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa e o SINTEF em Trondheim na Noruega. Este manual beneficia desses estudos e ainda da experiência de mais de 50 anos de aplicações nos países do norte da Europa, nomeadamente Suécia e Noruega.

Os parâmetros de resistência e deformabilidade apresentados ao longo do texto podem ser utilizados nas metodologias tradicionais de quantificação das acções e dimensionamento, ou em modelos numéricos mais avançados.

Esperamos que este documento possa ser útil a todos aqueles que se interessam por um tipo de solução clássica e simultaneamente inovadora. Boa leitura e bons projectos!

Leca®



Leca®

Capítulo 1

Geo Leca®: definições e propriedades básicas

O que é a Geo Leca®

A Geo Leca® é um agregado leve granular obtido a partir do processamento em fornos rotativos a 1 150 °C de argilas especiais (*bloating clays*) e da sua posterior selecção por crivagem. Nos fornos rotativos a matéria-prima sofre um aumento de volume (expansão) adquirindo a forma de grânulos aproximadamente esféricos que apresentam propriedades que a tornam um material adequado para diversas aplicações em obras de engenharia, em particular no campo da Geotecnia e Vias de Comunicação.

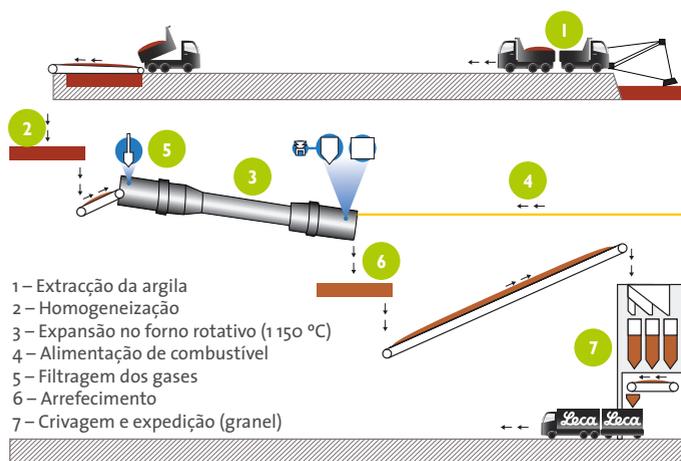


Figura 1 – Representação esquemática da produção dos agregados Leca®

O processo de fabrico da Geo Leca® origina como produto final um agregado de dimensão 10/20 (mm) com massa volúmica aparente (baridade) em geral inferior a 300 kg/m³ e com parâmetros de resistência mecânica e deformabilidade que o tornam adequado aos campos de aplicação referidos.

A reduzida baridade da Geo Leca® deve-se à estrutura porosa dos grânulos e ao espaço vazio exterior aos mesmos. Estes vazios levam a que os aterros executados com Geo Leca® constituam meios perfeitamente drenantes. No que respeita aos vazios interiores, a circulação de água no seio dos mesmos é dificultada pelos reduzidos diâmetros das bolhas e dos eventuais canais que as interligam, de tal forma que a completa saturação dos grânulos é impossível de ocorrer no material aplicado em obra.

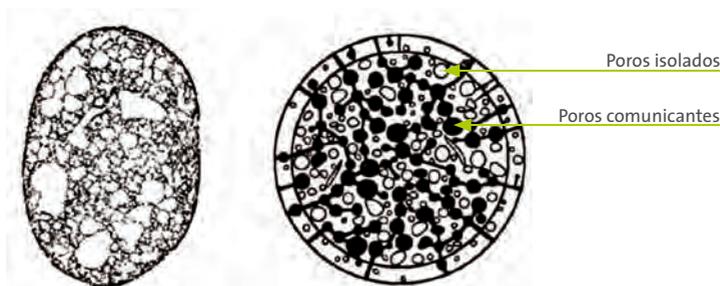


Figura 2 – Grânulo de Leca®: corte e representação esquemática dos poros no interior

Décadas de experiência na utilização dos agregados Leca® em obras de engenharia por toda a Europa culminaram no actual estado-da-arte respeitante ao conhecimento prático e teórico das propriedades do material aplicado em aterros leves e, também na cada vez maior generalização das soluções Geo Leca® técnica e economicamente interessantes em diversas situações.



Caracterização básica da Geo Leca®

1.2.1. Características dimensionais

A Geo Leca® é um agregado leve de dimensão 10/20 mm, ou seja, a maior parte dos grânulos apresenta dimensões entre 10 e 20 mm com um diâmetro mediano D_{50} de aproximadamente 13 mm.

Tratando-se de um material “grosso” no que respeita à granulometria, exibe uma elevada capacidade drenante da ordem de grandeza dos inertes britados que recebem a designação comercial de “brita n.º 2”. O **coeficiente de permeabilidade hidráulica** varia com o estado de compactidade, diminuindo à medida que esta aumenta, mas o seu valor mínimo situa-se acima de 10^{-2} m/s. Para a permeabilidade contribui o espaço vazio situado exteriormente às partículas, que é abordado no ponto 1.2.2..

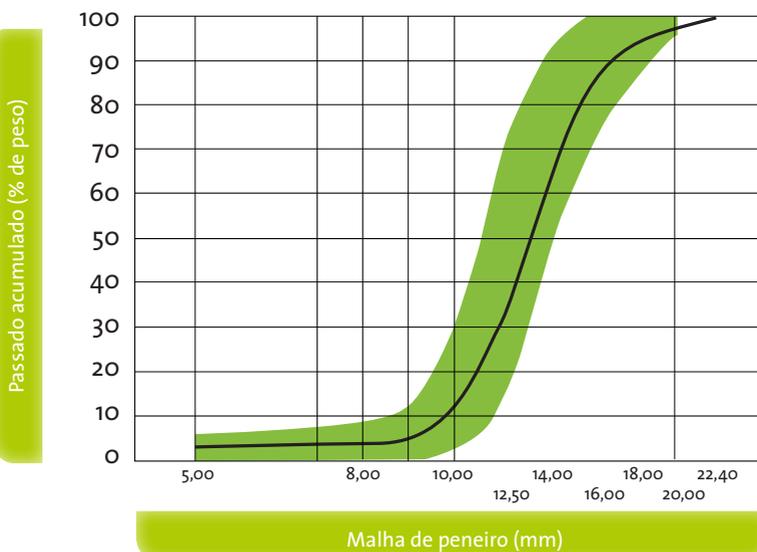


Figura 3 – Curva granulométrica média da Geo Leca® e franja de variação (valores característicos da percentagem acumulada, em peso, de material que passa no peneiro correspondente)

Da curva granulométrica da Figura 3 podem retirar-se os diâmetros correspondentes ao percentis de 60% e de 10% de partículas passadas, sendo $D_{60} = 14$ mm e $D_{10} = 10$ mm, resultando um coeficiente de uniformidade $C_u = D_{60} / D_{10} = 1,4$. A granulometria uniforme é um indicador do carácter drenante do material.

1.2.2. Porosidade e volume de vazios

À semelhança dos solos, os agregados de argila expandida aplicados em aterro são meios polifásicos, ou seja, apresentam uma fase sólida, uma fase líquida (a água absorvida ou exterior às partículas) e uma fase gasosa – os vazios. No entanto, a fase gasosa na Geo Leca® é mais complexa do que nos solos, areias ou agregados britados nos quais possui maior relevância o volume dos vazios exteriores às suas partículas constituintes.

Na Geo Leca® a fase gasosa é constituída conforme indicado no Quadro 1:

Espaço vazio exterior aos grânulos	Vazios que conferem permeabilidade ao material
Espaço vazio interior aos grânulos	Vazios acessíveis – porosidade aberta
	Vazios isolados – porosidade fechada

■ Quadro 1 – Vazios presentes na Geo Leca®

Em meios granulares a quantificação dos vazios face ao volume do material pode ser feita através de dois índices:

- **Índice de vazios e** – razão entre o volume dos vazios exteriores às partículas e o volume ocupado pela fase sólida;
- **Porosidade n** – razão entre o volume dos vazios exteriores e o volume total ocupado pelas três fases.

Os índices e e n relacionam-se entre si através das expressões: 1 e 2

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

Expressão 1

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

Expressão 2

Chamemos n_e à porosidade exterior à Geo Leca®. No estado solto o valor de n_e é cerca de 0,33, sendo o correspondente índice de vazios $e_e = 0,5$. A Figura 4 representa o espaço ocupado por estes vazios, face ao volume total.

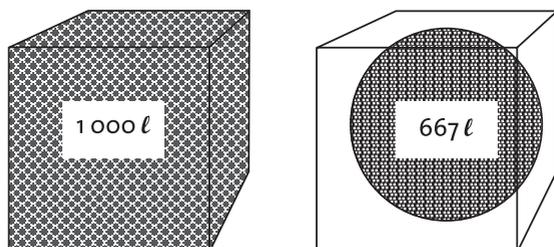


Figura 4 – Vazios exteriores presentes em 1 m³ de Geo Leca® no estado solto

É este volume de vazios exterior aos grânulos, que diminui sob efeito da operação de compactação. Quanto aos vazios interiores aos grânulos, o volume que ocupam, face a 1 m³ do agregado, pode ser representado pela Figura 5.

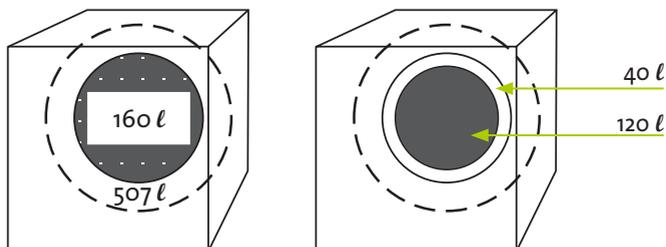


Figura 5 – Vazios interiores em 1 m³ de Geo Leca®, acessíveis e inacessíveis à água

Assim, em 1 m³ de Geo Leca® há, em termos médios, os volumes de vazios indicados no Quadro 2:

0,333 m ³	Volume de vazios exterior aos grânulos, antes da compactação
0,507 m ³	Volume de vazios acessíveis no interior dos grânulos ^(Ver 1)
0,040 m ³	Volume de vazios inacessíveis no interior dos grânulos

■ Quadro 2 – Volume de vazios existentes em 1 m³ de Geo Leca®

Atendendo à ordem de grandeza do volume de vazios, é fácil compreender que a leveza do agregado advém justamente daí. A influência da água no peso volúmico a considerar na determinação das acções para o dimensionamento é explicada no final do Capítulo 2.

Capítulo 2 Propriedades mecânicas

Enquadramento

Existem dois documentos normativos que definem as propriedades que os agregados leves devem apresentar para poderem ser utilizados nas aplicações para as quais a Geo Leca® está vocacionada:

- **EN 13055-2:** *Agregados leves. Parte 2: Agregados leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais e aplicações em camadas de materiais não ligados ou ligados*
- **prEN 15732:** *Lightweight fill and thermal insulation products for civil engineering applications (CEA). Expanded clay lightweight aggregate products (LWA)*

A **EN 13055-2** trata de agregados leves em geral, aplicando-se à Geo Leca® na medida em que esta se destina a ser utilizada sob as bases de pavimentos rodoviários ou de super-estruturas ferroviárias como camadas tratadas, ou não, com ligantes. A **prEN 15732** tem um campo de aplicação mais alargado, que se estende também aos aterros leves em contacto com elementos estruturais (obras de arte nas vias de comunicação e edifícios), sendo no entanto específica para agregados leves de argila expandida.

Os ensaios previstos nestas normas determinam características dos agregados leves que os caracterizam enquanto produto para a construção, não visando necessariamente a determinação de parâmetros para a modelação do seu comportamento quando aplicados. Contudo, alguns dos ensaios permitem determinar parâmetros de resistência como o ângulo de resistência ao corte e de deformabilidade como o módulo edométrico, que podem ser usados para modelar o comportamento do material nas diversas aplicações.

Os valores mínimos ou máximos dos parâmetros que quantificam as propriedades para uma aplicação em particular podem estar definidos em normas ou especificações relativas a essa mesma aplicação.

Deformação instantânea sob uma determinada tensão

2.2.1. Ensaio de compactabilidade e capacidade de carga

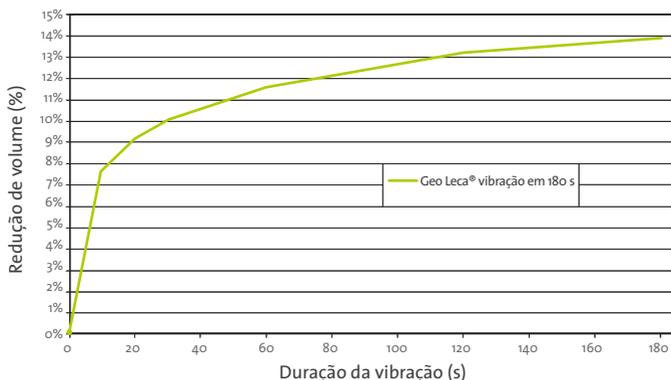
A **EN 13 055-2** apresenta no Anexo A um ensaio que visa obter:

- A máxima redução de volume (compactação) por vibração face a um estado inicial de compactidade mínima (i.e. estado solto);
- O registo contínuo da deformação originada por uma carga de compressão uniaxial aplicada a uma taxa constante.

Este ensaio é efectuado sobre amostras de Geo Leca® acondicionadas em moldes cilíndricos, com diâmetro e altura de 200 mm. Na primeira parte deste ensaio é medida a redução de volume aparente do provete, após 3 minutos de vibração com amplitude e frequência determinadas. Na segunda parte, é aplicada sobre o provete uma carga à taxa de $0,06 \pm 0,002$ kN/s, até ser atingida uma deformação de 10%, face à altura do provete após compactação por vibração.

Este ensaio permite demonstrar aspectos importantes do comportamento da Geo Leca®, nomeadamente a forma como a compactação inicial influi no comportamento do material sob acções de compressão.

Uma variante da primeira fase deste ensaio consiste em registar a redução de volume por vibração em função do tempo de vibração. O resultado é um gráfico como o da Figura 6.



■ Figura 6 – Redução de volume vs. duração da vibração

Atendendo a que em obra a redução de volume imposta às diversas camadas de Geo Leca® por placas vibratórias e/ou tráfego de tractores de rastros é de cerca de 10%, importa conhecer o registo da tensão vs. deformação da Geo Leca® (segunda parte do ensaio) para a compactação de 10% para os diversos estados de compacidade que o aterro leve pode vir a apresentar. Para 10% de compactação, o comportamento típico é o ilustrado no gráfico da Figura 7.

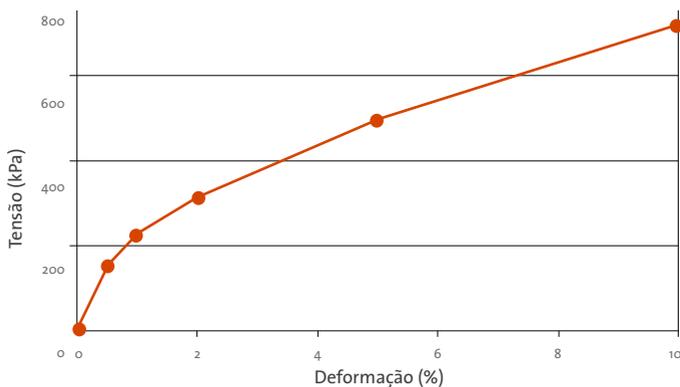


Figura 7 – Curva tensão-deformação da Geo Leca®, compactada a 10% por vibração

Embora não seja eliminado o atrito entre o interior do molde e a amostra, este ensaio permite obter a ordem de grandeza da deformação produzida por uma determinada tensão.

Por exemplo, para uma tensão de serviço de 100 kPa, a deformação instantânea correspondente é da ordem de 0,5 %.

Este tipo de ensaios permite ainda a determinação de um **módulo de deformabilidade E_c** , correspondente à derivada do gráfico tensão-deformação.

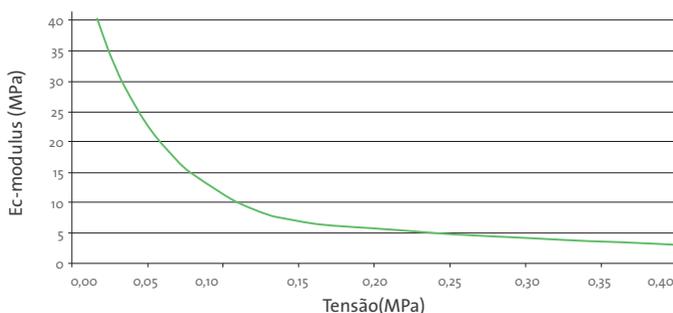


Figura 8 – Módulo de deformabilidade da Geo Leca®, obtido a partir de ensaios de resistência à compressão (compactada a 10% por vibração)

Importa notar que o principal factor que influencia a curva tensão-deformação é a massa volúmica aparente seca (baridade) do material no estado solto.

As curvas apresentadas no gráfico da Figura 9 evidenciam a influência da massa volúmica (baridade) **após compactação** no comportamento da Geo Leca®.

A curva **a** refere-se ao material sem compactação, apresentando reduzida massa volúmica aparente, enquanto a curva **b** apresenta o comportamento do material após compactação (em laboratório, por vibração) feita durante 3 minutos, apresentando já uma massa volúmica aparente mais elevada.

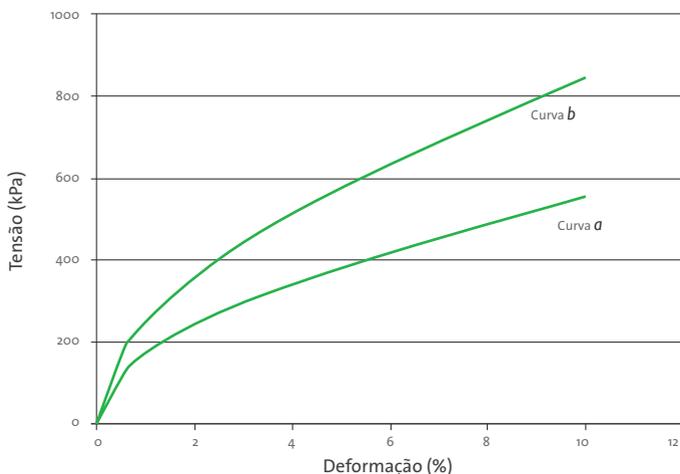


Figura 9 – Curvas tensão-deformação da Geo Leca® no estado solto (curva **a**) e compactada a 10% por vibração (curva **b**)

A Figura 9 permite perceber a importância em assegurar medidas que garantam que o aterro executado com Geo Leca® venha a apresentar uma adequada compactação, pois disso depende o seu comportamento em termos de tensão vs. deformação.

São então importantes:

- (i) o controlo em fábrica da massa volúmica do material produzido de modo a garantir que o agregado seja efectivamente leve;
- (ii) as medidas aplicadas em obra para se obter a compactação pretendida visando tornar o material aplicado o menos deformável possível.

2.2.2. Módulo edométrico M

O ensaio de determinação do módulo de deformabilidade; apresentado no ponto anterior, permite obter valores correspondentes a diferentes estados de tensão. No entanto, este módulo E é distinto do **módulo edométrico** que designaremos por **M**, em cuja determinação as cargas são aplicadas por escalões em equipamentos dispo de medidas de mitigação do atrito lateral. As diferenças entre estes dois tipos de módulo de deformabilidade são relativamente pequenas.

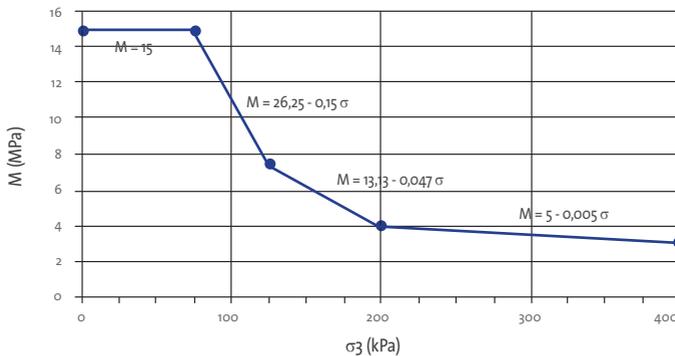


Figura 10 – Variação do módulo edométrico (M) da Geo Leca® após redução de volume de 10% por vibração, em função do nível de tensão aplicada

Resistência ao esmagamento

Um outro parâmetro que expressa a resistência mecânica dos agregados leves de forma imediata e normalizada é a **resistência ao esmagamento**, obtida através do ensaio descrito no Anexo A da norma EN 13 055-1, que descreve as características que os agregados leves devem apresentar para poderem ser utilizados no fabrico de betões. Este parâmetro não é uma grandeza utilizada no dimensionamento ou na modelação do comportamento dos aterros executados com agregados leves, e não serve para obter um valor de tensão máxima de serviço aplicando coeficientes de minoração ao valor da tensão de resistência ao esmagamento do agregado. No entanto, tratando-se de um parâmetro normalizado e de determinação simples, serve sobretudo para aferição e controlo do fabrico dos agregados leves.

Neste ensaio aplica-se uma força sobre um pistão apoiado sobre o provete do agregado leve previamente vibrado durante 20 segundos. O agregado encontra-se dentro de um molde cilíndrico com dimensões de aproximadamente $\varnothing 100 \times 100$ (mm), sendo a força aplicada de modo a fazer o pistão penetrar 40 mm no agregado compactado por vibração, registando-se a força que produziu esta deformação e a correspondente tensão.

A tensão de resistência ao esmagamento corresponde a um limite convencional de deformação de 20%, a qual não se atinge em aplicações práticas, determinada sobre amostras pouco compactadas. Trata-se, contudo, de um parâmetro fácil de determinar que permite controlar as características da produção do agregado. **A resistência ao esmagamento da Geo Leca® tem como valor mínimo 700 kPa.**



Figura 11 – Aspecto de um provete de Geo Leca® após ensaio de resistência ao esmagamento

Deformações diferidas sob tensão de compressão constante (fluência)

Os efeitos diferidos no tempo, resultantes da aplicação de tensões sobre qualquer material, são avaliados através de ensaios de fluência (*compressive creep*). A prEN 15 732 estabelece um ensaio, descrito no seu Anexo C, que prevê a aplicação de determinados níveis de tensão de compressão sobre uma amostra do agregado leve e o registo da evolução da deformação sofrida pela amostra ao longo de um período de 24 horas.



Figura 12 – Execução do ensaio de fluência sob compressão no laboratório do SINTEF, na Noruega

A **resistência à fluência da Geo Leca®** pode ser quantificada através do parâmetro *time resistance* (Janbu, 1969), sendo este o inverso da derivada da extensão em função do tempo para determinados níveis de tensão: $R = dt/d\varepsilon$. Constata-se que, para a generalidade dos solos e materiais granulares sujeitos a uma tensão de compressão, a partir de um determinado momento t_p o parâmetro R varia linearmente com o tempo decorrido após um momento de referência t_r , ou seja, $R = r_s \times (t - t_r)$, sendo o factor de proporcionalidade r_s , denominado *time resistance number* ou *creep number*.

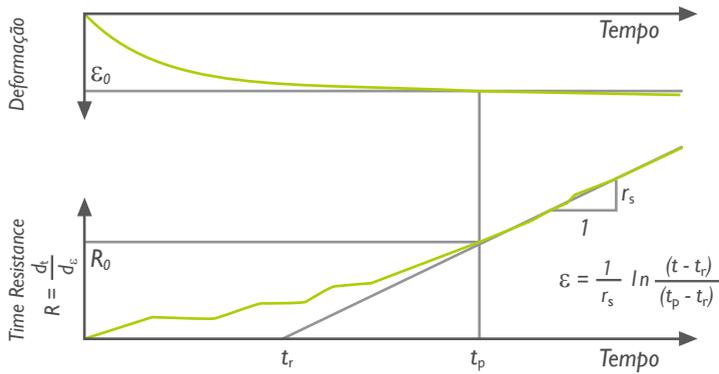


Figura 13 – Definição do conceito de *time resistance*

Assim, o parâmetro r_s , designado por *creep number*, pode ser determinado para diversos níveis de tensão de compressão e permite calcular a deformação para períodos alargados de tempo, sendo que quanto maior o valor de r_s , menos evolui a deformação do material sob uma acção constante de compressão. A extensão ao fim do período t , em segundos, é obtida a partir da equação generalizada (Figura 13), que resulta, para $t_r = 0$ e $t_p = 30'$, na equação expressão 3.

$$\varepsilon = \frac{1}{r_s} \times \ln(1,05192 \times 10^6 \times X_{Anos})^{\text{Ver } 2}$$

Expressão 3

Esta expressão permite quantificar a deformação por fluência da Geo Leca®.

Um recente estudo comparativo abrangendo os agregados Leca® produzidos nas diversas fábricas do grupo Saint-Gobain na Europa revelou que, para uma tensão de compressão de 100 kPa, o valor do parâmetro r_s da Geo Leca® produzida em Portugal (8 000) é superior aos das demais fábricas actualmente em laboração como mostram as Figura 15 e 16. Ou seja, para este nível de tensão, as deformações por fluência são as mais baixas.

Na Figura 14 observa-se que o declive da curva correspondente à Geo Leca® portuguesa (Avelar) é tão reduzido que

no troço final é quase uma recta horizontal. Na Figura 15 é apresentado o inverso do declive, ou seja, o parâmetro r_s , para o troço final das curvas da Figura 14.

O cálculo da deformação por fluência da Geo Leca® para um período de 100 anos, com base na expressão 3 e $r_s = 8\ 000$, indica que esta é inferior a 2,5 %, sendo por isso de desprezar na prática.

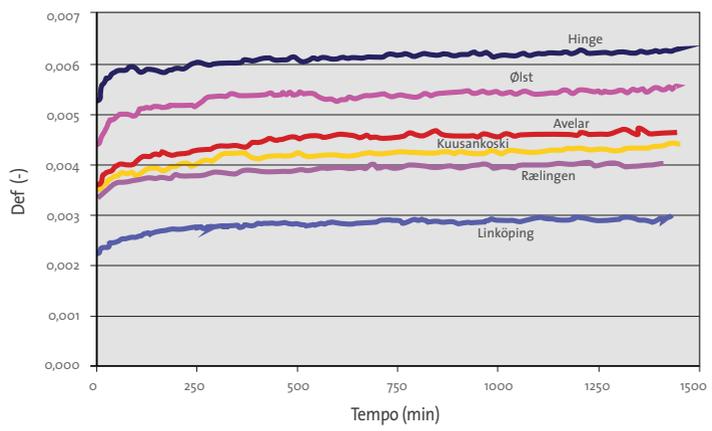


Figura 14 – Curvas de fluência dos agregados Leca® para utilizações geotécnicas produzidos pela Saint-Gobain na Europa

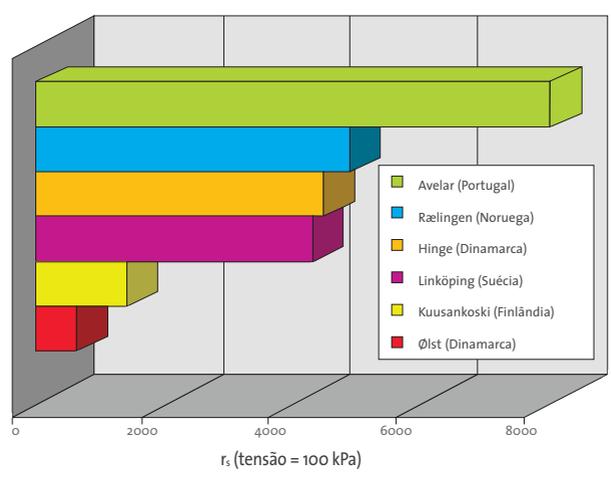


Figura 15 – Comparação entre os valores do parâmetro r_s (creep resistance number) dos agregados Leca® para utilizações geotécnicas produzidos pela Saint-Gobain na Europa

Deformações residuais produzidas por acções cíclicas (fadiga)

No ensaio de resistência a acções cíclicas de compressão é avaliada a fadiga, traduzida pela deformação residual obtida após *2 milhões de ciclos carga-descarga*, segundo uma determinada onda com forma quadrada, com frequência de 4 ciclos carga-descarga por segundo. São registadas em gráfico as deformações residuais ocorridas ao fim de determinado número de ciclos, tão próximos quanto o possível de 100 mil, 300 mil, 600 mil e 1 500 000, para além da deformação no final do ensaio. O procedimento vem descrito no Anexo B da prEN 15 732.

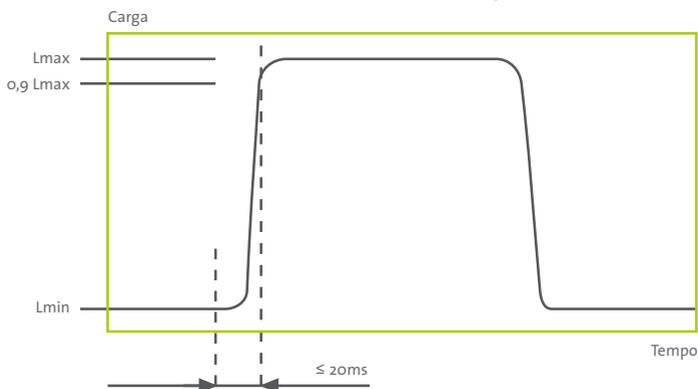


Figura 16 – Forma da onda utilizada no ensaio de compressão cíclica

Nos ensaios realizados sobre amostras de Geo Leca® no SP – Sveriges Tekniska Forkninginstitut (Suécia), foram aplicadas tensões cíclicas até um valor máximo de 120 kPa.

A avaliação da deformação após os primeiros 100 ciclos carga-descarga, permite verificar que, na pior situação, esta evolui de um valor de **0,2% no início do ensaio** (1 000 ciclos) para **0,5% no final do ensaio** (2 000 000 ciclos).

É de referir que os resultados obtidos pela Geo Leca® nestes ensaios permitem a sua utilização **em aterros e em obras ferroviárias e rodoviárias**, ficando a **deformação residual muito abaixo do valor aceite pelas autoridades** dos países da Escandinávia onde este tipo de aplicação é prática corrente há várias décadas.

Envolvente de tensões – ensaios triaxiais estáticos

Foram realizados ensaios triaxiais sobre amostras de Geo Leca® de forma a determinar os principais parâmetros necessários à modelação do seu comportamento mecânico. Os ensaios triaxiais estáticos possibilitam a determinação da envolvente de tensões da Geo Leca®, expressa em termos de **ângulo de resistência ao corte** (ϕ) e de **coesão** (c).

Nos **ensaios triaxiais estáticos realizados no SINTEF (Noruega)** foram utilizadas tensões de confinamento constantes, enquanto a carga axial foi aumentada a uma taxa constante de deformação axial (0,02%/s), até se dar a rotura do material – deformação axial de 10%. Nos ensaios efectuados foram utilizadas tensões de confinamento de 20, 40 e 80 kPa tendo-se chegado a um valor de 42,5° para o ângulo de resistência ao corte de pico, para tensões até cerca de 200 kPa. Uma vez que a envolvente de rotura é curva, – Figura 17 – para tensões mais elevadas é de considerar um valor de 37° para o ângulo de resistência ao corte associado a uma coesão de 35 kPa. ^{Ver 3}

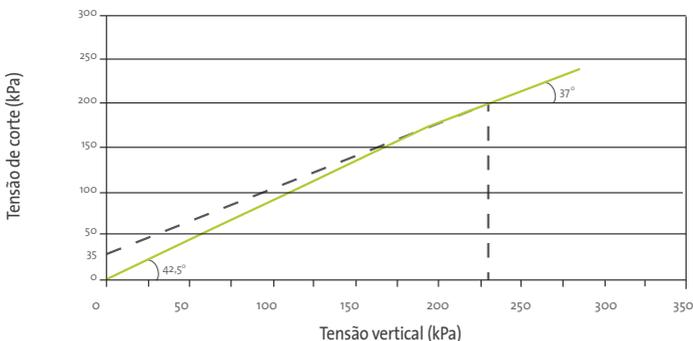


Figura 17 – Envolvente de rotura da Geo Leca® obtida a partir de ensaios triaxiais

³ Os ângulos de resistência ao corte são em tensões efectivas uma vez que não se geram tensões neutras. A coesão é apenas um parâmetro para a modelação do comportamento e não uma propriedade física do material.

Nestes ensaios convencionou-se que a rotura corresponde a uma deformação axial de 10%. Os parâmetros obtidos são válidos para trajectórias de tensão similares.

Tal como ocorre em qualquer material com comportamento friccional, o ângulo de resistência ao corte varia com o estado de compacidade do agregado. Como valor conservador para situações de confinamento reduzido e sem mobilização de deformações elevadas, pode adoptar-se 37° para o **ângulo de resistência ao corte** da Geo Leca®.

Resiliência – ensaios triaxiais cíclicos

Para além do ângulo de resistência ao corte, determinado a partir dos ensaios triaxiais estáticos, realizaram-se ensaios triaxiais cíclicos possibilitando a determinação da componente recuperável da deformação – **módulo de resiliência** – e as envolventes das zonas de comportamento elástico e elasto-plástico do material para as trajectórias de estado de tensão previstas na norma EN 13 286-7, conforme estipulado na prEN 15 732.

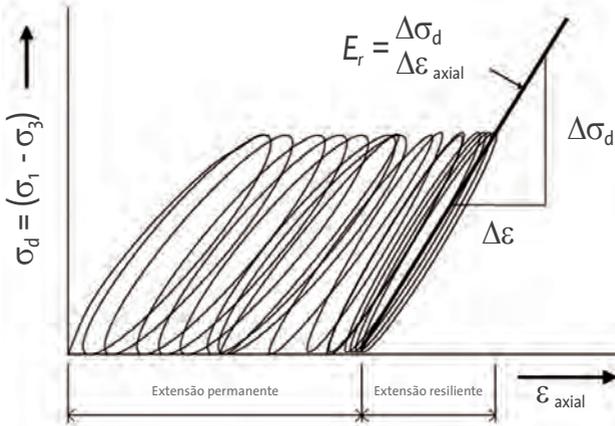


Figura 18 – Representação gráfica do módulo de resiliência de um material

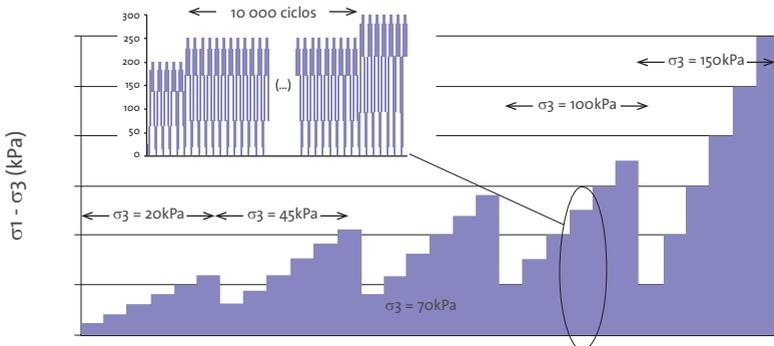
O módulo de resiliência ϵ_r de um material constitui uma medida da componente elástica das deformações produzidas por uma sollicitação dinâmica. Para um dado carregamento, a diferença entre a extensão máxima e a extensão permanente é a denominada extensão resiliente. A razão entre a tensão de desvio (σ_d , ou $\sigma_1 - \sigma_3$) e a extensão resiliente (ϵ_r) é o módulo de resiliência para a correspondente tensão normal média (σ_{mean}). Trata-se de um parâmetro que pode ser utilizado para o dimensionamento de pavimentos rodoviários e ferroviários com base em métodos mecanístico-empíricos ou analíticos.

Na Europa, os ensaios triaxiais cíclicos são geralmente efectuados de acordo com a norma EN 13286-7 (*Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*) que prevê a aplicação de cinco sequências de carregamento cíclico. Cada sequência corresponde a uma tensão de confinamento, e em cada uma são aplicados seis escalões de carga. São aplicados 10 000 ciclos carga-descarga em cada escalão com uma frequência de 10 ciclos/segundo, de acordo com uma curva sinusoidal, sendo a sequência interrompida se for atingida uma deformação axial de 0,5%. O Quadro 3 apresenta as sequências e escalões utilizados nos ensaios efectuados.

	Sequência 1 ($\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$)	Sequência 2 ($\sigma_3 = 45 \text{ kPa}$)	Sequência 3 ($\sigma_3 = 70 \text{ kPa}$)	Sequência 4 ($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$)	Sequência 5 ($\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$)
$\sigma_1 - \sigma_3 \text{ (kPa)}$	20	60	80	100	100
	40	90	120	150	200
	60	120	160	200	300
	80	150	200	250	400
	100	180	240	300	500
	120	210	280	350	600

■ Quadro 3 – Sequências e escalões de cargas no ensaio triaxial cíclico

Os escalões do Quadro 3 podem também ser representados conforme a figura 19.



■ Figura 19 – Esquema de carregamento no ensaio triaxial

Neste ensaio, no final de cada escalão de carregamento cíclico, é registado o valor de tensão desviante ($\sigma_1 - \sigma_3$) que produz uma extensão unitária, sendo a média dos valores obtidos em cada sequência igual ao valor do módulo de resiliência de referência E_r para a correspondente tensão de confinamento σ_3 . A partir dos diversos valores de E_r , determina-se a curva que melhor os ajusta, sendo conveniente fazê-lo através da equação seguinte.

$$E_r = E_r^{ref} \left(\frac{\sigma_{mean}}{p_{ref}} \right)^m$$

Expressão 4

Nesta equação, o módulo de resiliência de referência E_r^{ref} corresponde à tensão de confinamento (p^{ref}) de 100 kPa.

Para uma tensão normal média de referência (p^{ref}) de 100 kPa, pode-se adotar para o **módulo de resiliência de referência** E_r^{ref} da Geo Leca® o valor de 210 MPa, podendo ser adoptado para o expoente **m** o valor de **0,55**.

O ensaio triaxial cíclico permite ainda obter as **envolventes de comportamento elástico** ($\varepsilon < 2,5 \cdot 10^{-8}$) e de **comportamento elasto-plástico** ($10^{-7} < \varepsilon < 2,5 \cdot 10^{-8}$). A Figura 20 apresenta a parametrização sugerida para as envolventes.

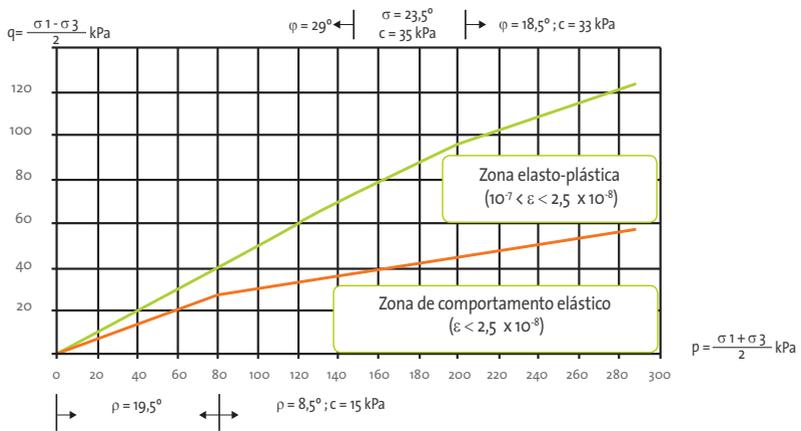


Figura 20 – Envolventes de comportamento elástico e elasto-plástico obtidas a partir de ensaios triaxiais cíclicos

Pesos volúmicos e absorção de água

Um dos dados mais importantes para a correcta caracterização de um agregado leve é o peso volúmico nas condições de aplicação em obra, que devido à absorção de água do meio envolvente será superior ao peso do mesmo agregado no estado seco.

A forma como evolui a absorção de água pela Geo Leca® varia em função da quantidade de água já absorvida. Ao fim de 24 horas de imersão, a água absorvida pela Geo Leca®, inicialmente seca, equivale a 38% do seu peso inicial no estado solto. No entanto, para duplicar esta quantidade de água absorvida, é necessário que decorram cerca de 3 meses. E a completa saturação, que representa um teor de água de 130%, apenas se consegue em condições impostas em laboratório ^{Ver4}, pois em situações de permanente imersão a saturação não se atinge mesmo após terem decorrido vários meses.

Assim, o peso volúmico a considerar para efeito da avaliação das acções exercidas por um aterro de Geo Leca® deve ser criteriosamente determinado em função:

- i) da duração de uma eventual submersão;
- ii) das condições de drenagem na interface entre o aterro leve e os elementos construídos ou formações geológicas confinantes.

Para situações típicas, e uma vez que com boas condições de drenagem a absorção de água não atingirá o valor correspondente a 24 horas de imersão, o peso volúmico a considerar para pré-dimensionamento poderá ser obtido da seguinte forma, a partir do valor médio do peso volúmico no estado seco:

⁴ O valor do teor de humidade na saturação – 129% – foi obtido no LNEC, implicando a imposição de vácuo em câmara estanque e a introdução de água com a bomba de vácuo ainda em funcionamento.

$$2,7 \text{ kN/m}^3 \times 1,38 \times 1,1 = 4 \text{ kN/m}^3$$

. peso volúmico no estado seco

. 38% para a água absorvida

. 10% de aumento de peso por compactação

. peso volúmico a considerar

para pré-dimensionamento

Em situações nas quais o agregado fique frequente ou permanentemente abaixo do nível freático, outros valores para o aumento de peso por absorção de água deverão ser utilizados. Para a determinação do peso volúmico nestas situações, recomenda-se a metodologia expressa no manual técnico *Lättklinker i vägkonstruktioner (Agregados leves na construção de estradas)*, da autoridade rodoviária sueca. No entanto, para pré-dimensionamento nas situações de subida frequente do nível freático, poderá ser adoptado um valor médio de **5 kN/m³** para o peso volúmico.

Situação	Peso volúmico a considerar
Presença ocasional de água	4 kN/m³
Presença frequente de água	5 kN/m³

■ Quadro 4 – Pesos volúmicos médios para pré-dimensionamento

Outra abordagem possível é tratar separadamente o peso volúmico aparente seco da Geo Leca® e a água absorvida. Neste caso, pode-se utilizar como valor característico para o peso volúmico 335 kN/m³ (probabilidade de 95% de ficar abaixo deste valor) e para o peso volúmico da água no interior dos grânulos 38% (correspondente a 24 horas de imersão) deste valor ou do valor médio, ou outra percentagem, caso o material venha a ficar submerso por períodos de tempo mais longos.

Ainda sobre a absorção de água, refira-se que a ascensão capilar é diminuta. Para um volume de Geo Leca® parcialmente imerso em água, se ao fim de alguns meses o teor de humidade ronda valores da ordem de 80% na parte imersa, a franja de ascensão capilar, ao longo da qual a humidade desce para valores correspondentes ao da humidade atmosférica, tem menos de 30 cm de espessura. Assim, em termos de aumento de peso volúmico, a existência da franja capilar não tem qualquer expressão, bastando considerar que o nível freático se encontra 20 cm acima do nível efectivo para ter em conta o efeito da mesma nos cálculos .

Embora os valores do Quadro 4 tenham sido obtidos a partir de um valor médio do peso volúmico no estado seco, estes poderão ser tratados como valores característicos, **pois as variações de peso volúmico seco e de absorção de água dão-se em sentidos opostos**. Ou seja, os lotes com peso volúmico mais elevado apresentam volumes de vazios mais reduzidos, pelo que também a absorção de água diminui. As acções que resultam do peso volúmico do aterro leve (impulsos no tardo de estruturas de suporte, tensões verticais sobre túneis) são, em geral, desfavoráveis. Embora os pesos próprios dos materiais originem acções do tipo permanente, o facto de se usar uma abordagem que considera para a determinação da acção o peso próprio da Geo Leca® acrescido do peso da água absorvida pelos grânulos e **o facto de ser variável a quantidade de água absorvida** levam a aconselhar a utilização, no dimensionamento, de **coeficientes parciais de segurança de 1,5 ou de 1,3**, conforme se trate respectivamente do caso B ou C do Eurocódigo 7.

Capítulo 3

Comportamento em aterros rodoviários e ferroviários

A compactação

Quando se executa um aterro leve com Geo Leca®, em estradas ou caminhos-de-ferro é importante assegurar que o material se comportará em conformidade com o desempenho determinado nos ensaios de laboratório. Para tal, deve-se procurar reproduzir, tanto quanto possível, o estado de compactidade utilizado nos ensaios de laboratório, visto que o estado de compactidade tem forte influência nos valores dos diversos parâmetros que influem no comportamento e resistência do material, nomeadamente o módulo de deformabilidade e ângulo de resistência ao corte, conforme referido no ponto 2.2.

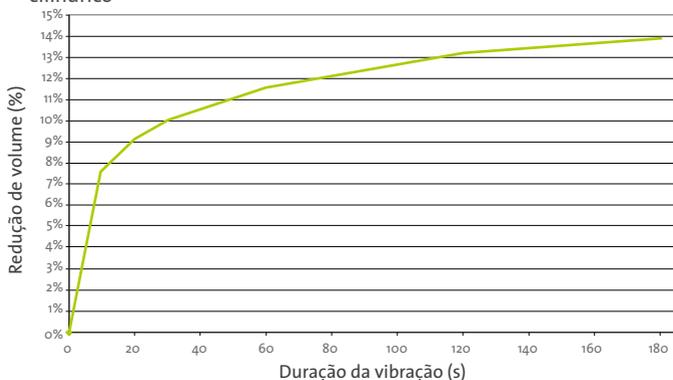
No que respeita aos agregados leves, o estado de compactidade é, em geral, expresso em termos de **redução de volume por compactação**, tendo a prática dos países do Norte da Europa constatado que o controlo desta redução de volume é o factor essencial na qualidade de um aterro leve. Quando a vibração em condições normalizadas origina uma redução de 10% do volume na amostra contida no molde para um dos ensaios anteriormente descritos, diz-se que sofreu uma **compactação por redução de volume de 10%**. Da mesma forma, em obra procura-se obter uma redução de espessura das diversas camadas de Geo Leca® em cerca de 10%. Embora neste caso a redução de volume não se deva a uma acção exactamente igual (vibração em laboratório), não deixa de haver semelhanças entre a compactação em laboratório e a operação de compactação *in situ* da Geo Leca®.

A circulação de **tractores de rastos** (bulldozers) sobre o material, ainda que com tensões sob os rastos de apenas **50 kPa**, dá origem a variações momentâneas e re-

correntes no estado de tensão no contacto entre os grânulos, fazendo com que estes tendam a aproximar-se entre si, reduzindo por conseguinte o volume de vazios exterior aos grânulos. A tensão de 50 kPa preconizada é suficientemente reduzida para não provocar a fragmentação dos grânulos para além de um mínimo inevitável. A compactação com tratores munidos de lagartas pode ser complementada com a utilização de **placas vibratórias**, geralmente com **peso entre 80 e 140 kg**. No Capítulo 4 é apresentado um gráfico com o número de passagens recomendado em função da espessura da camada e do tipo de equipamento.

Se observarmos o gráfico do ensaio de compactação por vibração em molde cilíndrico (Figura 21), verifica-se que 10% não é a redução máxima de volume possível de atingir. Na amostra ensaiada, a redução máxima é cerca de 14% para 180 segundos de vibração.

Figura 21 – Gráfico do ensaio de compactação por vibração em molde cilíndrico



No entanto, ao ensaiar à compressão amostras com ambos os estados de compactidade (i.e. uma com redução de volume por compactação de 10% e a outra com a redução máxima), verifica-se que a razão tensão/deformação (módulo de deformabilidade) para amostras vibradas durante 180 segundos é apenas 30% superior à das amostras menos compactadas. Ou seja, a eficiência do processo de compactação diminui significativamente após cerca de 10% de compactação.

Ao ensaiar à compressão amostras vibradas durante 180 segundos (14% de compactação), obtém-se um módulo de deformabilidade 30% superior ao das amostras vibradas durante 30 segundos (10% de compactação). No entanto, esta constatação merece alguma reflexão, não se devendo a partir da mesma concluir da viabilidade de se obter em campo compactações da ordem de 14%. O valor de 10% para a redução da espessura das camadas de Geo Leca® é um objectivo que se consegue facilmente atingir com números moderados de passagens de tractores de rasto (bulldozers) ou placas compactadoras (v. Figura 30), dependendo da espessura da camada aplicada. No entanto, na hipótese de se procurar obter 14% de redução da espessura, pode-se assumir que seria necessário um número de passagens 6 vezes superior, atendendo aos tempos de vibração em laboratório de 30 e de 180 segundos. Mas os processos de compactação utilizados na mesa do laboratório (apenas vibração) e em campo com bulldozers (acções de compressão actuando de forma recorrente) apresentam diferenças significativas em termos de eficácia, pelo que a hipotética imposição de 14% de compactação obrigaria a um número de passagens muito mais elevado, o que provocaria uma fragmentação excessiva do agregado, sobretudo à superfície, sendo que a redução de espessura da camada teria uma forte componente resultante da evolução granulométrica do material.

Limitação das tensões de serviço

É importante notar que o desempenho do material varia com o nível de tensão a que está sujeito. De facto, para tensões até 100 kPa a Geo Leca® apresenta valores muito reduzidos de deformação instantânea, de fluência e de perda de resistência por fadiga, pelo que interessa que em aterros rodoviários e caminhos-de-ferro as tensões originadas pelo tráfego fiquem aquém deste valor. Para garantir que as tensões de compressão máxima a que a Geo Leca® estará sujeita sejam inferiores a 100 kPa, devem prever-se camadas de outros materiais (geralmente agregados britados de granulometria extensa, camadas com ligantes hidráulicos e misturas betuminosas) com espessura suficiente para degradar as cargas transmitidas pelos veículos para níveis de tensão mais reduzidos. Estas camadas têm como efeito o aumento da tensão de confinamento e conseqüentemente a redução das tensões de corte decorrentes do tráfego de veículos e o aumento do módulo de resiliência, ou seja, a redução da componente permanente das deformações.

Um registo da degradação de cargas ocorrida sob as diferentes camadas constituintes de um pavimento rodoviário foi obtido a partir de uma pista experimental construída na Noruega (figura 22). Entre outros, foi avaliada a forma como um pavimento rodoviário e a respectiva base dissipam em profundidade as tensões originadas pela passagem de camiões, com peso por eixo de 12 toneladas e tensão sob os rodados de 700 kPa. As células de carga instaladas no topo da camada de Geo Leca®, recoberta por uma espessura de 40 cm constituída pelo pavimento asfáltico e respectiva base (figura 23), com a passagem do camião registaram apenas um acréscimo de tensão de 100 kPa (figura 24). Exceptua-se a zona junto à berma, onde o acréscimo de tensão registado foi de 160 kPa, o que se deverá à impossibilidade de se formar um bolbo de tensões simétrico, como o que se forma nas zonas mais centrais

– daí também a importância do recobrimento lateral dos taludes de aterro de agregados leves com material mais denso.



Figura 22 – Pista experimental de Sandmoen (Noruega)

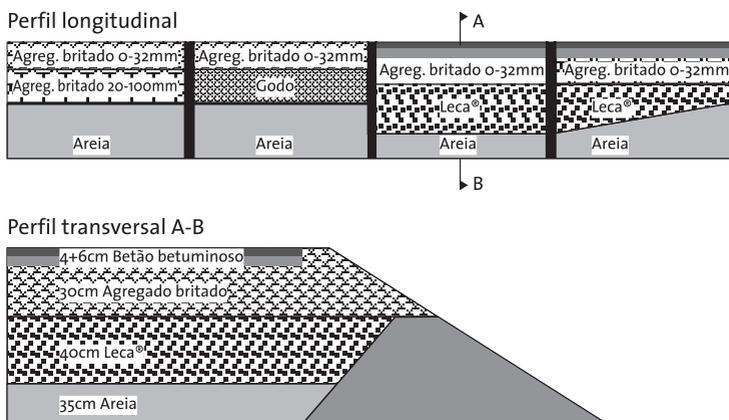


Figura 23 – Secção longitudinal e transversal da pista experimental de Sandmoen

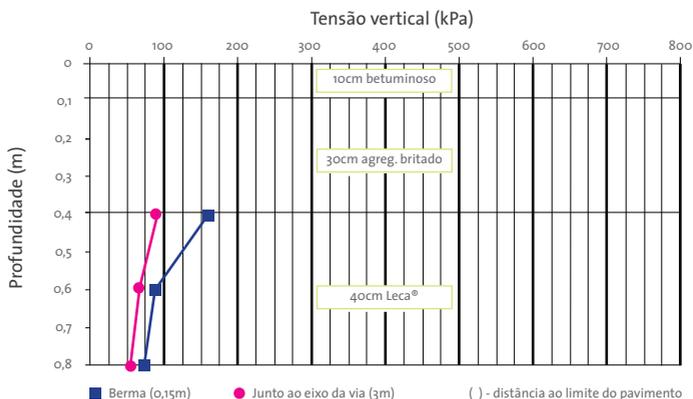


Figura 24 – Tensões registadas nas células de carga sob acção de um rodado simples com carga de 61,5 kN/690 kPa

Noutro ensaio, igualmente realizado na Noruega, foi executada uma amostra de pavimento rodoviário à escala real, sobre uma camada de Geo Leca®, tendo-se submetido a superfície do pavimento a 5 milhões de ciclos carga-descarga, com tensões que foram aumentando até atingir 700 kPa. A Figura 25 apresenta um esquema do ensaio e um gráfico com as deformações registadas no agregado leve e no pavimento. Mesmo tratando-se de uma situação extremamente penalizadora para o pavimento – repare-se que se trata de cargas aplicadas no mesmo ponto, o que não ocorre na prática – o modelo teve um bom comportamento, sendo que as deformações no agregado leve foram moderadas, mesmo após a rotura do pavimento.

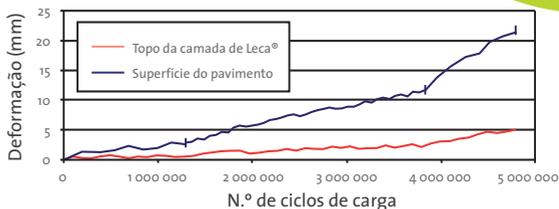
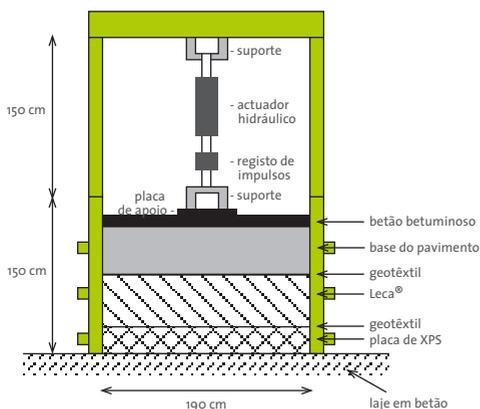


Figura 25 – Esquema e gráfico do ensaio de carregamentos cíclicos

Conclui-se assim que um pavimento rodoviário, incluindo a respectiva base/sub-base, com espessura de **40 cm**, é suficiente para assegurar uma adequada degradação em profundidade das tensões originadas pelo tráfego de veículos, sendo esta a espessura mínima preconizada para aplicações de carácter permanente.



Figura 26 – Espessura mínima de pavimento rodoviário sobre um aterro com Geo Leca®

Capítulo 4 Recomendações para o projecto e aplicação

Considerações e recomendações gerais

Um aterro com Geo Leca® é um meio drenante, dada a dimensão e forma do agregado. Por isso, em aplicações como aterros no tardo de estruturas de suporte, é dispensável o emprego de placas (ou lâminas) drenantes aplicadas no tardo. Por outro lado, em função da área e da possibilidade de afluência de água em períodos de tempo curto, poderá ser adequado prever a colocação de um tubo geodreno ou de bueiros (barbacãs), para drenar o caudal afluente à parte inferior do aterro aquando de episódios de precipitação intensa ou prolongada.

Sendo um aterro com Geo Leca® um meio granular desprovido de finos, é importante prever um geotêxtil de separação no contacto com outros materiais, quer sejam mais finos – visando evitar que as partículas mais finas migrem para o interior do aterro leve – ou mais grossos, para neste caso manter os grânulos de Geo Leca® no local devido. Assim, o geotêxtil de separação só é dispensável no contacto com elementos em betão, alvenaria ou maciços rochosos. As demais funções (filtragem, drenagem, reforço) que o geotêxtil possa ter que desempenhar deverão ser tidas em consideração, aquando do projecto, na definição das características necessárias para o geotêxtil. Deverá ainda ser considerado o emprego de **geossintéticos compatíveis com valores de pH da ordem de 9-10**.

Confinamento dos aterros leves em vias de comunicação

Existe larga experiência na utilização de agregados Leca® em obras geotécnicas, sobretudo nos países do Norte da Europa, onde existem mesmo especificações e recomendações emitidas pelas autoridades rodoviárias e ferroviárias acerca do emprego de agregados leves de argila expandida. A Figura 27 apresenta a configuração típica adoptada na Suécia para execução de aterros ferroviários.

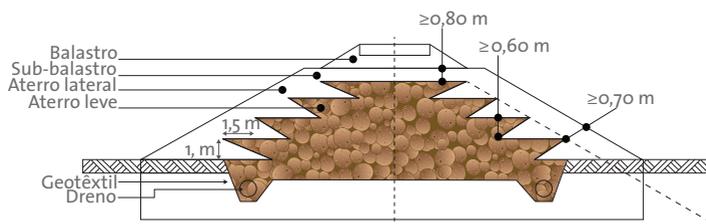


Figura 27 – Seção-tipo para aterros leves em aplicações ferroviárias adoptada na Suécia

A solução apresentada na figura 27 prevê a execução de prismas de aterro de densidade normal, com forma trapezoidal, que visam confinar lateralmente o agregado leve e assim permitir uma adequada compactação. Embora estes prismas de aterro possam ser dispensados, a sua execução é recomendada, uma vez que o confinamento da Geo Leca® permite uma melhor compactação na zona crítica que a periferia do aterro constitui. Haverá no entanto que ter cuidado no manuseamento do geotêxtil, que deverá envolver completamente o agregado leve, de modo a separá-lo de outros materiais com granulometria distinta.

No que respeita ao geotêxtil, este visa essencialmente desempenhar uma função de separação, evitando que os finos do aterro de densidade normal possam vir a ocupar o espaço vazio entre as partículas de Geo Leca®. De modo a resistir a acções de punçoamento que possam vir a surgir, decorrentes do facto de o geotêxtil oferecer

resistência à penetração de partículas eventualmente angulosas no espaço entre as partículas do agregado leve, é recomendável que no topo do aterro leve o geotêxtil apresente uma capacidade resistente superior. As especificações suecas para aplicações ferroviárias preconizam características para o geotêxtil que podem ser asseguradas com **geotêxteis não-tecidos em polipropileno** com valores de massa por unidade de área (vulgo gramagem) de **300 g/m²**. Recomenda-se a adoção deste tipo de geotêxtil no topo do aterro leve, na separação com a base do pavimento rodoviário ou com o sub-balastro, e também na parte inferior, caso existam partículas angulosas na base da escavação.

O confinamento lateral pode também ser assegurado por **gabiões** – veja-se o exemplo da Figura 28.



Figura 28 – Aterro com Geo Leca® confinado lateralmente por gabiões (A16, Cascais)

Em obras onde é necessário executar, em fases distintas, prismas de aterro leve contíguos, o confinamento pode ser conseguido à custa de geotêxteis com menores alongamentos, caso esquematizado na sequência de Figuras 29-a a 29-d, onde se vê uma possível solução para intervenção numa estrada na qual é feito o corte do trânsito num dos sentidos. Trata-se de uma solução para reabilitação de estradas nos casos em que as patologias são devidas às deformações ocorridas em profundidade,

por efeito da consolidação das formações subjacentes ao pavimento, sendo que nesta situação a execução de um aterro leve terá por efeito minimizar a ocorrência de futuros assentamentos e a conseqüente formação de rodeiras à superfície. Note-se que neste tipo de obras, o geotêxtil constitui um elemento de reforço de carácter provisório, pelo que no seu dimensionamento podem ser adoptados coeficientes para a fluência e degradação correspondentes a obras com menor duração.

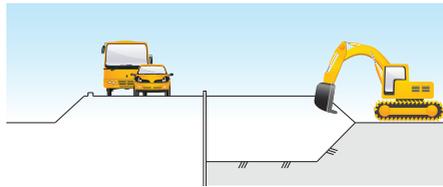


Figura 29-a – Solução para reabilitação de estradas:
Após escavação numa das faixas, execução do aterro leve, suportado lateralmente por geotêxteis



Figura 29-b – Solução para reabilitação de estradas:
Estando aberta ao trânsito a faixa executada sobre o aterro leve, é agora possível escavar a faixa remanescente

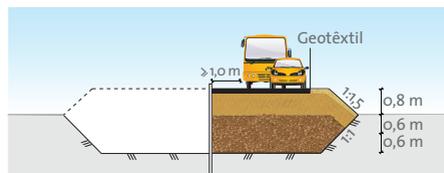


Figura 29-c – Solução para reabilitação de estradas:
Por fim, execução do aterro leve na faixa que faltava

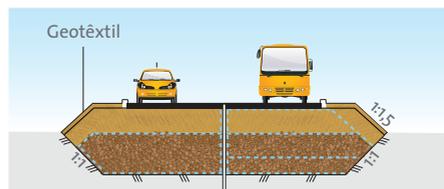


Figura 29-d – Corte da solução para reabilitação de estradas

Recomendações para a compactação

A compactação da Geo Leca® é particularmente importante em vias de comunicação, e tanto mais importante quanto menor for a espessura do aterro superior ao aterro leve. No entanto, a compactação deste material difere em larga medida das operações de compactação dos solos e agregados correntemente utilizados em aterro. A experiência acerca da compactação da Geo Leca®, conduziu à elaboração das disposições seguintes, cujo cumprimento é indispensável para se conseguir um estado de compactidade de acordo com o que vem referido no ponto 3.1.

Importa realçar uma importante diferença para com a compactação de solos e de agregados britados em geral: **no caso da Geo Leca® não se deverão utilizar cilindros compactadores directamente sobre o material.** Por um lado, o nível de tensão produzida por este tipo de equipamento é passível de originar uma fragmentação excessiva do agregado leve, e por outro a sua circulação é dificultada pela própria natureza do agregado: o impulso passivo (reação) que é possível mobilizar na parte posterior dos cilindros é proporcional ao peso do agregado, pelo que esta reacção poderá não ser suficiente para permitir a circulação deste tipo de equipamento.

A compactação tem a vantagem de poder ser executada pelos mesmos equipamentos que fazem o espalhamento do agregado leve: tractores de rastos (*bulldozers*). É conveniente adoptar equipamentos cuja tensão de contacto com o solo (*ground pressure*) seja inferior a 50 kPa, de modo a limitar a fragmentação do agregado leve. Assim sendo, não é o peso total do equipamento que permite decidir acerca da sua aplicabilidade, mas sim a tensão de contacto. Por exemplo, um equipamento do tipo “D7”, com rastos do tipo LPG (*Low Pressure on Ground*), geralmente origina tensões de contacto inferiores .

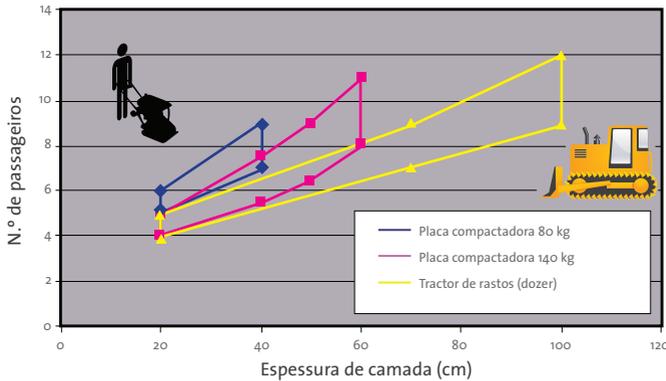


Figura 30 – Passagens e espessuras para compactação de aterros com Geo Leca®

Para a compactação de zonas localizadas, tais como o tardo de muros ou a periferia de outros elementos estruturais, condutas ou caixas de visita, é recomendada a utilização de placas compactadoras, que geralmente pesam entre 80 e 140 kg. Nas Figuras 31-a e 31-b temos o exemplo de uma obra na qual a compactação foi efectuada com tractor de rastos e com placa vibratória.



Figura 31-a – Aterro com Geo Leca® na reabilitação de um encontro de ponte (A25, Aveiro) – compactação por placa vibratória

Figura 31-b – idem anterior – compactação com tractor de rastos

É possível constatar que a energia dispendida no processo de compactação da Geo Leca® é inferior à que se aplica na compactação de solos ou agregados britados. A reduzida massa volúmica das partículas do agregado leve permite que forças relativamente moderadas originem o deslocamento destas no sentido da sua inter-aproximação, o que se traduz na redução do espaço vazio entre as mesmas e na consequente compactação da camada de aterro leve.

Seguindo os procedimentos apresentados, a compactação originará uma diminuição da espessura de cada camada e consequentemente do volume do aterro de cerca de 10% (conforme exposto em 3.1), sendo este estado de compactidade imprescindível para garantir um adequado desempenho a longo prazo do aterro leve em vias de comunicação.

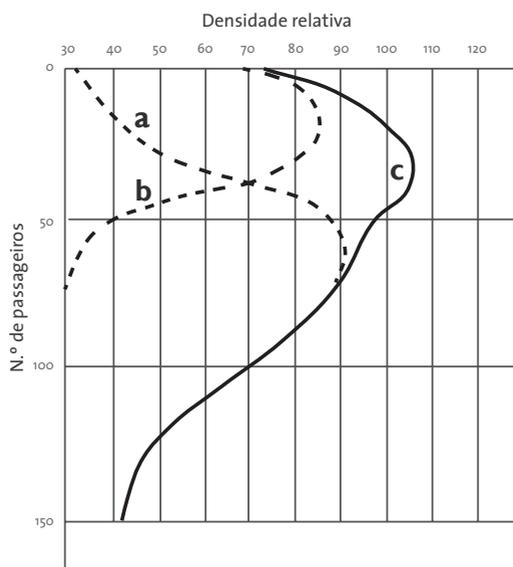


Figura 32 – Efeito da ação dinâmica (curva a) e estática (curva b) originadas por cilindros compactadores, e efeito combinado de ambas as ações (curva c) – Adaptado de Di Prisco (2007)

Há ainda a referir que durante a operação de compactação das **camadas constituintes do pavimento**, superiores ao aterro leve, o efeito dos cilindros compactadores far-se-á sentir também no aterro leve, em especial na parte superior do mesmo, ainda que o cilindro não circule directamente sobre a Geo Leca®. Ensaios realizados demonstram que a acção combinada das acções estática e dinâmica produzidas por um cilindro compactador atinge um máximo entre 30 e 70 cm de profundidade. A Figura 32 representa esquematicamente a combinação das acções referidas (curva **c**), onde a curva **b** traduz o efeito do peso do equipamento e a curva **a** representa o efeito das acções dinâmicas originadas pelo mesmo equipamento.

O aterro convencional acima do aterro leve deve ser executado conforme os procedimentos usuais e atendendo ao tipo de via em causa. É no entanto recomendável que a camada imediatamente acima do aterro leve seja executada com uma espessura de 30 cm, de modo a permitir uma adequada degradação do peso próprio do equipamento e simultaneamente promover uma compactação complementar na camada superior do aterro leve. É ainda recomendável um número mínimo de 6 passagens do cilindro compactador nesta camada, a executar por norma com agregados britados.



Figura 33 – Espessura mínima recomendada para a compactação da camada granular imediatamente acima do aterro com Geo Leca® e número mínimo de passagens do cilindro compactador

Aterro leve armado

Uma das aplicações da Geo Leca® é em aterros leves reforçados (ou armados) com geossintéticos. As estruturas do tipo aterro reforçado apresentam, em relação aos muros de suporte em betão armado, algumas vantagens, sobretudo por não implicar a existência de sapatas que transmitem tensões, por vezes incompatíveis com o solo de fundação. Em alguns casos, um aterro (armado ou não) executado com solos origina assentamentos elevados nas formações sobre as quais se encontra, por efeito da consolidação destas formações. Tratando-se de um aterro próximo à crista de uma encosta, poderá até implicar uma degradação das condições de segurança da mesma.

Nestes casos particulares, um aterro leve com Geo Leca® reforçado com geogrelhas poderá ser a solução.

Tratando-se de um agregado leve, tanto o impulso activo como o de repouso serão inferiores aos correspondentes a um aterro com densidade normal, pelo que também a tensão nos elementos de reforço será inferior. As Figuras 34 e 35 ilustram diferentes exemplos deste tipo de solução.



Figura 34 – Aterro com Geo Leca® reforçado com geogrelhas nas margens de uma albufeira

Figura 35 – Muros de alca sobre formação aluvionar, com Geo Leca® e reforço com geogrelhas

O transporte da Geo Leca®

O transporte é feito, em geral, por meio de semi-reboques graneleiros, com capacidade de transportar volumes de Geo Leca® na ordem de 65 m³, o que permite responder com rapidez às necessidades das obras. As Figuras 36 e 37 apresentam exemplos de obras fornecidas nesta modalidade.



Figura 36 – Utilização de Geo Leca® na reabilitação do muro de gabiões que suporta o parque de estacionamento junto à Embaixada dos EUA (Lisboa)



Figura 37 – Geo Leca® no tardo de um muro de suporte na Zona Industrial de Avintes (Gaia)

Em locais onde não é possível a descarga directa da Geo Leca® através de camiões graneleiros, é possível a utilização de semi-reboques equipados com cisternas, capazes de transportar volumes da ordem de 50 m³ e de proceder à sua descarga por bombagem em cerca de 2 horas – Figuras 38 e 39.



Figura 38 – Descarga de Geo Leca® a partir de cisterna no tardo de um muro de gabiões (IC9, Tomar)



Figura 39 – Bombagem de Geo Leca® para o tardo de um muro (Estação de Alfarelos, Soure)

É mesmo possível a bombagem até locais significativamente afastados da cisterna. É o exemplo apresentado nas Figuras 40-a e 40-b, onde se procedeu à bombagem de Geo Leca® para um ponto distante 40 m na horizontal e 15 m na vertical do local onde estava estacionado o camião-cisterna.



Figura 40-a e 40-b – Forneimento de Geo Leca® a partir de cisterna na zona do Chiado (Lisboa)

Considerações finais

A Geo Leca® é um material cujas características e propriedades permitem a sua utilização em diversos tipos de obras.

Nas diversas situações referenciadas, a utilização de Geo Leca® permitiu executar obras em cenários geotécnicos desfavoráveis, com rapidez excepcional em locais de difícil acesso, ou permitiu a adopção de soluções estruturais mais económicas.

Na Europa, a experiência na utilização dos agregados Leca® em obras de Engenharia é superior a meio século. A aptidão da solução está comprovada tanto pelas décadas de experiência transcorridas desde as primeiras aplicações, como pelos estudos e projectos de investigação que têm vindo a ser feitos e que permitem conhecer de forma adequada o comportamento de aterros executados com Geo Leca®, sobretudo em vias de comunicação. Além de ser um agregado leve que pode ser produzido em larga escala a partir de uma matéria-prima de origem sedimentar, é insensível à acção de hidrocarbonetos e de quaisquer outros compostos orgânicos, de ácidos e de álcalis.



A utilização de Geo Leca® permite evitar o desmonte de uma quantidade significativa de maciços rochosos. Cada m³ de argila utilizado no fabrico de Geo Leca® evita o desmonte de cerca de 5 m³ de rochas para a produção de agregados britados, minorando os impactos sobre a paisagem. Como alternativa ao uso de areias naturais,

a utilização de Geo Leca® evita o consumo de um material cuja exploração apresenta, em geral, impactos negativos sobre os meios fluviais e orla costeira. O transporte de Geo Leca® apresenta, comparativamente a outros agregados disponíveis à mesma distância, um menor impacto sobre a rede rodoviária ao permitir um menor número de viagens, para além de permitir um menor consumo de combustíveis no transporte e nas operações de compactação.

Um pequeno exercício permite comparar o impacto sobre a rede rodoviária da utilização de Geo Leca® e de agregados com massa volúmica normal. De um modo geral, não é possível transportar por via rodoviária cargas com peso superior a 24 toneladas. Este peso, para um agregado corrente, representa c. 12 m³. No entanto, 24 ton. de Geo Leca® traduzem-se em 72 m³, ou seja, um volume 6 vezes superior. Daí, em uma obra onde se pondere a utilização de Geo Leca® ou de agregados correntes disponíveis a uma distância equivalente, esta última hipótese representa um número de viagens 6 vezes superior. Por exemplo, para cada 1000 m³ de aterro, são necessários, no mínimo, 83 carregamentos de agregados correntes (admitindo 12 m³/carregamento e 2000 kg/m³) ou, optando por Geo Leca®, apenas 14 carregamentos (72 m³/carregamento = 24 ton.).

Por todos os motivos apresentados, a Geo Leca® tem vindo a afirmar-se cada vez mais como uma solução inteligente e sustentável para as obras de Engenharia, qualquer que seja a sua dimensão.

Glossário

Agregado – Material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia

Agregado leve – Agregado cujas partículas apresentam massa volúmica inferior a $2\,000\text{ kg/m}^3$ e com massa volúmica aparente (baridade), no estado solto, inferior a $1\,200\text{ kg/m}^3$

Ângulo de resistência ao corte (ou ângulo de atrito interno) – Ângulo cuja tangente equivale à razão entre as tensões de corte e de compressão que um material granular é capaz de suportar

Bloating clays – Argilas nas quais, num processo de cozedura a determinadas temperaturas, ocorre a formação de bolhas de gases que originam expansão do volume inicial do material, ao ficarem retidas numa matriz cerâmica em estado fundente

Coesão – Capacidade que um material apresenta de resistir a tensões de corte sem estar sujeito a tensões de compressão, apresentando valores geralmente baixos nos meios granulares

Coefficiente de uniformidade – Razão entre D_{60} – abertura do crivo que permite a passagem de 60% (em massa) de um agregado – e D_{10} – diâmetro do crivo que permite a passagem de 10% do agregado, sendo que a permeabilidade de um meio granular é tanto mais elevada quanto mais próximo da unidade estiver situado o seu coeficiente $C_u = D_{60} / D_{10}$

Compacidade – Estado de um material granular ou solo face aos volumes de vazios (exteriores) mínimo (estado compacto) ou máximo (estado solto)

Compactação – Operação ou conjunto de operações que visam diminuir o volume de vazios (exteriores) contidos numa camada de agregados ou solos

Compressão – Acção de uma força exterior a um material ou peça que tende a diminuir a dimensão espacial em cuja direcção actua esta força, por opposição a tracção

Confinamento – Função de restrição das deformações de um material granular, desempenhada por prismas laterais de aterro (recobrimento lateral) e geotêxteis

Corte – Acção de uma força com direcção tangencial a um elemento, sendo a resistência ao corte a capacidade de um material se opor a esta acção (os fluidos, por definição, não apresentam resistência ao corte)

Deformação – Variação de uma qualquer dimensão espacial (largura, comprimento, espessura) de um material ou de uma peça, em consequência da actuação de uma força externa, interna ou variação de temperatura (utiliza-se por vezes com o sentido de extensão – v .)

Dimensão do agregado – Designação do agregado em termos das aberturas do peneiro inferior (d) e do superior (D), expressa como d/D , que admite a presença de algumas partículas retidas no peneiro superior (sobretamanhos) e de algumas que passam no peneiro inferior (subtamanhos)

Edométrico – Ensaio destinado a medir a deformabilidade de um solo ou material granular em molde cilíndrico, no sentido axial, logo com deformação radial impedida e carga aplicada por escalões

Extensão – Razão entre a deformação sofrida por um material, sob acção de uma determinada tensão, e a dimensão inicial do mesmo

Extensão resiliente – Componente da extensão que é recuperada quando cessa a aplicação da carga

Fluência – Efeito de aumento diferido no tempo da extensão de um material ou peça sujeita a uma tensão constante

Granular – Material formado por partículas com dimensões reduzidas mas suficientemente elevadas para que a interacção entre as mesmas seja de natureza mecânica, como os agregados em geral

Granulometria – Distribuição dimensional das partículas de um material granular que passam (passados) numa série especificada de peneiros, expressa pelas percentagens em massa dos passados

Ligante – Material finamente pulverizado (ligantes hidráulicos) ou líquidos viscosos (ligantes hidrocarbonados) com capacidade de se aderir a partículas minerais ou de outra natureza, e que ao passar do estado fluido para o estado sólido formam materiais que apresentam coesão

Índice de vazios (e) – Razão entre o volume dos vazios de um agregado e o volume ocupado pela fase sólida

LWA – Abreviatura de Light Weight Aggregate, utilizada para designar agregados leves em geral

Massa volúmica das partículas – Razão entre a massa e o

volume ocupado pelas partículas de um agregado, sem ter em conta o volume de vazios entre as partículas

Massa volúmica aparente (baridade) – Razão entre a massa e o volume de um material granular, incluindo neste volume o espaço entre as partículas

Módulo de deformabilidade – Razão entre o aumento de tensão exercida sobre um material ou peça e a sua consequente extensão, sendo o módulo dito edométrico se determinado no ensaio edométrico

Módulo de resiliência ou módulo resiliente (M_r ou E_r) – Parâmetro usado para o estudo da deformabilidade de um material em condições dinâmicas, no regime elástico, determinado em ensaios triaxiais cíclicos, que se define como a razão entre a tensão desviatória (ou tensão de desvio) aplicada e a deformação axial recuperável do provete, no final do ciclo de aplicação de cargas

Sobretamanhos (D) – Partículas retidas no peneiro superior de uma série, cuja percentagem em massa num agregado leve não deve exceder 10%

Subtamanhos (d) – Partículas passadas no peneiro inferior de uma série, cuja percentagem em massa num agregado leve não deve exceder 15%

Pavimentos rodoviários – Estruturas estratificadas, compostas por um conjunto de camadas sobrepostas constituídas por diversos materiais (agregados com ou sem ligantes betuminosos ou hidráulicos), adequadamente compactadas, aproximadamente horizontais e de alguns centímetros de espessura, que permitem suportar a repetida aplicação de cargas transmitidas pelos rodados dos veículos

Permeabilidade – Capacidade que um meio poroso apresenta de permitir a passagem de água ou outros fluidos

Porosidade (n) – Razão entre o volume dos vazios de um agregado e o volume total aparente.

Tensão – Força por unidade de área, podendo ser normal (i.e. perpendicular) a uma superfície (compressão e tracção) ou tangencial (corte)

Teor em água ou teor de humidade (w) – Razão entre a massa (ou o peso) da água presente num agregado e a massa (ou o peso) do mesmo após secagem

Conversão de unidades para o Sistema Internacional

COMPRIMENTO

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
Pé (ft)	0,3048	m
Polegada (in)	0,0254	m
yd (jarda)	0,9144	m

ÁREA

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
Pé quadrado (ft ²)	0,06451	m ²
Polegada quadrada (in ²)	9,290304	m ²

VOLUME

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
Pé cúbico (ft ³)	0,028317	m ³
Polegada cúbica (in ³)	0,00001639	m ³

FORÇA

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
kgf	9,8	N
libra força (lbf)	4,45	N

PRESSÃO

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
bar	10 000	Pa
mca (metro de coluna de água)	9,80665	Pa
lbf/ft ² (psf)	47,88	Pa
lbf/in ² (psi)	6 895	Pa
kgf/cm ²	98 066,5	Pa

MASSA VOLÚMICA

Unidade	Factor de conversão	Unidade SI
g/l	1	kg/m ³
g/cm ³	1000	kg/m ³
lbm/ft ³ (psf)	16,018	kg/m ³
lbm/in ³ (psi)	27 680	kg/m ³

Índice de figuras e quadros

Figuras

Figura 1	– Representação esquemática da produção dos agregados Leca®	7
Figura 2	– Grânulo de Leca®: corte e representação esquemática dos poros no interior	8
Figura 3	– Curva granulométrica média da Geo Leca® e franja de variação	9
Figura 4	– Vazios exteriores presentes em 1 m ³ de Geo Leca® no estado solto.....	11
Figura 5	– Vazios interiores em 1 m ³ de Geo Leca®, acessíveis e inacessíveis à água.....	11
Figura 6	– Redução de volume vs. duração da vibração.....	15
Figura 7	– Curva tensão-deformação da Geo Leca®, compactada a 10% por vibração	15
Figura 8	– Módulo de deformabilidade da Geo Leca®, obtido a partir de ensaios de resistência à compressão (compactada a 10% por vibração).....	16
Figura 9	– Curvas tensão-deformação da Geo Leca® no estado solto e compactada a 10% por vibração.....	17
Figura 10	– Variação do módulo edométrico (M) da Geo Leca® após redução de volume de 10% por vibração, em função do nível de tensão aplicada	18
Figura 11	– Aspecto de um provete de Geo Leca® após ensaio de resistência ao esmagamento	19
Figura 12	– Execução do ensaio de fluência sob compressão no laboratório do SINTEF, na Noruega	20
Figura 13	– Definição do conceito de <i>time resistance</i>	21
Figura 14	– Curvas de fluência dos agregados Leca® para utilizações geotécnicas produzidos pela Saint-Gobain na Europa.....	22
Figura 15	– Comparação entre os valores do parâmetro r_c (<i>creep resistance number</i>) dos agregados Leca® para utilizações geotécnicas produzidos pela Saint-Gobain na Europa.....	22
Figura 16	– Forma da onda utilizada no ensaio de compressão cíclica.....	23
Figura 17	– Envoltivo de rotura da Geo Leca® obtida a partir de ensaios triaxiais.....	24
Figura 18	– Representação gráfica do módulo de resiliência de um material	26
Figura 19	– Esquema de carregamento no ensaio triaxial	27
Figura 20	– Envoltivos de comportamento elástico e elasto-plástico obtidas a partir de ensaios triaxiais cíclicos	28
Figura 21	– Gráfico do ensaio de compactação por vibração em molde cilíndrico	33
Figura 22	– Pista experimental de Sandmoen (Noruega).....	36
Figura 23	– Secção longitudinal e transversal da pista experimental de Sandmoen	36
Figura 24	– Tensões registadas nas células de cargas sob acção de um rodado simples com carga de 61,5 kN/690 kPa.....	37
Figura 25	– Esquema e gráfico do ensaio de carregamentos cíclicos	38
Figura 26	– Espessura mínima de pavimento rodoviário sobre um aterro com Geo Leca®	38
Figura 27	– Secção-tipo para aterros leves em aplicações ferroviárias adoptada na Suécia.....	40
Figura 28	– Aterro com Geo Leca® confinado lateralmente por gabiões (A16, Cascais).....	41

Figura 29-a – Solução para reabilitação de estradas:.....	42
Após escavação numa das faixas, execução do aterro leve, suportado lateralmente por geotêxteis	42
Figura 29-b – Solução para reabilitação de estradas: Estando aberta ao trânsito a faixa executada sobre o aterro leve, é agora possível escavar a faixa remanescente.....	42
Figura 29-c – Solução para reabilitação de estradas: Por fim, execução do aterro leve na faixa que faltava.....	42
Figura 29-d – Corte da solução para reabilitação de estradas	42
Figura 30 – Passagens e espessuras para compactação de aterros com Geo Leca®	44
Figura 31-a – Aterro com Geo Leca® na reabilitação de um encontro de ponte (A25, Aveiro) – compactação por placa vibratória.....	44
Figura 31-b – idem anterior – compactação com tractor de rastos	44
Figura 32 – Efeito da acção dinâmica e estática originadas por cilindros compacta- dores e efeito combinado de ambas as acções.....	45
Figura 33 – Espessura mínima recomendada para a compactação da camada granular imediatamente acima do aterro com Geo Leca® e número mínimo de passagens do cilindro compactador	46
Figura 34 – Aterro com Geo Leca® reforçado com geogrelhas nas margens de uma albufeira.....	47
Figura 35 – Muros de ala sobre formação aluvionar, com Geo Leca® e reforço com geogrelhas.....	47
Figura 36 – Utilização de Geo Leca® na reabilitação do muro de gabiões que suporta o parque de estacionamento junto à Embaixada dos EUA (Lisboa).....	48
Figura 37 – Geo Leca® no tardo de um muro de suporte na Zona Industrial de Avintes (Gaia)	49
Figura 38 – Descarga de Geo Leca® a partir de cisterna no tardo de um muro de gabiões (IC9, Tomar)	49
Figura 30 – Bombagem de Geo Leca® para o tardo de um muro (Estação de Alfarelos, Soure)	50
Figura 40-a e 40-b – Fornecimento de Geo Leca® a partir de cisterna no bairro do Chiado (Lisboa).....	50

Quadros

Quadro 1 – Vazios presentes na Geo Leca®	10
Quadro 2 – Volume de vazios existentes em 1 m ³ de Geo Leca®	12
Quadro 3 – Sequências e escalões de cargas no ensaio triaxial cíclico	27
Quadro 4 – Pesos volúmicos médios para pré-dimensionamento	30

Bibliografia

Høva, E. and Gylland, A. (2009) – “Documentation of material properties for Leca aggregates”. SINTEF Report n.º SBF IN F09411

Høva, E. and Gylland, A. (2009) – “Correlation of material properties for Leca LWA”. SINTEF Report n.º SBF IN F09412

Høva, E. (2009) – “Documentation of material properties for Leca aggregates and evaluated characteristic geotechnical parameters”. SINTEF Report n.º SBF IN F09414

Watn, A. et al (2004) – “LWA Geolight, LWA for Roads and Railways (Final Technical Report)”. SINTEF Report n.º STF22 F0420

Hoff, I. (2000) – “Exclay Internordic Geoproject, Field Test in Sandmoen, Norway – Construction and Instrumentation”. SINTEF Report n.º STF22 F00612

Caldeira, L. et al (2009) – “Estudos fundamentais e aplicados sobre agregados leves de argila expandida. Uma abordagem geotécnica. LNEC, Seminário Geo Leca®

“BVS 585.11: Lättfyllning i järnvägsbankar”, Banverket, Suécia (2003)

“Lättklinker i vägkonstruktioner – Allmän teknisk beskrivning”, Vägverket, Suécia (2003)

Hansen, K. (1992) – “Kapillarsugning af Letklinkernødder udtaget fra Terrængulvkonstruktion”. Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole, Teknisk Rapport 244/92

Di Prisco, C. (2007) – “Applicazioni geotecniche e caratterizzazione meccanica dell’argilla espansa Leca”. Laterlite S.p.A., Itália

Almeida, P. (2009) – “Influência da humidade relativa no comportamento mecânico da LECA”. Dissertação 05/2009, Instituto Superior Técnico