

Efeito de confinamento das geogrelhas
Análise da composição granulométrica do agregado
(Versão final após defesa pública)

Constantino Kapamba

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Mestrado Integrado)

Orientadora: Prof.^a Doutora Isabel Maria da Conceição Fonseca Gonçalves Falorca

Janeiro de 2026

Declaração de Integridade

Eu, Constantino Kapamba, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 40094 do ciclo de estudos integrado conducente ao grau de Mestre em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridade da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 14/01/2026

Constantino Kapamba

Dedicatória

À família Matos, com profunda gratidão e carinho.

Pela presença constante, pelo apoio incondicional e pelas palavras de incentivo nos momentos mais desafiantes. Esta dissertação é fruto não apenas do meu esforço, mas também da força que recebi de vocês.

Obrigado por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidava. Este trabalho é também vosso.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mulher, pela paciência, compreensão e apoio incondicional ao longo de toda esta jornada. A tua presença foi essencial nos momentos de maior desafio e dúvida.

À família Matos, pela generosidade, acolhimento e incentivo constante. O vosso apoio foi uma força silenciosa mas poderosa que me acompanhou até aqui.

Aos meus colegas, pela partilha de conhecimentos, pelas conversas inspiradoras e pela camaradagem que tornaram este percurso mais leve e enriquecedor.

À minha família, pelo amor, pela educação e pelos valores que me guiaram desde sempre.

A minha orientadora, pela orientação rigorosa, disponibilidade e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho e o tornaram possível.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, o meu sincero e profundo agradecimento.

Resumo

O uso de geogrelhas no reforço e estabilização de materiais granulares tem-se revelado uma solução eficiente, durável e sustentável em diversas aplicações, incluindo estradas não revestidas, aterros e taludes. A sua eficácia está diretamente relacionada com a interação entre a geogrelha e o agregado, a qual depende de parâmetros como a distribuição granulométrica, a forma e a rigidez das partículas, bem como das propriedades geométricas e mecânicas da própria geogrelha. A compreensão aprofundada desses mecanismos é essencial para otimizar o desempenho das estruturas de solo reforçado, reduzir deformações e aumentar a vida útil das infraestruturas.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho decorre da crescente necessidade de soluções geotécnicas que conciliem eficiência técnica, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. O emprego de geossintéticos, e em particular de geogrelhas, permite reduzir o consumo de materiais naturais, melhorar a integridade estrutural do material compósito e favorecer o uso de agregados reciclados, contribuindo para práticas mais sustentáveis na Engenharia Civil. É neste contexto que se insere a presente dissertação, cujo objetivo geral é realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a interação geogrelha-agregado, analisando os principais mecanismos de reforço e estabilização, bem como o efeito da distribuição granulométrica no comportamento conjunto do sistema solo-reforço.

O estudo destaca a importância de compreender os fenômenos de imbricamento, atrito e confinamento lateral, que governam a transferência de esforços entre o agregado e a geogrelha, e discute como diferentes combinações de materiais e condições de carregamento influenciam o desempenho global. A análise crítica da literatura demonstra o potencial das geogrelhas como elementos de reforço em soluções sustentáveis, com benefícios tanto técnicos quanto ambientais, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico em Geotecnia.

Palavras-chave

Geogrelhas; Agregado; Distribuição granulométrica; Interação geogrelha-agregado; Estabilização; Reforço; Revisão bibliográfica; Geotecnia; Sustentabilidade

Abstract

The use of geogrids for the reinforcement and stabilisation of granular materials has proven to be an efficient, durable, and sustainable solution in various applications, including unpaved roads, embankments, and slopes. Their effectiveness is directly related to the interaction between the geogrid and the aggregate, which depends on parameters such as particle size distribution, particle shape and stiffness, as well as the geometric and mechanical properties of the geogrid itself. A thorough understanding of these mechanisms is essential to optimize the performance of reinforced soil structures, reduce deformations, and extend the service life of infrastructures.

The motivation for this research arises from the growing need for geotechnical solutions that balance technical efficiency, economic feasibility, and environmental sustainability. The use of geosynthetics, particularly geogrids, helps reduce the consumption of natural materials, improve the structural integrity of the composite material, and promote the use of recycled aggregates, thus contributing to more sustainable practices in Civil Engineering. Within this context, the main objective of this dissertation is to carry out a comprehensive literature review on geogrid–aggregate interaction, analysing the key reinforcement and stabilisation mechanisms, as well as the influence of particle size distribution on the overall behaviour of the soil–reinforcement system.

The study emphasizes the importance of understanding the interlocking, friction, and lateral confinement phenomena that govern load transfer between the aggregate and the geogrid, and discusses how different combinations of materials and loading conditions affect overall performance. The critical review of the literature demonstrates the potential of geogrids as reinforcement elements in sustainable solutions, offering both technical and environmental benefits, and contributing to the advancement of technical and scientific knowledge in Geotechnics.

Keywords

Geogrids; Aggregate; Particle size distribution; Geogrid-aggregate interaction; Stabilisation; Reinforcement; Literature review; Geotechnics; Sustainability

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.1.1. Geogrelhas: conceitos e aplicações	1
1.1.2. Problema de investigação	4
1.2. Objetivos do trabalho	5
1.3. Estrutura da dissertação	5
2. Metodologia	9
2.1. A abordagem de investigação adotada	9
2.1.1. Questão de investigação	10
2.1.2. Critérios de inclusão e exclusão	11
2.2. Estratégia de pesquisa bibliográfica	12
2.2.1. Bases de dados consultadas	12
2.2.2. Termos de pesquisa	12
2.2.3. Seleção das publicações	14
2.3. Qualidade e pertinência das publicações selecionadas	14
2.4. Síntese das publicações e extração de dados para análise	15
3. Efeito de confinamento das geogrelhas	17
3.1. Características do agregado	17
3.1.1. Definição	17
3.1.2. Propriedades do agregado	17
3.1.3. Parâmetros da distribuição granulométrica	18
3.2. Propriedades das geogrelhas	19
3.2.1. Geogrelha (GGR)	19
3.2.2. Tipos de Geogrelhas	19
3.2.3. Funções das geogrelhas	21
3.2.4. Mecanismos de interação com o agregado	22
3.3. Mecanismos do efeito de confinamento lateral	23
3.3.1. Efeito de confinamento das geogrelhas	23
3.3.2. Mecanismos principais do efeito de confinamento	25
3.4. Estratégias de otimização do efeito de confinamento	27
3.4.1. Fatores de influência do efeito de confinamento	27
3.4.2. Ajustes geométricos das geogrelhas	27
3.4.3. Ajustes do agregado	28
3.4.4. Posição e número de camadas	29

3.5.	Considerações finais	30
4.	Influência da distribuição granulométrica do agregado na otimização do efeito de confinamento das geogrelhas	31
4.1.	Influência da distribuição granulométrica do agregado	31
4.1.1.	Caraterísticas granulométricas consideradas na análise	31
4.1.2.	Compatibilidade geométrica	33
4.1.3.	Tendências e variações nos resultados	33
4.2.	Discussão dos resultados	35
4.3.	Recomendações para a seleção do agregado	36
4.3.1.	Considerações práticas na seleção de agregados	37
5.	Conclusão	39
5.1.	Conclusões gerais	39
5.1.1.	Síntese das principais conclusões	39
5.1.2.	Contributos da dissertação	39
5.1.3.	Limitações identificadas	39
5.2.	Sugestões para desenvolvimentos futuros	40
	Bibliografia	41

Lista de Figuras

Figura 1.1. Classificação dos geossintéticos (Lopes et al., 2021).....	2
Figura 1.2. Geogrelha incorporada numa camada de agregado.	2
Figura 1.3. Utilização com a função de estabilização.	3
Figura 1.4. Plano do trabalho, relacionando objetivos, metodologia e estrutura da dissertação.	6
Figura 3.1. Função de estabilização. (cortesia da Tensar International)	21
Figura 3.2. Função de reforço. (cortesia da Tensar International)	22
Figura 3.3. Intertravamento resultante da penetração das partículas do agregado nas aberturas da geogrelha. (cortesia da Tensar International)	24
Figura 3.4. Mecanismos principais do efeito de confinamento.	26
Figura 4.1. Relação entre o coeficiente de resistência da interface e a percentagem de partículas < 2 mm.	32
Figura 4.2. Influência da distribuição granulométrica do agregado na capacidade de suporte.	32

Lista de Quadros

Quadro 2.1.	Explicitação da questão de investigação e escolha das palavras-chave.	10
Quadro 2.2.	Bases de dados consultadas.	12
Quadro 2.3.	Definição dos termos de pesquisa.	13
Quadro 2.4.	Critérios de qualidade e de pertinência, e respetiva pontuação.	15
Quadro 2.5.	Guião de extração de dados.	16
Quadro 3.1.	Propriedades das partículas do agregado.	18
Quadro 3.2.	Parâmetros da distribuição granulométrica.	19
Quadro 3.3.	Tipos de geogrelhas produzidas pelo processo de estiramento.	20
Quadro 3.4.	Efeitos de confinamento das geogrelhas.	24
Quadro 4.1.	Relação entre C_U e o desempenho do material compósito.	33
Quadro 4.2.	Relação entre D_{50} / A e o desempenho do material compósito.	34
Quadro 4.3.	Relação entre C_C do agregado e o desempenho do material compósito.	34
Quadro 4.4.	Propriedades das partículas e impacto na função de estabilização das geogrelhas.	35

Lista de Símbolos e Siglas

Alfabeto Latino

A	Abertura da geogrelha (mm)
C_2	Potencial de confinamento da geogrelha a 2% de deformação (N/m)
C_c	Coefficiente de curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
$D_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo das partículas determinado por peneiração (mm)
D_{10}	Diâmetro efetivo das partículas (mm)
D_{30}	Diâmetro das partículas a que corresponde 30% em massa de material acumulado mais fino (mm)
D_{50}	Diâmetro mediano das partículas (mm)
D_{60}	Diâmetro das partículas a que corresponde 60% em massa de material acumulado mais fino (mm)
D_{90}	Diâmetro das partículas a que corresponde 90% em massa de material acumulado mais fino (mm)
f	Coefficiente de resistência da interface agregado-geogrelha
F_{R2}	Força na nervura a 2% de deformação (N)
p	Espaçamento entre nervuras (m)

Siglas

CBR	California Bearing Ratio
FCCN	Fundação para a Computação Científica Nacional
GSY	Geossintéticos
GGR	Geogrelhas
IGS	International Geosynthetics Society
ISSMGE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
RCAAP	Repositório Científico de Acesso Aberto de Portugal

Capítulo 1

1. Introdução

No presente capítulo é feita uma contextualização do tema da dissertação, explicando a sua importância e estabelecendo as bases do trabalho proposto. Isso inclui a introdução geral e definição dos conceitos e termos principais relacionados com o tema, a justificativa da sua relevância para a Engenharia Civil, a definição do problema a explorar e a apresentação dos objetivos que levaram à realização do trabalho. Por fim, é apresentada a abordagem metodológica e a estrutura da dissertação.

1.1. Enquadramento do tema

As geogrelhas são materiais geossintéticos amplamente utilizadas em obras de Engenharia Civil, nomeadamente em infraestruturas de transportes, para aumentar a resistência a deformações horizontais nas camadas granulares por meio do confinamento lateral. Este processo ocorre devido à interação entre as partículas do agregado e a geogrelha, conferindo maior estabilidade e durabilidade à camada granular. Isso proporciona uma melhoria da capacidade de carga ou a redução da espessura da camada de agregado, resultando em economia de materiais e de custos de construção. A eficácia do processo de confinamento lateral depende de fatores como a rigidez da geogrelha, a composição granulométrica do agregado e a qualidade da instalação em obra.

A presente dissertação foca-se na composição granulométrica do agregado, analisando a sua influência na otimização do efeito de confinamento das geogrelhas. Nas subsecções seguintes são abordados os tópicos principais deste tema, que permitem contextualizar o estado atual do conhecimento sobre a relação entre a distribuição granulométrica do agregado e a eficiência das geogrelhas na estabilização e reforço dos materiais granulares.

1.1.1. Geogrelhas: conceitos e aplicações

O termo geossintético (GSY) designa um material em que pelo menos um dos seus componentes é um polímero sintético em forma de tela, tira ou estrutura tridimensional (Figura 1.1), utilizado em aplicações de Engenharia Civil e Geotécnica. As geogrelhas (GGR) são estruturas poliméricas planas, constituídas por uma malha regular de elementos resistentes à tração, dispostos em uma estrutura bidimensional e multiaxial que permite o intertravamento das partículas granulares. Quando incorporadas no solo ou em uma

camada de agregado (Figura 1.2), as geogrelhas criam um sistema de confinamento que restringe o movimento lateral das partículas. Esse confinamento aumenta a rigidez e a capacidade de carga do material compósito e reduz a sua deformabilidade sob cargas aplicadas.

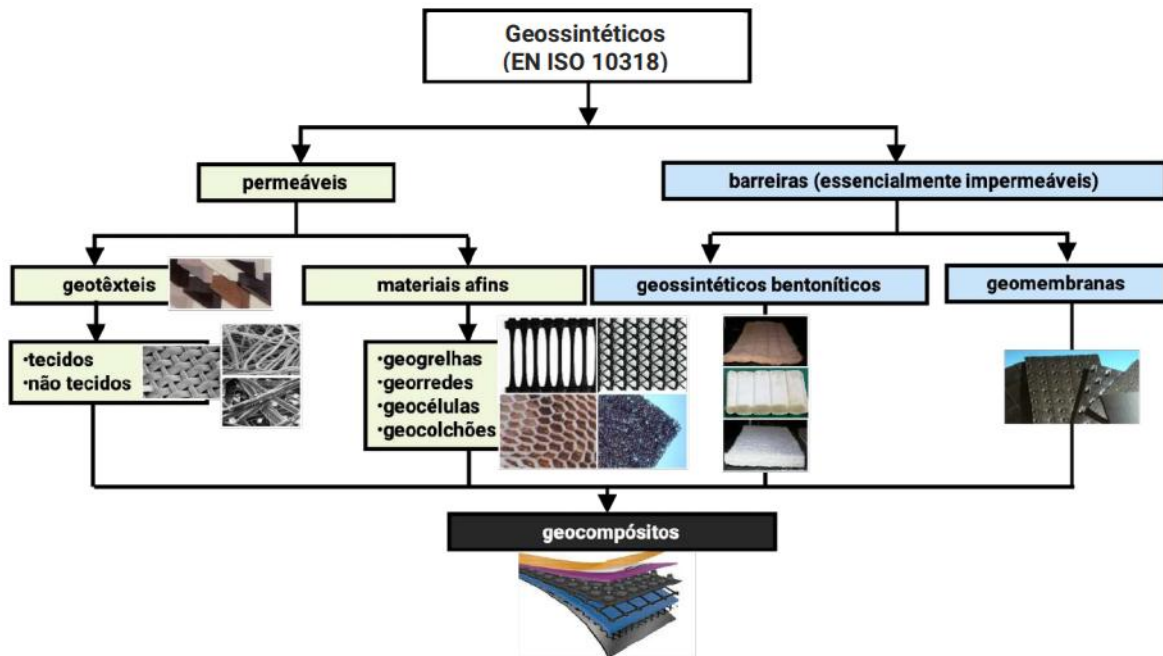


Figura 1.1. Classificação dos geossintéticos (Lopes et al., 2021).

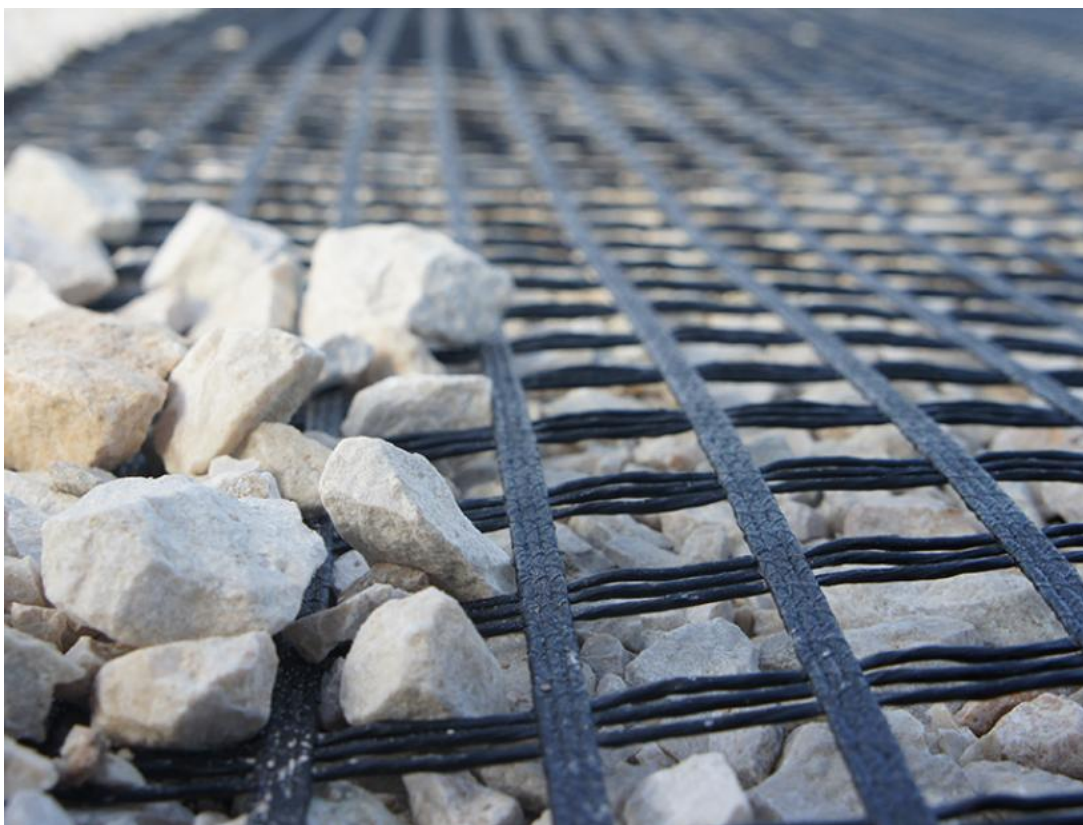


Figura 1.2. Geogrelha incorporada numa camada de agregado.

As geogrelhas são utilizadas principalmente com a função de reforço e estabilização dos solos e materiais granulares, em obras de Engenharia Civil. A aplicação das geogrelhas tem-se expandido significativamente nas últimas décadas, impulsionada pela necessidade de soluções mais eficientes e sustentáveis. Entre as principais utilizações destacam-se:

Estradas não revestidas (Figura 1.3), onde a incorporação de geogrelhas em camadas granulares melhora a distribuição de cargas, reduz a espessura necessária das camadas granulares e prolonga a vida útil da infraestrutura. Também favorecem a reutilização de materiais, reduzindo a extração de recursos naturais, contribuindo para práticas ambientalmente responsáveis.

Estruturas de solo reforçado, tais como muros e taludes, incluindo aterros sobre solos moles, onde o reforço com geogrelhas aumenta a estabilidade global, permitindo a execução de estruturas mais íngremes e seguras.

Fundação de plataformas de trabalho e áreas industriais em terrenos compressíveis, onde as geogrelhas contribuem para a redução de assentamentos diferenciais e para a melhoria da capacidade de carga.



Figura 1.3. Utilização com a função de estabilização.

A eficácia das geogrelhas depende de fatores como a geometria da malha, a rigidez das nervuras e a resistência à tração, bem como das características do agregado (granulometria, forma, rugosidade e angularidade das partículas). A compreensão destes parâmetros é essencial para garantir um desempenho otimizado.

1.1.2. Problema de investigação

Apesar da ampla utilização das geogrelhas, a interação agregado-geogrelha continua a ser um tema complexo e determinante para o sucesso das soluções de reforço e estabilização dos solos e materiais granulares. O comportamento conjunto do sistema solo-reforço é influenciado por variáveis interdependentes, sobretudo:

(i) a distribuição granulométrica das partículas, que afeta diretamente o intertravamento e confinamento proporcionado pelas geogrelhas,

(ii) a forma, rugosidade e rigidez das partículas, que condicionam a capacidade de transmissão de esforços e a resistência ao deslocamento lateral,

(iii) as propriedades geométricas e mecânicas da geogrelha, as quais definem a eficiência do mecanismo de reforço,

(iv) e as condições e procedimentos de instalação em obra, que podem comprometer significativamente o desempenho do reforço. Danos induzidos durante a compactação, como cortes, abrasão, estiramentos localizados ou deslocamentos da geogrelha alteram a sua rigidez, reduzem a largura efetiva de interação e prejudicam o intertravamento das partículas do agregado.

A falta de consenso na literatura sobre a influência relativa destes fatores e a ausência de metodologias harmonizadas para avaliação da interação geogrelha-agregado justificam a necessidade de estudos aprofundados. Além disso, a crescente pressão para se adotarem soluções sustentáveis na Engenharia Civil reforça a importância de compreender como otimizar o uso de geogrelhas, especialmente quando associadas a agregados reciclados.

Neste contexto, a presente dissertação propõe-se a realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre os mecanismos de reforço e estabilização proporcionados pelas geogrelhas, particularmente o efeito da distribuição granulométrica no desempenho do sistema.

Pretende-se, assim, contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico e para a promoção de práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo geral desta dissertação é analisar, com base numa revisão da literatura disponível, a influência da distribuição granulométrica do agregado na eficiência do confinamento proporcionado pelas geogrelhas, com vista a apoiar tecnicamente a seleção de materiais em projetos de geotecnia. Esta análise pretende contribuir para soluções que conciliem eficiência técnica, viabilidade económica e sustentabilidade ambiental, reforçando a importância do uso adequado de geossintéticos.

Para alcançar este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais estudos sobre a influência da distribuição granulométrica do agregado no desempenho das geogrelhas em aplicações geotécnicas.
- Sistematizar os mecanismos de interação geogrelha-agregado associados ao efeito de confinamento.
- Analisar a influência das características granulométricas na eficiência do confinamento das geogrelhas.
- Avaliar e comparar diferentes metodologias de análise da interação geogrelha-agregado.
- Propor recomendações práticas para a seleção de agregados em projetos que envolvam a aplicação de geogrelhas, com base nas evidências obtidas na literatura.
- Avaliar criticamente as limitações dos estudos existentes e apontar oportunidades para investigação futura.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, correspondendo cada um deles às fases do trabalho desenvolvido para atingir os objetivos mencionados na secção 1.2.

O fluxograma apresentado na Figura 1.4 facilita a compreensão da abordagem metodológica seguida, ilustrando a interligação entre os objetivos específicos, a metodologia adotada para os alcançar e a consequente organização da dissertação.

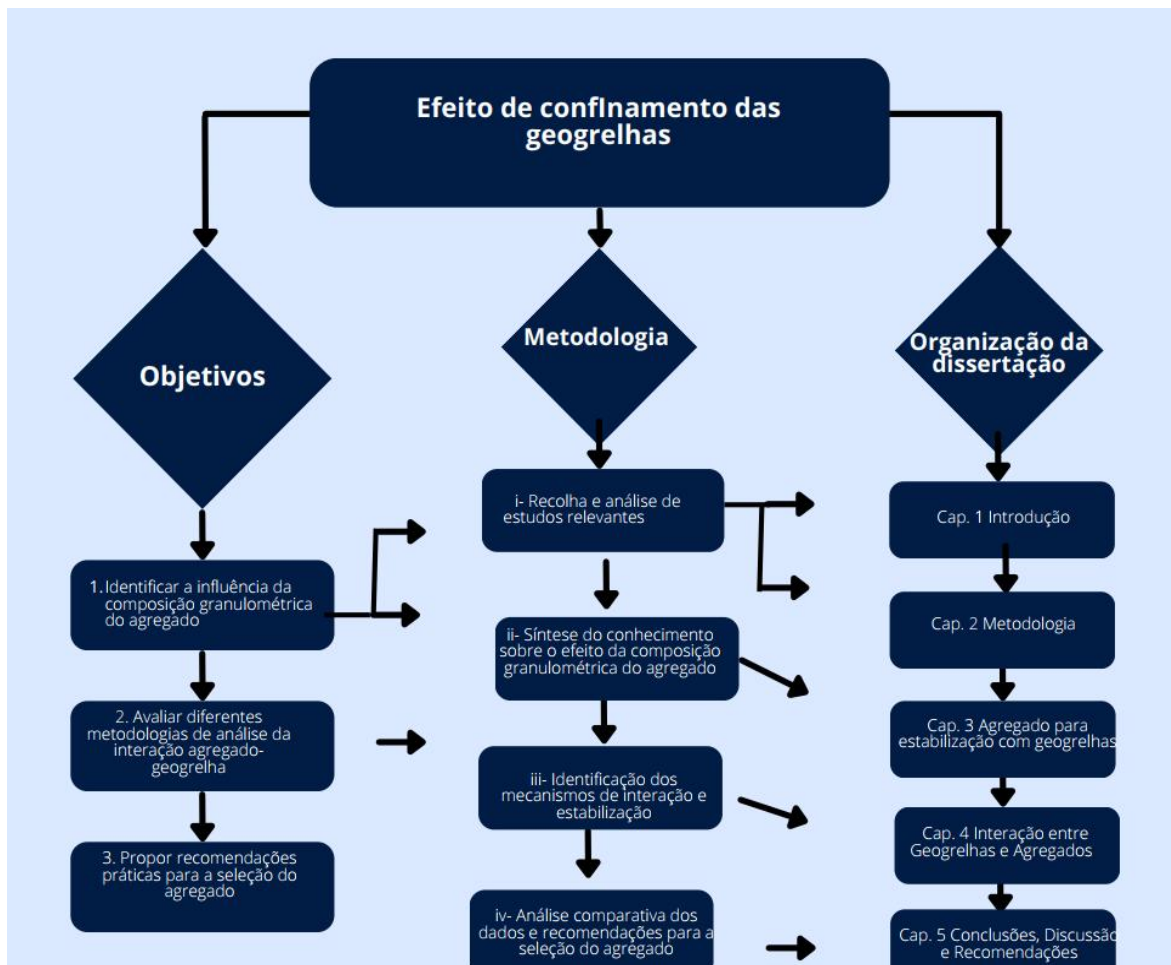


Figura 1.4. Plano do trabalho, relacionando objetivos, metodologia e estrutura da dissertação.

Nos parágrafos seguintes é apresentada uma descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo da dissertação.

Este primeiro capítulo apresenta o contexto e a fundamentação do tema, incluindo a definição do problema e a justificativa da relevância do tema, e apresenta também os objetivos, a abordagem metodológica e a disposição dos capítulos seguintes.

O capítulo 2 apresenta a metodologia adotada, isto é, apresenta o método de revisão sistemática de literatura, descreve os critérios adotados para a seleção das fontes bibliográficas, os procedimentos de análise e a abordagem para sistematização dos resultados.

O capítulo 3 apresenta os resultados da revisão sistemática de literatura sobre a aplicação de geogrelhas na estabilização de solos e materiais granulares, com vista a fazer uma síntese do estado do conhecimento sobre este assunto. São mencionadas as metodologias utilizadas para avaliar o comportamento das camadas com a colocação de geogrelhas. Inclui, também, a análise dos resultados relatados pelos diferentes autores, em termos de

melhorias do comportamento da camada com a aplicação de geogrelhas. É analisada a interação agregado-geogrelha, nomeadamente a influência da relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e as características granulométricas do agregado.

O capítulo 4 reúne e analisa a literatura existente sobre geogrelhas, mecanismos de reforço e estabilização, interação geogrelha-agregado e influência da distribuição granulométrica. Inclui também uma síntese das metodologias utilizadas nos estudos. Por fim, apresenta-se uma análise crítica dos estudos identificados, destacando os principais mecanismos, tendências, limitações e implicações para projetos geotécnicos.

No capítulo 5 é apresentada uma reflexão do trabalho realizado, resumindo as principais conclusões da dissertação e a proposta para trabalhos futuros a desenvolver neste tema.

Capítulo 2

2. Metodologia

No presente capítulo é descrita a metodologia adotada para a realização da revisão sistemática da literatura, que serve de base para os capítulos subsequentes. O objetivo consiste em identificar, selecionar e sintetizar de um modo sistemático as publicações relevantes, com vista a avaliar e analisar o estado da arte sobre a otimização do efeito de confinamento das geogrelhas, com ênfase no papel da distribuição granulométrica do agregado. A compreensão da interação geogrelha-agregado é fundamental para o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais eficientes, com especial relevância para obras de estabilização e de reforço de materiais granulares.

A metodologia utilizada baseia-se numa recolha criteriosa e exaustiva de publicações que permitem o estabelecimento de uma visão abrangente e atualizada sobre o tema. Para tal, foi seguida uma abordagem sistemática, que assegura a identificação rigorosa das fontes mais relevantes e consistentes. Os dados extraídos das publicações selecionadas foram organizados para posteriormente se proceder a uma análise descritiva e comparativa, de forma a permitir uma síntese das principais observações e tendências identificadas, fundamentando assim a compreensão da relação entre a distribuição granulométrica do agregado e a eficiência das geogrelhas na função de estabilização.

2.1. A abordagem de investigação adotada

A investigação seguiu uma abordagem sistemática e transparente, orientada para responder à questão definida mais à frente na secção 2.1.1. O objetivo foi construir uma revisão estruturada da literatura que permita analisar criticamente a influência da distribuição granulométrica do agregado na eficiência do confinamento proporcionado pelas geogrelhas. Para garantir reprodutibilidade, foi adotado o seguinte procedimento:

- Definição prévia de critérios de inclusão e exclusão (secção 2.1.2) para assegurar consistência na seleção das publicações.
- Planeamento da pesquisa bibliográfica, incluindo etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão das publicações.

- Registo das pesquisas num quadro contendo a lista de bases de dados, termos de pesquisa, datas, filtros aplicados, número de resultados, decisões tomadas e notas operacionais.
- Validação manual das publicações selecionadas, mesmo quando foram usadas ferramentas de apoio automatizado.

Durante o processo, foram utilizadas ferramentas de apoio baseadas em Inteligência Artificial Generativa, nomeadamente Scopus AI, para aceder a informação científica de forma rápida e estruturada, principalmente para obter sugestões de termos e combinações booleanas, identificar publicações potencialmente relevantes e produzir resumos temáticos iniciais. Apesar da automação parcial, que pode introduzir viés algorítmico (e.g. a priorização de publicações mais citadas), todas as publicações incluídas foram verificadas manualmente quanto à sua pertinência e qualidade, aplicando os critérios definidos, mantendo-se a análise crítica dos estudos selecionados. Esta abordagem híbrida permitiu otimizar tempo sem comprometer o rigor metodológico.

2.1.1. Questão de investigação

Partindo do objetivo da revisão da literatura, definiu-se a seguinte pergunta: Que especificações técnicas apoiam a seleção do agregado para maximizar a função de estabilização das geogrelhas?

A formulação desta questão orientou a definição das palavras-chave dos termos booleanos, organizados por componentes (materiais e âmbito, fenómeno de interesse, metodologias, análises e tipo de estudo), como mostra o Quadro 2.1., os quais serviram de base à estratégia de pesquisa.

Quadro 2.1. Explicitação da questão de investigação e escolha das palavras-chave.

Componentes da questão:	Termos de pesquisa / palavras-chave:
Quais os materiais e área de aplicação?	Agregado Geogrelha biaxial Obras Geotécnicas
Qual o problema (fenómeno de interesse)?	Função de estabilização
Quais as metodologias de interesse?	Estudos experimentais Estudos de casos Estudos de revisão bibliográfica
Que análises de interesse?	Todas as que avaliam o desempenho da tecnologia
Que tipo de estudo?	Publicações científicas Dissertações e Teses Relatórios

A questão foca a interação geogrelha–agregado e o efeito de confinamento, procurando evidência empírica (de laboratório e de campo) e sínteses críticas que relacionem parâmetros da granulometria (e.g. D_{10} , D_{50} , $D_{máx}$, C_U , C_C , teor de finos, coeficientes de forma, angulosidade, esfericidade) com a geometria e rigidez da geogrelha (e.g. dimensão e forma da abertura, rigidez das nervuras e das junções) e com o desempenho do material compósito (e.g. rodeiras, CBR, módulo resiliente, capacidade de carga).

2.1.2. Critérios de inclusão e exclusão

Foram definidos critérios de inclusão que privilegiam publicações científicas, dissertações, relatórios técnicos, estudos experimentais e revisões bibliográficas relacionados com geogrelhas e agregados. Excluíram-se publicações sem revisão por pares ou que não abordassem diretamente a interação geogrelha–agregado.

Critérios de inclusão:

- Estudos experimentais e ensaios de campo que avaliem a função de estabilização das geogrelhas incorporadas em materiais granulares (bases de pavimento, estradas não revestidas, plataformas, balastro ferroviário).
- Revisões bibliográficas e relatórios técnicos (literatura cinzenta qualificada) que tratem explícita e tecnicamente a interação geogrelha–agregado, com foco na distribuição granulométrica do agregado.
- Publicações em português ou inglês, sem restrição temporal inicial (as datas de recolha são registadas).
- Publicações com descrição suficiente de (i) caracterização do agregado (granulometria e, sempre que possível, forma e angulosidade das partículas), (ii) características da geogrelha (tipo, abertura, rigidez) e (iii) métricas de desempenho e protocolo de ensaio.

Critérios de exclusão:

- Trabalhos sem ligação direta ao fenómeno de interação geogrelha-agregado, que surjam em contextos não relacionados com estabilização ou confinamento de materiais granulares (uso demasiado genérico), identificados como falsos-positivos nas buscas exploratórias.
- Estudos sem dados empíricos ou sem ligação clara à relação entre a abertura da malha e a granulometria de materiais granulares.

- Duplicados entre bases ou versões preliminares não revistas por pares ou documentos sem acesso a texto integral após tentativa razoável de obtenção.

2.2. Estratégia de pesquisa bibliográfica

A pesquisa decorreu entre março e abril de 2024 (atualizações pontuais em maio de 2025), com registo das consultas e resultados. A estratégia evoluiu de termos unitários (para aferir amplitude e ruído) para strings compostas e uma string global para maximizar a precisão.

2.2.1. Bases de dados consultadas

A pesquisa bibliográfica foi realizada de forma sistemática nas seguintes bases de dados científicas reconhecidas (Quadro 2.2.): Web of Science, Scopus, Google Scholar, PQDT (ProQuest), RCAAP, IGS Digital Library e ISSMGE Online Library. O acesso foi efetuado via Universidade da Beira Interior. Esta seleção de bases complementares (indexadas, literatura cinzenta e setoriais) possibilita melhor cobertura e mitigação de viés de publicação. A pesquisa considerou trabalhos publicados nos últimos 20 anos, em língua portuguesa e inglesa, utilizando operadores booleanos para combinar as palavras-chave apresentadas no Quadro 2.3.

Quadro 2.2. Bases de dados consultadas.

Nº	Base de dados	Anfitrião	Âmbito
1	WOS (Web of Science)	Clarivate	Multidisciplinar, Científico.
2	SCOPUS	Elsevier	Multidisciplinar, Científico.
3	Google Scholar	Google	Multidisciplinar, inclui literatura cinzenta. Aplicou-se amostragem por relevância dos top 200.
4	PQDT (ProQuest)	Proquest	Multidisciplinar, Académico. Aplicou-se amostragem por relevância dos top 200.
5	RCAAP	FCCN	Multidisciplinar, Académico, Nacional.
6	IGS Digital Library	IGS	Geossintéticos, Fontes setoriais especializadas.
7	ISSMGE Online Library	ISSMGE	Geotecnia, Fontes setoriais especializadas.

2.2.2. Termos de pesquisa

Os termos foram organizados por componentes: materiais e aplicação, fenómeno, propriedades e mecanismos, métodos de ensaio e métricas de desempenho, como se mostra no Quadro 2.3.

Quadro 2.3. Definição dos termos de pesquisa.

Questão	Termos de base	Exemplo de termos semelhantes
Quais os materiais e área de aplicação?	Aggregate Geogrid Geotechnical applications	Crushed rock; Gravel layer Unpaved roads Working platform OR Platforms Foundations Base course Reinforcement
Qual o problema (fenómeno de interesse)?	Stabilization function	Mechanical stabilization Stabilisation OR Stabilization Reinforcement Interaction Interlocking; Mechanical interlock Plastic deformation
Quais as metodologias de interesse?	Experimental study Case study Review	Particle size Particle shape Aperture size Angularity Stiffness Triaxial testing Plate load testing Field test Trial test Dynamic reponse Layered elastic analyses
Que análises de interesse?	Performance of geogrid-aggregate systems	Bearing capacity Rutting Settlement Plastic deformation CBR Friccion angle Subgrade bearing capacity

Material e aplicação: geogrid* AND (aggregate* OR "crushed rock" OR gravel* OR "granular fill" OR ballast OR unbound); contexto: unpaved, base course*, subgrade, platform*, rail*.

Propriedades e mecanismos: interlock*, confin*, aperture size*, "aperture shape", "aperture ratio", shape, angularity, sphericity, rib*, junction*.

Métodos: "triaxial test*", "plate load test*", "field test*", layered elastic, "installation damage".

Métricas de desempenho: "bearing capacity", rut*, CBR, "strain modulus", modulus, stiffness, "plastic deformation*", settlement, performance.

Termo de pesquisa global: geogrid* AND (aggregate* OR "crushed rock" OR gravel* OR stone OR "granular fill" OR ballast OR unbound) AND (unpaved OR platform* OR "temporary road" OR subgrade OR unsurfaced OR rail* OR foundation* OR foot* OR base course* OR embankment*) AND (reinforcement* OR stabilization OR stabilisation OR "stabili* function" OR confin* OR interaction OR interlock* OR interface) AND (size OR "aperture size*" OR shape OR angularity OR sphericity OR "aperture shape" OR "aperture ratio" OR rib* OR junction*) AND ("triaxial test*" OR "plate load test*" OR "field test*" OR dynamic* OR layered elastic OR "installation damage" OR Experimental OR review OR "case study") AND ("bearing capacity" OR rut* OR CBR OR "friction angle" OR "subgrade bearing capacity" OR modulus OR stiffness OR "strain modulus" OR "plastic deformation*" OR settlement OR performance)

2.2.3. Seleção das publicações

O processo de seleção das publicações decorreu em quatro etapas, com dois níveis de triagem:

(i) identificação das publicações: execução das queries em cada base; exportação de resultados (quando possível) e remoção de duplicados,

(ii) triagem baseada no título e no resumo,

(iii) elegibilidade das publicações com base na leitura do texto integral, com aplicação dos critérios de inclusão e exclusão (secção 2.1.2) e verificação da descrição técnica (granulometria e geogrelha),

(iv) inclusão na lista de publicações selecionadas para extração de dados e síntese. Os dados relevantes foram extraídos e organizados em quadros, incluindo informações sobre objetivos, metodologia, propriedades analisadas e principais conclusões.

2.3. Qualidade e pertinência das publicações selecionadas

Os resultados do estudo dependem da qualidade metodológica e da pertinência temática. Para assegurar rigor e comparabilidade, adotou-se a matriz apresentada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4. Critérios de qualidade e de pertinência, e respetiva pontuação.

		Pontuação
Critérios de qualidade (metodologia e relatórios)	revisão por pares ou fonte indexada	0=desconhecido; 1=relatório técnico; 2=revista indexada
	caraterização do agregado	0=incompleta; 1=granulometria parcial; 2=granulometria completa + forma-angulosidade-esfericidade
	caraterização da geogrelha	0=genérica; 1=tipo + abertura; 2=abertura + rigidez-nós + espessura-dano de instalação, se aplicável
	descrição do ensaio	0=insuficiente; 1=parcial; 2=especificação completa: geometria, confinamento lateral, cargas, instrumentação, repetibilidade
	tratamento estatístico	0=ausente; 1=básico; 2=análises e incerteza reportadas
	validade externa	0=limitada; 1=média; 2=justificação e extrapolação para obra ou escala real
Critérios de pertinência (alinhamento com a questão)	foco no confinamento e estabilização	0=indireto; 1=parcial; 2=principal
	relação abertura-granulometria	0=ausente; 1=indícios; 2=explícita e analisada
	aplicação	0=outra; 1=relacionada; 2=alvo primário: estradas não revestidas, camada de base, plataformas, balastros

2.4. Síntese das publicações e extração de dados para análise

A síntese será narrativa, estruturada e organizada em quadros, com agrupamento temático orientado pelos mecanismos de confinamento e pelas relações abertura-granulometria. A extração de dados seguiu um guião previamente definido (Quadro 2.5) e foi realizada manualmente, com apoio de folha de cálculo para o registo, organização e verificação da informação. As discrepâncias identificadas foram resolvidas por verificação cruzada.

Organização da síntese:

- interação geogrelha-agregado (intertravamento, confinamento lateral, transferência de carga, banda de corte);
- estratégias de otimização (compatibilidade abertura-tamanho das partículas; seleção de granulometrias; uso de agregados reciclados);
- síntese crítica e lacunas (limitações metodológicas; consistência de resultados; oportunidades de investigação).

Quadro 2.5. Guião de extração de dados.

Autor (Ano)	[ex.: Apelido et al., 20XX]
Tipo de estudo	lab./campo/revisão
Aplicação	estradas não revestidas, camada de base, plataformas, balastros, outra
Subleito	[descrição]
Material granular	tipo; granulometria (D_{10} , D_{50} , $D_{máx}$, C_U , C_C , finos); morfologia (forma/angulosidade/esfericidade; método de medição, se reportado)
Geogrelha	tipo; abertura (dimensão/forma); rigidez (nervura/junção); espessura; dano de instalação (se aplicável)
Ensaio/Protocolo	escala; confinamento lateral; ciclos/cargas; subleito; humidade; normas/protocolos
Métricas	[rodeiras, CBR, módulo resiliente, capacidade de carga, assentamentos, deformação plástica, deslocamentos laterais, arrancamento, etc]
Principais resultados	[tendências de abertura × granulometria]

Verificando-se a existência de homogeneidade mínima entre estudos (mesmas métricas, escalas e parâmetros), poderão ser calculados efeitos normalizados (e.g. redução percentual da profundidade das rodeiras, variação de módulo) e representados em gráficos comparativos (por tipo de aplicação e por intervalos de valores do rácio A/D_{50}). Caso contrário, manter-se-à síntese qualitativa estruturada, discutindo tendências consistentes e condições de fronteira.

Capítulo 3

3. Efeito de confinamento das geogrelhas

No presente capítulo é apresentada uma síntese da literatura sobre o efeito de confinamento das geogrelhas. Ao longo do capítulo são analisadas as propriedades relevantes do agregado e das geogrelhas, a interação entre ambos e as estratégias de otimização do efeito de confinamento das geogrelhas, terminando com uma síntese dos aspetos principais e a definição da questão orientadora do estudo da distribuição granulométrica do agregado.

3.1. Características do agregado

3.1.1. Definição

Segundo a NP EN 13242 – “Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária”, agregado é um material granular constituído por partículas discretas de origem natural, artificial ou de reciclado, cujas propriedades são definidas por requisitos granulométricos, físicos e mecânicos. O seu comportamento mecânico resulta da interação entre as partículas (contactos, atrito, intertravamento) e da sua distribuição granulométrica.

3.1.2. Propriedades do agregado

As propriedades mais importantes exigidas para o agregado são de natureza geométrica (granulometria, forma e textura), física (densidade, adequada resistência à fragmentação e ao desgaste) e química (adequada resistência a ações externas), como sintetizado no Quadro 3.1.

E segundo a densidade, os agregados podem ser:

Agregados leves < 2000 kg/m³

Agregados normais 2000 a 3000 kg/m³

Agregados pesados > 3000 kg/m³

Quadro 3.1. Propriedades das partículas do agregado.

Propriedade	Descrição	Importância na construção
Granulometria	Distribuição do tamanho das partículas que passam numa série especificada de peneiros	Afeta a trabalhabilidade, compactidade e resistência da camada granular
Forma das partículas	Podem ser arredondadas, angulares ou achatadas	Influencia o intertravamento e a estabilidade interna da camada granular
Textura superficial	Lisa ou rugosa	Condiciona a aderência e a mobilização da resistência
Densidade das partículas	Massa volúmica do material sólido que constitui o agregado	Influencia o peso próprio e a capacidade de suporte
Resistência à fragmentação e ao desgaste	Capacidade das partículas resistirem à abrasão e fragmentação	Afeta a durabilidade e a manutenção das propriedades mecânicas ao longo do tempo
Durabilidade	Resistência das partículas à ação do gelo, água e ciclos de molhagem-secagem	Condiciona o desempenho a longo prazo da camada granular

3.1.3. Parâmetros da distribuição granulométrica

O efeito de confinamento das geogrelhas é significativamente influenciado pelos parâmetros da distribuição granulométrica do agregado, listados no Quadro 3.2. Esses parâmetros afetam a interação do agregado com a geogrelha, que, por sua vez, determina a eficácia do reforço.

Alguns parâmetro da distribuição granulométrica:

I. Diâmetro mediano das partículas (D_{50}): diâmetro a que corresponde 50%, em massa, de material mais fino. Afeta o imbricamento das partículas do agregado com a geogrelha.

II. Diâmetro efetivo (D_{10}): representa o diâmetro para o qual 10%, em massa do material, é mais fino. Relaciona à permeabilidade e à uniformidade do agregado. Valores baixos podem indicar presença de partículas muito finas, o que pode reduzir a eficácia do confinamento das geogrelhas.

III. Coeficiente de uniformidade (C_U): mede a extensão de tamanhos, sendo definido pela Equação 3.1. Agregados bem graduados (C_U elevado) conduzem a melhor empacotamento das partículas e menor porosidade, o que pode favorecer o confinamento pelas geogrelhas.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1.)$$

IV. Coeficiente de curvatura (C_c): indica a forma da curva granulométrica, sendo definido pela Equação 3.2. Uma curva suave e concava pode melhorar a interação entre o agregado e a geogrelha, favorecendo a transferência de cargas.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.2.)$$

V. Forma e angularidade das partículas: as partículas angulares (como brita) travam melhor nas aberturas da geogrelha do que partículas arredondadas, aumentando o atrito e melhorando o desempenho estrutural da camada granular.

VI. Teor de finos (silte e argila): um teor de finos elevado pode reduzir o atrito e dificultar a interação das partículas com a geogrelha, diminuindo o confinamento. Agregados com baixo teor de finos são preferíveis.

Quadro 3.2. Parâmetros da distribuição granulométrica.

Diâmetro mediano das partículas	D_{50}
Diâmetro efetivo	D_{10}
Coeficiente de uniformidade	C_U
Coeficiente de curvatura	C_c
Forma e Angularidade das partículas	índice de achatamento, índice de forma
Teor de finos	% passados no peneiro de 0,063 mm

3.2. Propriedades das geogrelhas




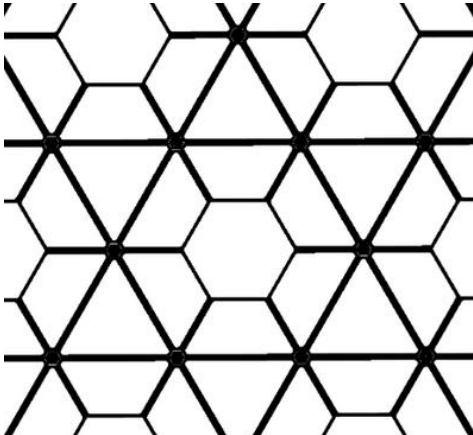
3.2.1. Geogrelha (GGR)

É uma estrutura plana, polimérica, constituída por uma grelha aberta e regular de elementos resistentes à tração, ligados entre si por extrusão, colagem ou entrelaçamento, cujas aberturas têm dimensões superiores às da superfície sólida da grelha pelos elementos constituintes. As propriedades mais importantes exigidas para as geogrelhas são: tamanho da abertura, rigidez, módulo de tração, resistência à tração.

3.2.2. Tipos de Geogrelhas

Cada tipo de geogrelha apresenta uma estrutura que depende do processo do seu fabrico (tecido, colado ou estirado). O Quadro 3.3. mostra geogrelhas produzidas pelo processo de estiramento, que envolve a extrusão, perfuração e posterior tencionamento de uma folha polimérica em diferentes direções.

Quadro 3.3. Tipos de geogrelhas produzidas pelo processo de estiramento.

<p>Geogrelha uniaxial</p> <p>Resistência predominante numa direção (longitudinal). Usadas em muros e taludes.</p>	
<p>Geogrelha biaxial</p> <p>Resistência em duas direções (longitudinal e transversal). Usadas em reforço de subleitos e pavimentos.</p>	
<p>Geogrelha triaxial</p> <p>Distribuição de carga em múltiplas direções. Aplicações avançadas em fundações e estabilização de materiais granulares grossos.</p>	
<p>Geogrelha multiaxial</p> <p>É um material geossintético avançado utilizado em engenharia civil para estabilização de materiais granulares.</p>	

3.2.3. Funções das geogrelhas

As geogrelhas desempenham as seguintes funções principais: estabilização e reforço. Estas distinguem-se pelo mecanismo dominante de interação agregado-geogrelha e pela forma como contribuem para o desempenho estrutural da solução em aplicações geotécnicas. De acordo com Giroud et al. (2023), a estabilização está associada ao controlo da deformação e à melhoria do comportamento mecânico de camadas granulares sob ações de serviço, enquanto o reforço está relacionado com a mobilização da resistência à tração do geossintético para garantir a estabilidade estrutural.

A função de estabilização (Figura 3.1) corresponde à capacidade da geogrelha de melhorar o comportamento mecânico de uma camada granular não ligada, essencialmente através do intertravamento das partículas nas aberturas da geogrelha. Este mecanismo promove o confinamento lateral do agregado, i.e. restringe o movimento relativo das partículas e aumenta a rigidez da camada, conduzindo a uma distribuição mais eficiente das tensões e consequente redução das deformações permanentes sob ações de serviço, sem que a resistência à tração das geogrelhas seja plenamente mobilizada.

A eficiência da interação agregado-geogrelha depende da compatibilidade entre a abertura da geogrelha e a granulometria do agregado, bem como das propriedades das partículas, que condiciona o grau de intertravamento e a capacidade de confinamento. Segundo Giroud et al. (2023), esta função é particularmente relevante em camadas de base e sub-base de pavimentos, contribuindo para a redução das tensões verticais transmitidas ao subleito, para o aumento da durabilidade da estrutura e, frequentemente, em benefícios económicos, como a redução da espessura da camada granular, dos custos e dos prazos de execução.

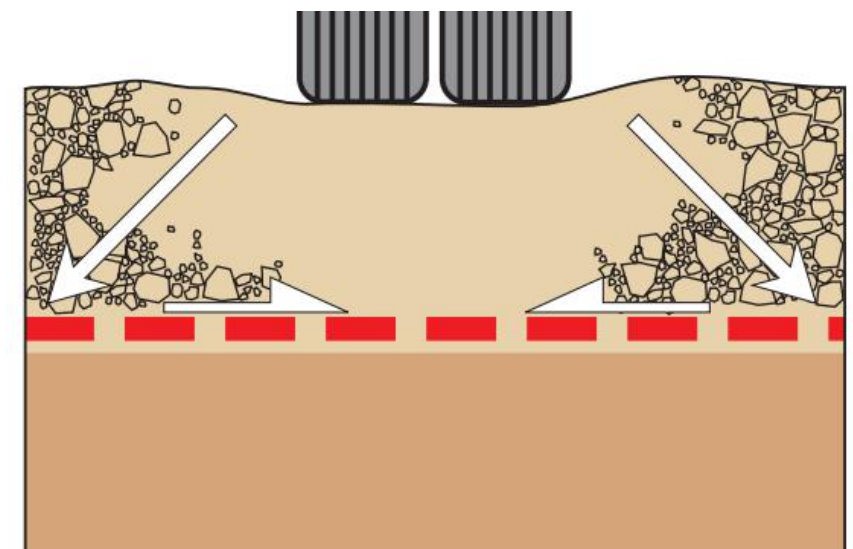


Figura 3.1. Função de estabilização. (cortesia da Tensar International)

A função de reforço (Figura 3.2) corresponde à contribuição estrutural da geogrelha através da mobilização da sua resistência à tração, permitindo a transferência de esforços para a geogrelha e o aumento da estabilidade global da estrutura, particularmente em situações associadas a grandes deformações ou a potenciais superfícies de rotura, nas quais a geogrelha atua como uma membrana tensionada. Para que esta função seja efetiva, é necessária a ancoragem adequada da geogrelha nas extremidades e a ocorrência de deformações suficientes na fundação e na própria geogrelha, o que implica maiores deformações à superfície (Giroud et al., 2023). O melhor desempenho face a uma solução não reforçada tende a manifestar-se apenas após um nível significativo de carregamento repetido, sendo ainda condicionado pela repetição da trajetória de carregamento.

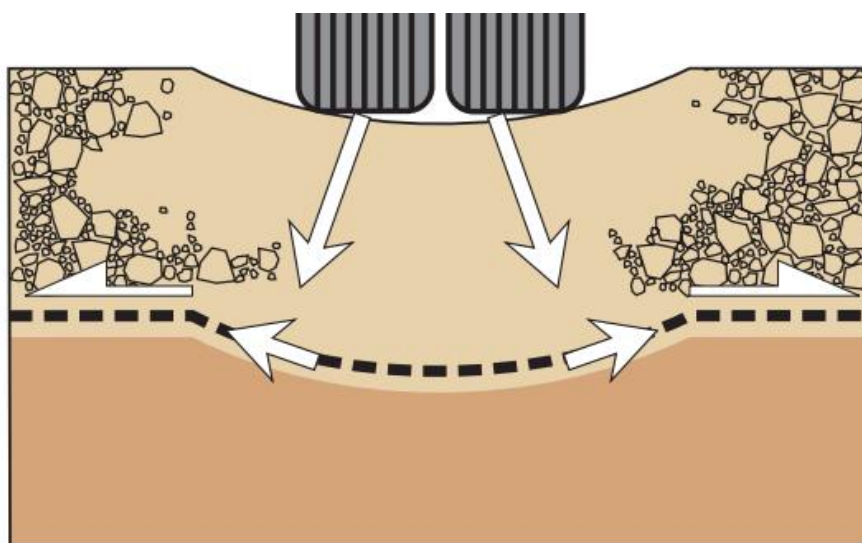


Figura 3.2. Função de reforço. (cortesia da Tensar International)

Embora distintas do ponto de vista conceptual, as funções de estabilização e de reforço podem ocorrer simultaneamente, dependendo das condições de carregamento, do tipo de agregado, das características do subleito e das propriedades geométricas e mecânicas da geogrelha. No entanto, o foco do presente trabalho incide na função de estabilização, por ser o mecanismo dominante nas aplicações e condições analisadas.

3.2.4. Mecanismos de interação com o agregado

A eficácia das geogrelhas na estabilização de uma camada granular não ligada depende fundamentalmente da interação física e mecânica entre a malha polimérica e as partículas do agregado. Este processo ocorre através de três mecanismos principais:

Intertravamento - é o mecanismo dominante, resultante da penetração das partículas do agregado nas aberturas da geogrelha. Quando as partículas apresentam dimensões compatíveis com a abertura e elevada angularidade, formam-se pontos de bloqueio que

restringem deslocamentos laterais e aumentam a rigidez do sistema. Este efeito é mais pronunciado em agregados com granulometria bem graduada e forma irregular.

Confinamento lateral - onde a presença da geogrelha cria uma barreira que limita a expansão lateral do material granular sob ações de serviço. Este confinamento aumenta a resistência ao corte e reduz deformações permanentes, como rodeiras em estradas não revestidas. A rigidez das nervuras e a integridade das junções da geogrelha são determinantes para a eficácia deste mecanismo.

Atrito e aderência na interface - onde ocorre transferência de esforços por atrito entre as nervuras da geogrelha e as partículas adjacentes. Embora secundário face ao intertravamento, este mecanismo contribui para a estabilidade global, especialmente em agregados com superfícies rugosas ou quando a geogrelha possui revestimentos que aumentam a fricção.

A combinação destes mecanismos proporciona melhoria significativa na capacidade de carga, redução de deformações e maior durabilidade das estruturas reforçadas. A otimização depende da compatibilidade entre abertura da geogrelha e granulometria do agregado, bem como da rigidez e geometria da geogrelha.

3.3. Mecanismos do efeito de confinamento lateral

3.3.1. Efeito de confinamento das geogrelhas

O efeito de confinamento das geogrelhas é a capacidade de fornecer suporte lateral e intertravamento mecânico ao agregado, impactando diversas propriedades mecânicas e a estabilização de camadas granulares não ligadas em projetos de Engenharia Civil. Este confinamento leva a vários benefícios de desempenho:

- redução da deformação vertical e lateral sob cargas repetidas;
- melhor distribuição da carga através da camada granular.

O efeito de confinamento das geogrelhas é um mecanismo fundamental na estabilização de bases granulares. Refere-se à capacidade das geogrelhas de restringir o movimento lateral das partículas de agregado, melhorando assim o comportamento mecânico da camada base. O Quadro 3.4 sintetiza os principais efeitos do confinamento das geogrelhas. Quando uma geogrelha é incorporada num material granular, as partículas de agregado se interligam dentro das aberturas da malha, formando uma camada composta com maior rigidez e capacidade de carga, como mostra a Figura 3.3.

Quadro 3.4. Efeitos de confinamento das geogrelhas.

Mecanismo	Descrição
Restrição lateral	As geogrelhas limitam o deslocamento das partículas do agregado, resistindo a tensões de corte.
Intertravamento e estabilização	A geometria de abertura da geogrelha aprimora o intertravamento, criando uma camada estabilizada.
Efeito de membrana tensionada	As geogrelhas atuam como uma membrana tensionada sob carga, melhorando a distribuição da carga.
Potencial de confinamento	Quantifica o confinamento usando carga de nervura a 2% de deformação e o espaçamento das nervuras.

**Figura 3.3.** Intertravamento resultante da penetração das partículas do agregado nas aberturas da geogrelha. (cortesia da Tensar International)

As geogrelhas têm sido amplamente utilizadas na estabilização de estradas pavimentadas e estradas não revestidas, particularmente em situações com camadas granulares não ligadas e fundações de baixa capacidade de carga. Nestes casos, o benefício principal não resulta da mobilização da resistência à tração da geogrelha, mas sim do efeito de confinamento lateral induzido pelo intertravamento entre as partículas do agregado e as aberturas da geogrelha, que conduz a uma maior rigidez e estabilidade da camada granular. Este mecanismo contribui para a redução da deformação permanente, para uma melhor distribuição das tensões verticais e para a melhoria do desempenho estrutural sob ações repetidas.

Diversos estudos identificaram o confinamento lateral do agregado como o mecanismo principal associado ao desempenho das geogrelhas em pavimentos flexíveis. Webster (1992), com base em ensaios de campo e laboratoriais, demonstrou que a restrição do movimento lateral das partículas é responsável pela maior parte dos ganhos de desempenho observados em bases granulares estabilizadas com geogrelhas. De forma consistente, Berg et al. (2000) concluíram que, para níveis de deformação típicos de

serviço, a resistência à tração da geogrelha é pouco mobilizada, sendo o confinamento das partículas o principal fator de redução das deformações permanentes. Perkins et al. (2004) enfatizaram ainda que o efeito de confinamento é significativo tanto durante a fase de compactação como durante a vida útil do pavimento, contribuindo para a manutenção do desempenho estrutural da camada granular sob cargas repetidas.

3.3.2. Mecanismos principais do efeito de confinamento

O efeito de confinamento proporcionado pelas geogrelhas resulta da interação entre o agregado e a geogrelha e é regido por vários mecanismos interrelacionados.

O mecanismo fundamental é o intertravamento mecânico entre as partículas do agregado e as aberturas da geogrelha. Sob carregamento, o movimento lateral das partículas é restringido pela presença das nervuras (Figura 3.4.), originando um aumento da tensão normal efetiva e, conseqüentemente, da resistência ao corte do agregado. Este mecanismo é fortemente dependente da compatibilidade entre a abertura da geogrelha e a granulometria do agregado, bem como da forma, angularidade e rigidez das partículas.

Associado ao intertravamento, desenvolve-se o confinamento lateral do agregado, que limita a dilatação volumétrica da camada granular e promove uma resposta mais rígida e estável sob cargas repetidas. O confinamento contribui para a redistribuição das tensões verticais, reduzindo as deformações permanentes.

Outro mecanismo relevante é a mobilização de tensões nas nervuras da geogrelha para pequenas deformações, resultante da interação local com o agregado. No sentido de comparar diferentes geogrelhas quanto à sua capacidade de fornecer restrição lateral ao agregado, Wrigley et al. (2008) propuseram o conceito de potencial de confinamento da geogrelha a 2% de deformação como uma propriedade índice, quantificada através do parâmetro C_2 , definido com base na força mobilizada numa nervura individual a 2% de deformação (F_{R2}) e no espaçamento entre nervuras (p). Para geogrelhas de abertura quadrada, o parâmetro é expresso pela Equação 3.3. e para geogrelhas de abertura triangular é determinado pela Equação 3.4.

$$C_2 = \frac{F_{R2}}{p} \quad (3.3.)$$

$$C_2 = 1,5 \times \frac{F_{R2}}{p} \quad (3.4.)$$

Embora o parâmetro C_2 permita uma avaliação comparativa da rigidez relativa das geogrelhas para pequenas deformações, importa salientar que este constitui apenas um indicador simplificado do potencial de confinamento e não substitui a análise integrada dos mecanismos físicos envolvidos. O efeito de confinamento é igualmente influenciado por fatores associados ao agregado, pela continuidade das nervuras, pelas condições de compactação, pela espessura da camada granular e pelas características do subleito.

Assim, o confinamento lateral deve ser entendido como um efeito emergente da interação agregado-geogrelha, resultante da combinação de intertravamento, restrição à dilatação e mobilização progressiva da rigidez da geogrelha, sendo estes mecanismos particularmente relevantes para a função de estabilização das geogrelhas.

A Figura 3.4 representa a interação de uma geogrelha com as partículas de agregado sob carregamento. As partículas penetram parcialmente e projetam-se através das aberturas da geogrelha, estabelecendo um mecanismo de intertravamento mecânico, que restringe a rotação e o movimento lateral das partículas de agregado, promovendo o confinamento lateral do agregado.

A camada granular estabilizada com geogrelha apresenta uma melhor redistribuição das tensões, redução das deformações verticais e laterais e maior uniformidade da resposta estrutural, particularmente sob carregamentos repetidos. Estes efeitos traduzem-se numa melhoria do desempenho em serviço da camada granular, sem necessidade de mobilizar de forma significativa a resistência à tração da geogrelha, a qual é característica distintiva da função de estabilização.

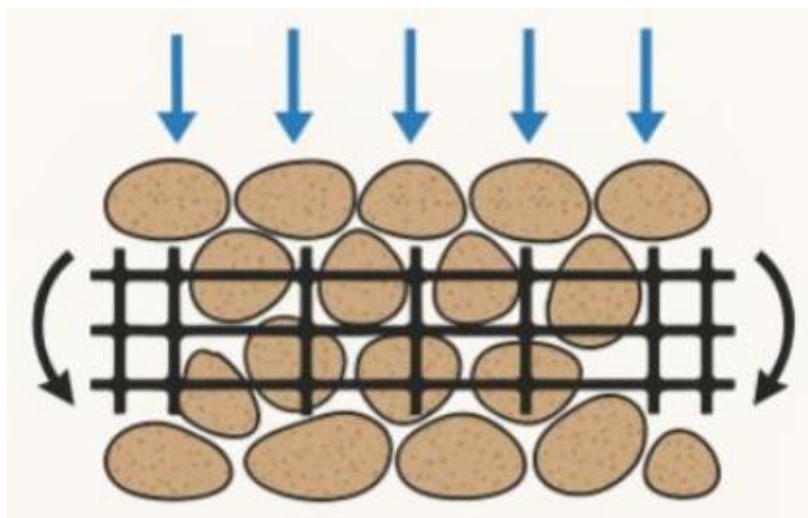


Figura 3.4. Mecanismos principais do efeito de confinamento.

3.4. Estratégias de otimização do efeito de confinamento

3.4.1. Fatores de influência do efeito de confinamento

Caracterizar os principais fatores que influenciam o efeito de confinamento das geogrelhas, com destaque para as propriedades do agregado e das geogrelhas. Propriedades físicas, mecânicas e geométricas relevantes para o confinamento.

Rigidez da geogrelha

Geometria da malha (abertura)

Posição e número de camadas

Densidade relativa do agregado

Granulometria do agregado

3.4.2. Ajustes geométricos das geogrelhas

Os ajustes geométricos das geogrelhas constituem um aspecto central na otimização do efeito de confinamento lateral em camadas granulares estabilizadas. Estes ajustes estão associados à configuração geométrica da própria geogrelha, nomeadamente a forma e dimensão das aberturas, bem como ao espaçamento, orientação e rigidez das nervuras, e devem ser analisados em articulação com as características do agregado e com as condições de carregamento e de instalação.

As geogrelhas utilizadas na estabilização de camadas granulares podem apresentar diferentes configurações geométricas (Quadro 3.3.), que condicionam a sua resposta mecânica em diferentes direções. No entanto, do ponto de vista do confinamento lateral, assume particular relevância a forma da abertura (e.g. quadrada ou triangular) e a uniformidade da distribuição das nervuras, uma vez que estas influenciam diretamente o intertravamento mecânico e a capacidade de restringir o seu movimento lateral.

O tamanho e a forma das aberturas desempenham um papel determinante na eficiência do intertravamento mecânico. A literatura indica que geogrelhas com aberturas adequadamente dimensionadas em relação ao tamanho das partículas promovem um intertravamento mais eficaz, restringindo a rotação e o deslocamento relativo das partículas e conduzindo à formação de uma camada mecanicamente estabilizada com maior rigidez inicial e melhor desempenho sob cargas repetidas (IGS, 2018). Aberturas excessivamente grandes reduzem a eficácia do intertravamento, enquanto aberturas

demasiado pequenas podem dificultar a adequada penetração do agregado e comprometer a compactação.

Para além da geometria das aberturas, a rigidez das nervuras e a estabilidade dimensional da geogrelha influenciam significativamente a mobilização do efeito de confinamento. Nervuras com rigidez adequada permitem resistir às forças laterais induzidas pelo carregamento, contribuindo para a formação de uma camada mecanicamente estabilizada com maior rigidez global, sem necessidade de mobilização significativa da resistência à tração da geogrelha (Giroud et al., 2023; IGS, 2018).

A geometria da geogrelha deve, portanto, ser selecionada em função da aplicação específica, privilegiando-se configurações que maximizem o confinamento lateral do agregado nas condições de serviço previstas. Em aplicações rodoviárias, esta abordagem permite reduzir deformações permanentes, melhorar a distribuição de tensões na camada granular e aumentar a durabilidade da estrutura, sem necessidade de mobilizar significativamente a resistência à tração da geogrelha. Assim, os ajustes geométricos das geogrelhas são fundamentais para potenciar a função de estabilização, assegurando uma interação agregado-geogrelha eficiente e coerente com os mecanismos de confinamento discutidos nas secções anteriores.

3.4.3. Ajustes do agregado

Os ajustes associados às propriedades do agregado desempenham um papel determinante na otimização do efeito de confinamento lateral em camadas granulares estabilizadas com geogrelha. A interação agregado-geogrelha, e consequentemente a eficácia da estabilização, depende fortemente da granulometria, do tamanho característico das partículas, forma e angularidade e da sua compatibilidade com a geometria da abertura da geogrelha (Perkins et al., 2004; Berg et al., 2000).

O tamanho relativo das partículas do agregado em relação à abertura da geogrelha constitui um dos fatores mais relevantes para o desenvolvimento do intertravamento mecânico. Para que o confinamento seja eficaz, as partículas devem penetrar parcialmente nas aberturas da geogrelha, permitindo a restrição do movimento lateral e da rotação das partículas sob carregamento. Quando a abertura é relativamente grande, as partículas atravessam a geogrelha sem estabelecer intertravamento; por outro lado, se for demasiado pequena, a penetração do agregado é limitada, comprometendo a interação mecânica. (Giroud et al., 2023; Özer, 2021). A literatura propõe intervalos ótimos para a relação entre a dimensão da abertura da geogrelha (A) e os parâmetros granulométricos do agregado. Valores típicos indicam que a eficácia do confinamento é maximizada quando a

razão A/D_{90} é da ordem de 1,3 e quando a razão A/D_{50} está entre 2,0 e 2,2, assegurando uma interação eficaz com a fração predominante do agregado. Estes rácios devem ser interpretados como orientações técnicas, sendo a sua aplicabilidade dependente da forma das partículas, da granulometria do agregado e das condições de compactação.

Para além da granulometria, a forma e angularidade das partículas influenciam significativamente o desempenho da estabilização. Agregados angulares e de superfície rugosa favorecem o intertravamento e aumentam a resistência ao deslocamento relativo, enquanto agregados arredondados tendem a apresentar menor eficiência de confinamento, podendo exigir um controlo mais rigoroso da compatibilidade abertura–granulometria para alcançar desempenhos equivalentes (Berg et al., 2000).

Assim, a seleção e o ajuste do agregado devem ser realizados de forma integrada com a escolha da geogrelha, privilegiando materiais granulares bem graduados, com partículas angulares e dimensões compatíveis com a abertura da malha, de modo a maximizar o efeito de confinamento lateral e o desempenho da camada estabilizada em regime de serviço.

3.4.4. Posição e número de camadas

A posição e o número de camadas de geogrelha constituem parâmetros relevantes na otimização do efeito de confinamento lateral em camadas granulares estabilizadas. Estes aspetos devem ser definidos em função do mecanismo de estabilização pretendido, das características do subleito e da espessura da camada granular (Berg et al., 2000).

Relativamente à posição da geogrelha, diversos estudos indicam que a colocação na parte inferior da camada granular, frequentemente na interface entre a base e o subleito, é particularmente eficaz para promover o confinamento lateral do agregado. Nesta zona, as tensões de corte e a tendência para a expansão lateral são mais elevadas, permitindo uma mobilização mais eficiente do intertravamento agregado–geogrelha e um aumento da rigidez composta da camada (Giroud et al., 2023)

A introdução de múltiplas camadas pode conduzir a aumentos adicionais do confinamento, mas o seu efeito tende a apresentar rendimentos decrescentes, devendo ser justificada apenas em situações específicas, como camadas granulares de grande espessura ou fundações de muito baixa capacidade de carga (Perkins et al., 2004; Berg et al., 2000). Assim, a definição da posição e do número de camadas de geogrelha deve resultar de uma avaliação integrada dos mecanismos de confinamento e das condições de carregamento, privilegiando soluções eficientes e economicamente sustentáveis.

3.5. Considerações finais

Conclui-se que o desempenho do efeito de confinamento proporcionado pelas geogrelhas em camadas granulares está diretamente relacionado com a interação entre o agregado e a geogrelha, sendo esta influenciada por um conjunto de fatores interdependentes. Entre os mais relevantes destacam-se:

- o tamanho e a distribuição granulométrica do agregado;
- a rigidez das nervuras da geogrelha;
- o atrito na interface agregado-geogrelha
- a relação entre o diâmetro característico do agregado e o tamanho da abertura da geogrelha;
- os esforços de compactação aplicados durante a instalação, que condicionam o grau de intertravamento e a mobilização do confinamento.

Relativamente ao impacto das geogrelhas no desempenho do confinamento lateral, verifica-se que:

- a incorporação da geogrelha proporciona o confinamento das partículas do agregado, restringindo o seu movimento lateral e permitindo a mobilização mais eficiente da capacidade resistente intrínseca da camada granular;
- o confinamento induzido pela geogrelha conduz a um aumento da resistência ao corte e da rigidez do sistema composto agregado-geogrelha, fenómeno frequentemente designado como efeito de enrijecimento da camada estabilizada;
- a eficácia do confinamento depende fortemente das propriedades geométricas da geogrelha, nomeadamente da forma das nervuras e do tamanho das aberturas, bem como da rigidez das nervuras, que condicionam o nível de intertravamento e a transferência de esforços entre o agregado e a geogrelha.

Capítulo 4

4. Influência da distribuição granulométrica do agregado na otimização do efeito de confinamento das geogrelhas

O presente capítulo tem como objetivo testar o resultado de todo o trabalho de aquisição de conhecimentos realizado no âmbito da presente dissertação. Para tal, este deverá considerar como teste efetivo, uma resposta afirmativa às especificações enunciadas tendo por base a sustentação teórica. Objetivo específico do capítulo: identificar quais as características granulométricas que otimizam o efeito de confinamento das geogrelhas.

4.1. Influência da distribuição granulométrica do agregado

4.1.1. Características granulométricas consideradas na análise

Dentro das características granulométricas do agregado, assinaladas anteriormente na secção 3.1.3, para a presente análise vão ser consideradas as seguintes:

Diâmetro mediano (D_{50})

Coefficiente de uniformidade (C_U)

Coefficiente de curvatura (C_C)

Limite superior e inferior da granulometria (curva granulométrica completa)

A Figura 4.1 mostra a relação entre a percentagem de partículas de agregado com tamanho inferior a 2 mm e o coeficiente de resistência da interface agregado-geogrelha. Observa-se que à medida que aumenta a percentagem de partículas finas, o coeficiente de resistência da interface diminui. Isto indica que o agregado com granulometria mais fina tem menor capacidade de mobilizar impulso passivo, reduzindo a eficácia do confinamento proporcionado pelas geogrelhas. A compatibilidade entre a granulometria e a geometria da geogrelha é essencial para otimizar o desempenho estrutural.

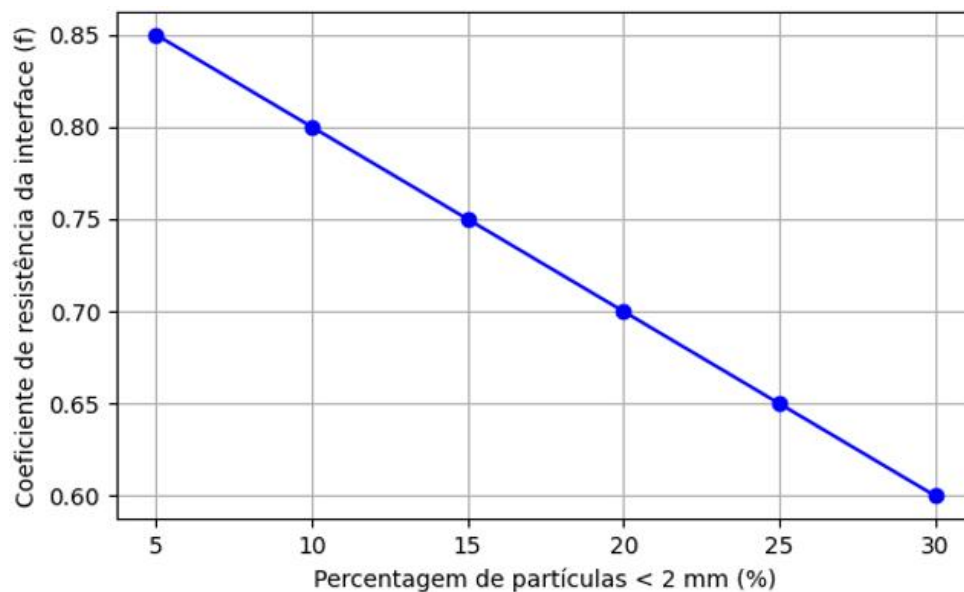


Figura 4.1. Relação entre o coeficiente de resistência da interface e a porcentagem de partículas < 2 mm.

Também o agregado bem graduado apresenta maior capacidade de carga, evidenciando melhor confinamento e interação com a geogrelha, como se pode concluir da análise da Figura 4.2. A distribuição mal distribuída resulta em menor desempenho estrutural, mesmo com a incorporação da geogrelha.

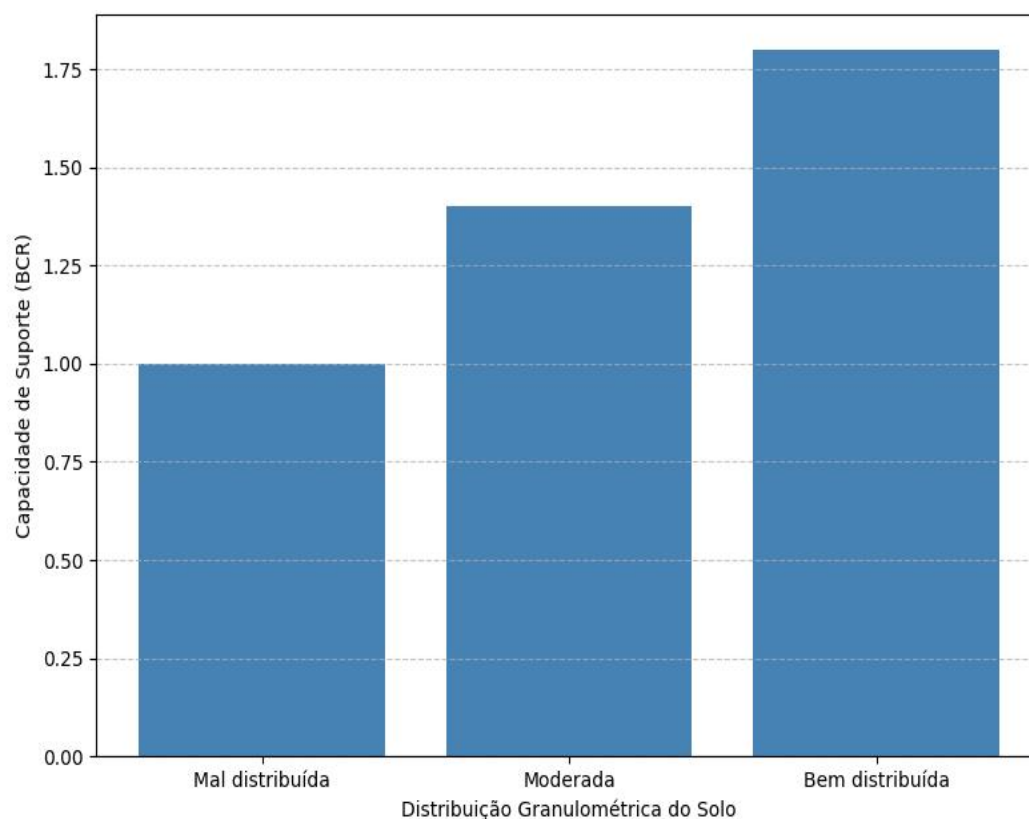


Figura 4.2. Influência da distribuição granulométrica do agregado na capacidade de suporte.

4.1.2. Compatibilidade geométrica

A compatibilidade geométrica entre as aberturas da geogrelha e as partículas do agregado é um conceito essencial na engenharia geotécnica, especialmente em aplicações de estabilização de camadas granulares, como pavimentos, estradas não revestidas. Esta compatibilidade geométrica é geralmente expressa pela relação entre o tamanho da abertura da geogrelha (A) e o diâmetro mediano das partículas do agregado (D_{50}), sendo um dos parâmetros mais relevantes para o desempenho mecânico do sistema agregado-geogrelha.

Estudos experimentais têm demonstrado que, em condições de ensaio controladas, valores de A/D_{50} da ordem de 2,0 favorecem o intertravamento mecânico e o confinamento lateral do agregado, traduzindo-se em menores deformações verticais, melhor redistribuição das tensões no subleito e maior número de ciclos de carga suportados antes da rotura (Giroud et al., 2023; Perkins et al., 2004).

A rigidez à tração da geogrelha também foi importante, mas a compatibilidade geométrica teve maior influência nos resultados (Oliveira & Falorca, 2023; Liu et al., 2021; Han et al., 2018; Indraratna et al., 2012). Quando os grãos do agregado são compatíveis com as aberturas da geogrelha, ocorre intertravamento eficiente que melhora o confinamento lateral, reduz os assentamentos, aumenta a capacidade de carga e a resistência ao corte. Eleva os valores de CBR e módulo de deformação resiliente.

4.1.3. Tendências e variações nos resultados

O Quadro 4.1 mostra a relação entre o coeficiente de uniformidade do agregado e o desempenho do material compósito, em termos percentuais (Liu et al., 2021; Han et al., 2018; Indraratna et al., 2012). Para um agregado mal graduado, com baixa diversidade de tamanhos de partículas, a geogrelha tem papel importante na melhoria do desempenho. Para $4 < C_U < 6$, que corresponde a um agregado moderadamente graduado, o que permite melhor interação com a geogrelha, resultando em ganhos mais expressivos. Quando $C_U > 6$, típico de um agregado bem graduado, com bom intertravamento natural, a geogrelha ainda contribui, mas os ganhos são menos significativos.

Quadro 4.1. Relação entre C_U e o desempenho do material compósito.

Intervalo	Capacidade de carga	Redução de assentamentos	Resistência ao corte	CBR	Módulo de deformação
$C_U < 4$	+20 a +40%	-30 a -50%	+15 a +30%	+50 a +150%	+40 a +80%
$4 < C_U < 6$	+30 a +60%	-20 a -40%	+25 ^a a +50 %	+30 a +80%	+30 a +60 %
$C_U > 6$	+10 a +25%	-10 a -25%	+10 a +20%	+15 a +35%	+15 a +35 %

O Quadro 4.2 sintetiza a relação entre D_{50}/A e o desempenho do material compósito, em termos percentuais (Oliveira & Falorca, 2023; Liu et al., 2021; Kim et al, 2020; Han et al., 2018; Qian et al., 2013; Indraratna et al., 2012). Neste trabalho, a compatibilidade geométrica é expressa pela razão D_{50}/A , em vez da forma mais comum A/D_{50} , uma vez que esta apresentou melhor correlação direta com os parâmetros de desempenho do material compósito agregado-geogrelha, facilitando a interpretação dos resultados. Razões maiores que 1,0 indicam que as partículas são maiores que as aberturas da geogrelha, promovendo melhor confinamento lateral. Razões menores que 0,5 indicam que as partículas passam facilmente pelas aberturas, reduzindo a eficácia da geogrelha.

Quadro 4.2. Relação entre D_{50}/A e o desempenho do material compósito.

Razão D_{50}/A	Interação partícula-geogrelha	Capacidade de carga	Capacidade de carga	Redução de assentamentos	Resistência ao corte	CBR
<0,5	Fraca interação, partículas pequenas passam pelas aberturas	+10 a +25%	+10 a +25%	-10 a -20%	+5 a +15%	+10 a +30%
0,5 – 1,0	Interação moderada, bom confinamento	+25 a +50%	+25 a +50%	-20 a -40%	+20 a +35%	+30 a +80%
>1,0	Forte interação, partículas maiores que a abertura	+40 a +70%	+40 a +70%	-30 a -50%	+30 a +50%	+50 a +150%

O Quadro 4.3 apresenta a relação entre o coeficiente de curvatura do agregado e o desempenho do material compósito, em termos percentuais (Kim et al, 2020; Han et al., 2018; Qian et al., 2013; Indraratna et al., 2012). Valores de C_c entre 1,0 e 3,0 são considerados ideais, promovendo melhor confinamento e desempenho mecânico.

Quadro 4.3. Relação entre C_c do agregado e o desempenho do material compósito.

Intervalo	Interação partícula-geogrelha	Capacidade de carga	Redução de assentamentos	Resistência ao corte	CBR	Módulo de deformação
$C_c < 1$	Curvatura baixa, pouca diversidade de tamanhos, interação fraca	+10 a +25%	-10 a -20%	+5 a +15%	+10 a +30%	+10 a +25%
$1 < C_c < 3$	Curvatura ideal, boa gradação, excelente intertravamento	+30 a +60%	-20 a -40%	+25 a +50%	+30 a +80%	+30 a +60%
$C_c > 3$	Curvatura excessiva, partículas muito variadas, interação irregular	+15 a +35%	-15 a -30%	+10 a +25%	+20 a +50%	+20 a +40%

4.2. Discussão dos resultados

A dispersão observada nos ganhos proporcionados pelo uso de geogrelhas em solos reforçados não se deve apenas à razão entre o diâmetro mediano do agregado (D_{50}) e a abertura da geogrelha (A), mas também às características intrínsecas das partículas. Propriedades como forma, textura superficial, densidade aparente, coeficiente de uniformidade e resistência à compressão desempenham papel fundamental na interação solo-geogrelha, como se procura sintetizar no Quadro 4.4.

Partículas angulares e rugosas tendem a gerar maior atrito e travamento mecânico, aumentando a eficiência da função de estabilização, enquanto partículas arredondadas e lisas reduzem essa interação. A distribuição granulométrica bem graduada favorece o preenchimento dos vazios e melhora o confinamento, ao passo que agregados uniformes limitam o travamento. A densidade aparente elevada contribui para maior estabilidade, enquanto materiais menos densos podem sofrer deformações sob carga.

Outro fator crítico é a resistência à compressão dos agregados. Agregados com alta resistência mantêm sua integridade estrutural durante a aplicação de cargas, garantindo que a curva granulométrica permaneça estável e que o travamento mecânico seja preservado. Por outro lado, agregados frágeis podem se fragmentar, alterando a granulometria e reduzindo a eficácia do efeito de confinamento.

Em síntese, a dispersão dos dados decorre da variabilidade dessas propriedades, que influenciam diretamente os mecanismos de atrito, confinamento e transferência de carga na interface solo-geogrelha. A compreensão e o controle dessas características são essenciais para otimizar o desempenho do material compósito agregado-geogrelha.

Quadro 4.4. Propriedades das partículas e impacto na função de estabilização das geogrelhas.

Propriedade	Descrição	Impacto na estabilização com geogrelhas
Forma (angularidade)	Partículas angulares vs arredondadas	Angulares aumentam atrito e travamento; arredondadas reduzem eficiência
Textura superficial	Rugosa vs lisa	Rugosa melhora aderência e atrito; lisa diminui interação
Densidade aparente	Alta vs baixa	Alta densidade aumenta resistência e estabilidade; baixa densidade pode gerar deformações
D_{50} (diâmetro mediano)	Diâmetro mais frequente das partículas	Compatibilidade com abertura da geogrelha é essencial para travamento
Coeficiente de uniformidade (C_u)	Relação entre D_{60} e D_{10}	C_u alto indica boa graduação, bom intertravamento natural.
Resistência à compressão	Capacidade do agregado de resistir à carga sem fraturar	Alta resistência mantém integridade e maximiza travamento; baixa resistência causa fragmentação e perda de desempenho

Para além dos aspetos referidos acima, a análise da influência das propriedades das partículas na função de estabilização das geogrelhas pode ser realizada por diferentes metodologias, cada uma com características próprias que impactam a dispersão dos resultados.

Ensaio experimentais - Os ensaios de arrancamento e triaxiais com inclusão de geogrelhas apresentam alta precisão, pois capturam a variabilidade real das partículas (forma, textura, resistência à compressão). No entanto, essa sensibilidade gera alta dispersão nos resultados, refletindo as diferenças entre amostras.

Métodos numéricos - Simulações por elementos finitos oferecem boa precisão e esforço de cálculo moderado, mas dependem de parâmetros médios. Isso reduz a dispersão, pois simplifica a variabilidade das partículas, mas também limita a representatividade dos resultados. São úteis para análises paramétricas e otimização.

Modelos analíticos - Baseados em correlações empíricas, apresentam baixa precisão e muito baixa dispersão, pois ignoram a variabilidade real das partículas. São rápidos e económicos, adequados para dimensionamentos preliminares, mas não substituem análises detalhadas.

Relação com a dispersão - A dispersão é maior quando a metodologia captura propriedades reais (angularidade, textura, resistência), como nos ensaios experimentais. Métodos simplificados reduzem dispersão, mas à custa de menor fidelidade.

4.3. Recomendações para a seleção do agregado

Segue-se uma síntese das características granulométricas do agregado que têm mostrado maior eficiência no desempenho do material compósito agregado-geogrelha, bem como considerações práticas a ter em conta na seleção de agregados para sistemas estabilizados com geogrelhas.

1. Redução de deformações

Agregados bem graduados, com diâmetro mediano mais elevado, têm demonstrado maior eficiência na redução de deformações permanentes em camadas estabilizadas com geogrelhas. O intertravamento mecânico entre o agregado e a geogrelha promove um confinamento lateral eficaz, reduzindo a movimentação das partículas sob a ação das cargas. A combinação de coeficiente de uniformidade moderado, entre 4,0 e 6,0, com coeficiente de curvatura adequado, entre 1,0 e 3,0, resulta em melhor desempenho estrutural e menores deformações permanentes.

2. Aumento da rigidez

A rigidez da interface agregado-geogrelha é influenciada pelo intertravamento mecânico. Agregados com granulometria compatível com a abertura da geogrelha favorecem a mobilização deste mecanismo, contribuindo para o aumento da rigidez do sistema compósito agregado-geogrelha. A combinação de coeficiente de uniformidade moderado com coeficiente de curvatura adequado contribuem para maior rigidez estrutural, especialmente quando combinados com geogrelhas de alta rigidez. A seleção do agregado deve considerar a capacidade de gerar intertravamento eficaz para maximizar a rigidez da camada estabilizada.

3. Melhoria da capacidade de carga

A resistência ao corte em sistemas estabilizados com geogrelhas é influenciada pelas características granulométricas do agregado. Agregados bem graduados (C_U elevado) promovem melhor confinamento lateral e maior resistência ao corte. O C_C compreendido entre 1,0 e 3,0 potencia este efeito, assegurando uma distribuição granulométrica favorável ao intertravamento. Para uma avaliação mais rigorosa da eficiência da interação agregado-geogrelha e da capacidade de carga resultante, recomenda-se a realização de ensaios laboratoriais, como ensaios de corte direto.

4. Desempenho sob a ação de cargas repetidas

Em aplicações de pavimentos, o desempenho sob cargas repetidas é otimizado com a utilização de agregado bem graduado e granulometricamente compatível com as aberturas da geogrelha. Valores elevados de C_U estão associados à redução da formação de rodeiras e à melhoria da vida útil do pavimento. A combinação de agregados com boa distribuição granulométrica e geogrelhas adequadas resulta em menor deformação permanente e maior durabilidade da camada estabilizada.

4.3.1. Considerações práticas na seleção de agregados

Compatibilidade com a geogrelha: a abertura da geogrelha deve ser compatível com o tamanho característico das partículas do agregado para permitir intertravamento eficaz. A rigidez e o material da geogrelha também influenciam essa compatibilidade.

Limitações de materiais locais: a disponibilidade de agregados na região pode limitar a escolha do material ideal. É necessário avaliar se os materiais locais atendem aos requisitos de C_U e C_C para garantir desempenho satisfatório.

Condições de compactação: a compactação adequada é essencial para o desempenho do sistema agregado-geogrelha. Agregados bem graduados facilitam o processo de compactação, promovendo maior confinamento lateral, melhor eficiência da estabilização e maior durabilidade da camada granular.

Capítulo 5

5. Conclusão

5.1. Conclusões gerais

5.1.1. Síntese das principais conclusões

A presente dissertação evidenciou que a distribuição granulométrica do agregado exerce influência direta na eficácia do confinamento proporcionado pelas geogrelhas. Agregados com coeficiente de uniformidade (C_U) entre 4,0 e 6,0 e coeficiente de curvatura (C_C) entre 1,0 e 3,0, demonstraram melhor desempenho estrutural da camada granular sob a ação de cargas, promovendo maior intertravamento, redução de assentamentos e aumento da capacidade de carga. A compatibilidade geométrica entre o diâmetro mediano das partículas (D_{50}) e a abertura da geogrelha revelou-se essencial para otimizar o efeito de confinamento.

5.1.2. Contributos da dissertação

Identificação dos parâmetros granulométricos mais relevantes para o desempenho de sistemas reforçados com geogrelhas.

Proposta de faixas ideais de C_U , C_C e razão D_{50}/A para maximizar o confinamento lateral.

Análise comparativa entre metodologias de avaliação (ensaios experimentais, numéricos e analíticos) e seus impactos na dispersão dos resultados.

Recomendação prática para seleção do agregado, considerando compatibilidade com a geogrelha, condições de compactação e disponibilidade local.

5.1.3. Limitações identificadas

Dispersão nos resultados experimentais devido à variabilidade das propriedades das partículas do agregado (forma, textura, resistência).

Dependência de materiais locais, que pode restringir a aplicação das recomendações granulométricas.

Modelos analíticos simplificados não capturam a complexidade da interação solo-geogrelha.

5.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros

Realização de ensaios experimentais com diferentes tipos de geogrelhas e agregados locais para validação das faixas ideais de C_U , C_C e D_{50}/A .

Desenvolvimento de modelos numéricos representativos, que incorporem a variabilidade real das partículas.

Investigação da influência da forma e textura das partículas na eficiência do confinamento a curto e longo prazo.

Bibliografia

- Berg, R. R., Christopher, B. R., & Perkins, S. W. (2000). Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures. Geosynthetic Materials Association White Paper II, Roseville, MN, USA, 176p.
- Giroud, J. P., Han, J., Tutumluer, E., & Dobie, M. J. D. (2023). The use of geosynthetics in roads. *Geosynthetics International*, 30(1), 47-80.
- IGS (2018). Geosynthetics in Unpaved Roads. Folhetos Técnicos, IGS Portugal.
- Özer, M. (2021). Determination of the relationship between geogrid aperture size and aggregate particle size. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 3.
- Kim, J. H., Kang, M., Byun, Y. H., Qamhia, I. I., Tutumluer, E., & Wayne, M. H. (2020). Bender element shear wave measurement based local stiffness characteristics related to permanent deformation behavior of geogrid-stabilized aggregate specimens. In *Geo-Congress 2020* (pp. 517-526). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Lopes, M., & Barroso, M. (2021). Matéria-prima, processos de fabrico e classificação. In M. Lopes, M. Barroso, & J. Neves (Eds.), *Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obra* (pp. 1-15). Lisboa. <https://doi.org/10.24849/spg.igs.2021.01>
- Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., & Parsons, R. L. (2013). Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1013-1021.
- Liu, C., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2021). An analytical model for particle-geogrid aperture interaction. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1), 41-44.
- Indraratna, B., Karimullah Hussaini, S. K., & Vinod, J. S. (2012). On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces. *Geotechnical Testing Journal*, 35(2), 305-312.
- Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., & Huang, B. (2018). Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, 158, 1015-1025.
- Oliveira, G., & Falorca, I. (2023). Estudo da Transferência de Esforços na Interface Solo-Geogrelha sob Condições de Carregamento Axissimétrico. 18º CNG, Évora.
- Peng, X., & Zornberg, J. G. (2017). Evaluation of load transfer in geogrids for base stabilization using transparent soil. *Procedia engineering*, 189, 307-314.
- Perkins, S. W., Christopher, B. R., Cuelho, E. L., Eiksund, G. R., Hoff, I., Schwartz, C. W., Svanø, G. & Watn, A. (2004). Development of design methods for geosynthetic reinforced flexible pavements. FHWA Report Ref. No. DTFH61-01-X-00068, Montana State University, Bozeman, MT, USA, 263p.
- Webster, S. L. (1992). Geogrid reinforced base courses for flexible pavements for light aircraft: Test section construction, behavior under traffic, laboratory tests, and design criteria. Final Rep., DOT/FAA/RD-92/25, U.S. Department of Transportation and Federal Aviation Administration, 91 pp.

Wrigley, N. E., Zheng, H., Liu, X. J., & Sama, S. R. (2008). The confinement effect of different geogrids. In Proceedings of EuroGeo4, Edinburgh, Paper 243.