



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

“Contribuição para o estudo da influência do teor em água na resistência de solos compactados”

José Gregório Gomes Serrão

Orientação: Prof.^a Paula Alexandra Gonçalves Faria

Mestrado em Engenharia Geológica

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

“Contribuição para o estudo da influência do teor em água na resistência de solos compactados”

José Gregório Gomes Serrão

Orientação: Prof.^a Paula Alexandra Gonçalves Faria

Mestrado em Engenharia Geológica

Dissertação

Évora, 2018

Agradecimentos

À Profª Paula Faria pela orientação, amizade, pelo tempo dedicado e todos os ensinamentos que me transmitiu ao longo deste trabalho, que sempre se demonstrou disponível para ajudar, manifestando o seu interesse e empenho com este trabalho, ao qual estou lhe inteiramente grato.

Um dos principais agradecimentos é dirigido à minha família, pois sem eles nada disto era possível, aos meus pais e aos meus irmãos que sempre manifestaram o seu apoio, que mesmo apesar da distância foram os meus grandes pilares para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos pelo suporte que me demonstraram, pelas convivências, jogatanas e os bons momentos que proporcionaram e que me sempre incentivaram neste trabalho.

Um especial agradecimento à GEOSLOPE International Ltd. em particular ao coordenador de marketing da empresa Tim Cheng pelo fornecimento de uma licença do software de forma gratuita para a realização dos vários cálculos essenciais a esta investigação.

À Nova estrada, (ACE – Agrupamento complementar de empresas) pela facultação de amostras de solos oriundas da A8 e A15.

À Rodovias do Baixo Alentejo, (ACE) pela possibilidade de amostragem de solos provenientes do lanço B da A26.

Ao Departamento de Geociências da Universidade de Évora, o qual disponibilizou a utilização do espaço e equipamentos laboratoriais para a realização dos ensaios.

Resumo

O presente trabalho pretende abordar um aspeto associado aos solos compactados, da maior importância no desempenho e estabilidade dos aterros. O tema prende-se com a influência da água no comportamento e resistência ao corte de solos compactados.

Para as obras de terra especialmente os aterros que integram empreendimentos viários (sejam rodoviários ou ferroviários), são vários os requisitos que os solos têm que cumprir para poderem ser aplicados, havendo igualmente requisitos a cumprir aquando da sua aplicação na execução de camadas de aterro. Estas regras são restritas e definidas através do Caderno de Encargos (CE), documento integrante das empreitadas de construção deste tipo de empreendimentos. Em Portugal, para a construção de Infraestruturas, sob a égide da entidade pública Infraestruturas de Portugal, o CE adotado é o Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO). Este documento determina e limita as características dos solos a usar e as condições com que podem ser utilizados.

O aspeto que interessa a esta investigação corresponde ao estado de humidade dos solos aquando da sua aplicação em camada de aterro, estado esse que consta das condições de aplicação dos solos em aterro, patenteadas no CETO.

Esta investigação pretende estudar de que modo varia a resistência ao corte de solos compactados, em função das variações do teor em água com que se efetua essa compactação. Deste modo pretende-se contribuir para a avaliação e discussão sobre a adequação dos limites impostos em sede do CETO, para este aspeto basilar da construção de aterros rodoviários, ou ferroviários.

Para concretizar o objetivo desta investigação, colheram-se 5 amostras de solos, que foram sujeitas a uma fase de testes experimentais, cujos resultados permitiram uma análise e discussão da questão, que se espera possa contribuir para um estudo maior e, eventualmente, para a redefinição dos limites impostos pelo CETO ao teor de humidade dos solos admitido para a sua utilização na construção de aterros.

Palavras-chave: Solos compactados; Resistência ao corte; Teor em água; Cadernos de encargos; Aterros; Estabilidade de taludes.

Contribution to the study of the influence of moisture content on the strength of compacted soils

Abstract

The present research intends to approach an aspect associated about compacted soils, of major importance in the performance and stability of the landfills construction. The theme is the influence of water on behavior and shear strength of compacted soils. For land works, especially landfills that integrate road projects (whether road or railway), there are several requirements that the soils must fulfilled in order to be applied. These rules are restricted and defined through the CE Charge Workbook, an integral document of the construction regulation of this type of enterprises. In Portugal, for the construction of Infrastructures, under the aegis public entity Infraestruturas de Portugal, the adopted CE is the Workbook of Type Construction Charges (CETO). This document defines the soils and the conditions under which they may be used.

The main aspect that concerns this investigation corresponds to the soils moisture content, when it is applied in a landfill layer construction, which is the conditions patented in the CETO.

This research intends to study how the shear strength of compacted soils varies according to the variations of the moisture-content with which this compaction is carried out.

In this way it is intended to contribute to the evaluation and discussion on the adequacy of the limits imposed in the CETO, for this basic aspect of the construction of road or railroad landfills.

In order to achieve the objective of this investigation, 5 different soils were taken, which were subjected to an experimental test phase. The results allowed for an analysis and discussion of the question, which is expected to contribute to a larger study and possibility to a redefinition of the limits imposed by the CETO to the moisture content of the soil allowed for its use in the construction of landfills.

Keywords: Compacted soils; shear strength; moisture content; Construction specifications; Landfill; Slope stability.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice	VII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tabelas.....	XIII
1. Objeto de estudo	1
2. Introdução.....	2
3. Características e propriedades dos solos	4
3.1 Grandezas básicas	4
3.2 Composição granulométrica.....	5
3.3 Limites de consistência	5
3.4 Composição mineralógica.....	5
3.5 Água no solo.....	6
3.5.1 Influência do teor em água nas propriedades do solo.....	6
3.5.2 Tensão neutra e tensão efetiva.....	7
3.6 Resistência e mecânica dos solos	8
3.6.1 Nota prévia	8
3.6.2 Rotura por cisalhamento.....	9
3.6.2.1 Teoria de rotura de Mohr-Coulumb	9
3.6.2.2 Resistência ao corte em areias	10
3.6.2.3 Resistência ao corte em argilas.....	11
4. Materiais e métodos.....	13
4.1 Enquadramento geográfico e geológico.....	13
4.2 Caderno de Encargos Tipo Obra	18
4.3 Amostragem	22
4.4 Preparação dos solos	23
4.5 Ensaio de laboratório	25
4.5.1 Teor de água natural	25
4.5.2 Análise granulométrica.....	25
4.5.2.1 Execução.....	26
4.5.3 Limites de consistência ou de Atterberg	28
4.5.3.1 Limite de liquidez.....	30

4.5.3.2	Limite de liquidez pelo Cone penetrométrico	32
4.5.3.3	Limite de Plasticidade	33
4.5.4	Expansibilidade	34
4.5.4.1	Execução.....	34
4.5.5	Ensaio de Compactação.....	36
4.5.5.1	Execução.....	37
4.5.6	Ensaio de resistência ao corte direto.....	40
4.5.6.1	Execução.....	42
4.6	Geoslope.....	46
4.6.1	Procedimento	47
5.	Análise de resultados	48
5.1	Ensaaios laboratoriais	48
5.1.1	Teor em água natural	49
5.1.2	Análise granulométrica.....	49
5.1.3	Limites de consistência.....	52
5.2	Classificação dos solos.....	55
5.2.1	Classificação de solos para fins rodoviários.....	56
5.2.2	Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S.) ASTM D 2487 – 85.....	56
5.2.3	Classificação Francesa - GTR (NF P 11 300) LCPC/SETRA	58
5.2.4	Resultado da classificação dos solos	59
5.3	Expansibilidade	60
5.4	Ensaio de compactação	60
5.5	Corte direto.....	62
5.5.1	Apresentação de resultados Z1	64
5.5.2	Apresentação de resultados Z2	68
5.5.3	Apresentação de resultados Z3	71
5.5.4	Apresentação de resultados Z4	74
5.5.5	Apresentação de resultados Z5	77
5.5.6	Análise geral dos resultados	81
5.6	Geoslope.....	84
6.	Conclusão e considerações finais	116
6.1	Trabalhos futuros.....	122
	Bibliografia	123

Anexos

Índice de figuras

Figura 1 - Grandezas básicas dos solos (Fernandes, 2006).	4
Figura 2 - Interpretação da tensão efetiva (CRAIG, 2007)	7
Figura 3 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb.....	9
Figura 4 - Comportamento tensão-deformação de solos compactados e soltos (areias), (Folques, 1987).	10
Figura 5 - Localização da zona de amostragem dos solos Z1, Z2 e Z3, retirado de Google maps.....	14
Figura 6 – Excerto da Carta Geológica de Portugal Continental à escala original 1/200 000 com o traçado do lanço B (Nó de Grândola – Ferreira do Alentejo) in Projeto de execução Subconcessão Baixo Alentejo Lanço B: IP8 PE1-Terraplenagem.	15
Figura 7 - Excerto do esboço corográfico com indicação do desenvolvimento dos traçados da A8 e A15, retirado dos projetos de execução da A8 e A15.	16
Figura 8 - Excerto da carta geológica à escala 1 / 1.000.000 em que se inserem os traçados da A8 e A15.	17
Figura 9 - Quadro de classificação de solos a ser utilizados em aterros (CETO da E.P, S.A).	20
Figura 10 - Imagem representativa do processo de amostragem dos solos Z1, Z2 e Z3.22	
Figura 11 - Amostra Z1 em fase de secagem.	23
Figura 12 - Esquema ilustrativo da divisão por hierarquia.	24
Figura 13 - Divisão do solo com auxílio de um repartidor.	24
Figura 14 - Peneiros ASTM e respetivas dimensões.	27
Figura 15 - Frações granulométricas inseridas nos respetivos copos.	27
Figura 16 – Representação da consistência dos solos e os seus limites, adaptado de Faria 2005.	29
Figura 17 - Concha de Casagrande.	31
Figura 18 - Exemplo de um gráfico demonstrativo do resultado do limite de liquidez pelo método de concha de Casagrande.	32
Figura 19 – Gráfico representativo do valor de penetração em função do teor em água.	33
Figura 20 - Fotografia do expansímetro.	35
Figura 21 - Teoria de Lambe, (Ribeiro 2008).	37
Figura 22 – Imagem do solo humedecido.	38

Figura 23 - Fotografia da máquina de compactação e o respetivo molde grande com o solo compactado.	39
Figura 24 - Exemplos simplificados de roturas em materiais terrosos, (K H HEAD, 1992).	40
Figura 25 - Fotografia da máquina de corte (WYKEHAM FARRANCE ENG.LTD). .	42
Figura 26 - Processo de extração do provete do solo compactado para o ensaio de corte direto.	43
Figura 27 - Solo compactado na caixa da máquina de corte direto.	44
Figura 28 - Gráfico ilustrativo da deformação horizontal e a tensão de corte.	44
Figura 29 - Gráfico da tensão vertical em função da tensão de corte.	45
Figura 30 - Curvas granulométricas das diversas amostras estudadas e a escala ABNT para a classificação dos solos.	50
Figura 31 - Triângulo de Feret: Designação dos solos.	51
Figura 32 - Pormenor da realização do ensaio de limite de liquidez pelo cone penetrométrico.	54
Figura 33 - Pormenor da realização do ensaio do limite de plasticidade.	54
Figura 34 – Classificação de solos com partículas de $D_{máx} \leq 50\text{mm}$ (GTR).	58
Figura 35 - Classificação de solos com partículas de $D_{máx} > 50\text{mm}$	59
Figura 36 - Pormenores ocorridos ao longo do ensaio de compactação Proctor.	62
Figura 37 - Exemplo de um gráfico de ensaio de corte direto (Tensão vs Deformação horizontal).	63
Figura 38 - Gráfico de tensão de corte vs tensão vertical.	63
Figura 39 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z1.	66
Figura 40 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z1.	67
Figura 41 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z2.	70
Figura 42 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z2.	71
Figura 43 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z3.	73
Figura 44 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z3.	74

Figura 45 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes (w-wopt) para os três cortes da amostra Z4.....	76
Figura 46 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes (w-wopt) para os três cortes da amostra Z4.	77
Figura 47 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes (w-wopt) para os três cortes da amostra Z5.....	79
Figura 48 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes (w-wopt) para os três cortes da amostra Z5.	80
Figura 49 - Fotografia da caixa de corte com a amostra Z4, onde se notam pontos mais claros correspondentes a aglomerados de partículas cortados.....	82
Figura 50 - Resultado do cálculo da estabilidade, pelo método de Bishop, através do programa Geoslope.....	89
Figura 51 - Comportamento do fator de segurança com 3 e 7 teores em água para o solo Z3 com os parâmetros de resistência do CD.	90
Figura 52 – Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z1 CD.....	92
Figura 53 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z1 CDR.....	92
Figura 54 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z2 CD.....	94
Figura 55 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z2 CDR.....	94
Figura 56 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z3 CD.....	96
Figura 57 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z3 CDR.....	96
Figura 58 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z4 CD.....	98
Figura 59 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z4 CDR.....	98
Figura 60 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z5 CD.....	100
Figura 61 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z5 CDR.....	101
Figura 62 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Bishop, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.....	114

Figura 63 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Spencer, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.....	114
Figura 64 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Janbu, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.	115
Figura 65 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{otp}(\%)$ para o solo Z1.....	117
Figura 66 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{otp}(\%)$ para o solo Z2.....	117
Figura 67 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{otp}(\%)$ para o solo Z3.....	118
Figura 68 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{otp}(\%)$ para o solo Z4.....	118
Figura 69 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{otp}(\%)$ para o solo Z5.....	119

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação de solos segundo o índice de plasticidade.....	29
Tabela 2 - Tipos de compactação Proctor.	36
Tabela 3 - Geometria dos taludes adotados.	47
Tabela 4 - Síntese do número de ensaios laboratoriais realizados.	48
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de teor em água natural.	49
Tabela 6 - Resultado do Coeficiente de uniformidade e curvatura para os solos Z1, Z2 e Z3.....	52
Tabela 7 - Síntese de resultados dos limites de consistência.....	55
Tabela 8 - Classificação dos solos segundo a Classificação proposta por Jenkis,1988.	55
Tabela 9 - Quadro para classificação de solos, excerto da especificação E240 – 1970 do LNEC.....	56
Tabela 10 - Quadro do Sistema Unificado de Classificação de solos (ASTM).	57
Tabela 11 - Classificação dos solos em estudo.	59
Tabela 12 - Síntese de resultados do ensaio de expansibilidade.	60
Tabela 13 - Síntese de resultados do ensaio de Proctor para o teor ótimo de compactação.	61
Tabela 14 - Resultado dos ensaios de corte direto para os vários conjuntos de provetes compactados com diferentes teores em água.....	64
Tabela 15 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os vários conjuntos de provetes compactados em diferentes teores em água.	65
Tabela 16 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os vários conjuntos de provetes compactados com diferentes teores em água.....	65
Tabela 17 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z2.	68
Tabela 18 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z2.....	69
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z2.	69
Tabela 20 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z3.....	72
Tabela 21 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z3.....	72

Tabela 22 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z3.	72
Tabela 23 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z4.	75
Tabela 24 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z4.	75
Tabela 25 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z4.	75
Tabela 26 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z5.	78
Tabela 27 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z5.	78
Tabela 28 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z5.	78
Tabela 29 – Quantidade de cálculos efetuados com o Geoslope.	84
Tabela 30 - Resultados do ensaio de Proctor com a diferença de -3% em relação ao teor ótimo.	85
Tabela 31 - Resultados do ensaio de Proctor com a diferença de +3% em relação ao teor ótimo.	85
Tabela 32 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação ± 3% do teor ótimo na amostra Z1.	86
Tabela 33 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto(residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z1.	86
Tabela 34 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z2.	86
Tabela 35 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z2.	87
Tabela 36 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z3.	87
Tabela 37 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z3.	87
Tabela 38 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z4.	87
Tabela 39 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z4.	88
Tabela 40 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z5.	88

Tabela 41 - Valores de Coesão (KN/m ²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z5.	88
Tabela 42 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z1.	103
Tabela 43 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z1.	104
Tabela 44 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z2.	105
Tabela 45 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z2.	106
Tabela 46 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z3.	107
Tabela 47 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z3.	108
Tabela 48 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z4.	109
Tabela 49 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z4.	110
Tabela 50 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z5.	111
Tabela 51 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z5.	112

Lista de símbolos e acrónimos

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ACE – Agrupamento Complementar de Empresas

ASTM – American Society for Testing and Materials

C_c – Coeficiente de curvatura

CD – Corte Direto

CDR – Corte Direto Residual

CE – Caderno de Encargos

CETO – Caderno de Encargos Tipo Obra

CR – Corte Reversivo

C_u – Coeficiente de uniformidade

E.P – Estradas de Portugal

F.S – Fator de Segurança

IP – Índice de plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

S.U.C.S – Sistema Unificado de Classificação de Solos

W_c – Teor em água do corte

W_{nat} – Teor em água natural

W_{otp} – Teor em água óptimo

W_{opm} – Teor em água óptimo referido ao ensaio de Proctor Modificado

W_{opn} – Teor em água óptimo referido ao ensaio de Proctor Normal

τ – Resistência ao corte

σ – Tensão Normal aplicada

ϕ – Ângulo de atrito

c – Coesão

γ_{max} - Baridade Seca Máxima

1. Objeto de estudo

As obras de terra, em particular os aterros de obras viárias (tanto rodoviárias como ferroviárias), são construídas com solos cujas características devem satisfazer as condições prescritas em Caderno de Encargos (C.E.) associado à empreitada, o qual é igualmente tido em conta aquando da elaboração do Projeto de Execução (P.E.) da obra.

No presente estudo, considera-se como padrão o Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) em vigor na Infraestruturas de Portugal, entidade Pública que atualmente centraliza a gestão das redes nacionais rodoviária e ferroviária. Posteriormente, em capítulo próprio, apresentam-se as considerações técnicas previstas no CETO, que devem ser consideradas na execução de um aterro.

O comportamento dos aterros depende dos solos utilizados na sua construção e das suas características mecânicas (que, por sua vez, dependem de vários fatores como a natureza das partículas que os constituem, a sua forma e distribuição granulométrica, o seu teor em água e o grau de compactação com que foi aplicado), assim como do seu modo de aplicação nas diversas camadas do aterro.

O aspeto que mereceu a maior dedicação deste estudo, prende-se com a avaliação da influência do teor em água nas características de resistência ao corte de solos compactados.

Deste modo, foi pensado um estudo laboratorial detalhado de alguns solos, no sentido de avaliar as suas características físicas e mecânicas, com especial ênfase para as características de resistência ao corte, de provetes compactados com diferentes teores em água. Para o efeito foram colhidas e caracterizadas 5 amostras de solos diferentes.

Pretende-se ainda avaliar, para cada tipo de solo, como ocorre a variação dessas características resistentes face a uma determinada gama de valores de teor em água.

Finalmente, com os parâmetros característicos de resistência ao corte obtidos para cada tipo de solo, e para diferentes condições de humidade, procedeu-se à determinação do valor do fator de segurança para a estabilidade do talude de um aterro, com diferentes geometrias, segundo três metodologias de cálculo distintas.

2. Introdução

A realização deste trabalho pretende contribuir para o conhecimento do comportamento mecânico de solos compactados. Com o intuito da realização de uma dissertação de mestrado optou-se por um tema que possa incrementar a informação existente, nesta temática dos solos compactados.

Como já mencionado no objeto de estudo, um dos problemas que pretendemos avaliar é o papel na relação causa/efeito que a água, presente nos solos aquando da sua compactação, tem no desempenho dos aterros com eles construídos.

Para a avaliação e realização desta pesquisa elaborou-se previamente um plano de trabalhos com o propósito de ajustar a dimensão do estudo ao tempo definido para a sua execução, no Plano de Estudos do curso de Mestrado em Engenharia Geológica. Assim, foi possível definir o número de amostras de solos a recolher, bem como definir o número de ensaios laboratoriais a realizar, tendo em conta os tempos associados à sua concretização.

O plano de trabalhos considera várias fases e tarefas a ter em conta e apresenta a seguinte ordem:

- Pesquisa e revisão bibliográfica;
- Recolha de amostras;
- Realização de ensaios laboratoriais:
 - Teor em água natural;
 - Análise granulométrica;
 - Limites de consistência;
 - Expansibilidade;
 - Compactação;
 - Corte direto;
- Utilização do software Geoslope para o cálculo de estabilidade de taludes;
- Organização e escrita da dissertação.

A estrutura adotada inicia-se com uma revisão de conteúdos associados à mecânica de solos.

Nesta revisão são desenvolvidos conteúdos sobre as características e propriedades dos solos, bem como o papel e o desempenho que a água tem no seu comportamento.

Do mesmo modo é feita uma breve abordagem à teoria de rotura dos solos.

Dedicou-se ainda um capítulo à descrição dos materiais e métodos empregues ao longo deste estudo. É descrito nesta divisão o enquadramento geográfico e geológico da amostragem dos solos, os ensaios laboratoriais efetuados, a sua importância e, por fim, uma referência à utilização do software do Geoslope para o cálculo de estabilidade de taludes.

A penúltima parte da dissertação tem como finalidade a apresentação e análise de resultados onde são igualmente expostos os valores resultantes dos ensaios e do cálculo de estabilidade realizados.

Por fim, o capítulo das considerações finais que integra as conclusões alcançadas com este trabalho de investigação. Nesta secção são descritos pontos relevantes que se conseguiram pela investigação realizada, bem como são apresentadas propostas futuras para novos trabalhos que possam surgir de forma a dar seguimento à investigação apresentada nesta dissertação.

3. Características e propriedades dos solos

3.1 Grandezas básicas

Os solos definem-se como um conjunto de materiais que incluem três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é um conjunto de partículas de diversos calibres e composições mineralógicas. A fase líquida e a fase gasosa preenchem os espaços vazios do solo e são geralmente compostas por água e ar.

O solo é caracterizado por algumas grandezas como a porosidade, o grau de saturação, o teor em água, o índice de vazios e o peso específico aparente. Estas grandezas estão ilustradas na figura 1, e de acordo com Fernandes (2006), podem ser definidas como:

- A porosidade (n) - é a relação entre o volume de poros e o volume total da massa (exprime-se em %).
- O grau de saturação (S_r) - é a relação entre o volume de água e o volume de poros existentes (exprime-se em %).
- O teor em água (w) - é a relação entre a quantidade de água que existe num solo e a sua massa seca (exprime-se em %).
- Índice de vazios (e) - é a relação entre o volume de poros e o volume de partículas sólidas (exprime-se em %).
- O peso específico aparente (γ_d) - corresponde à massa do solo por unidade de volume (exprime-se em KN/m^3).

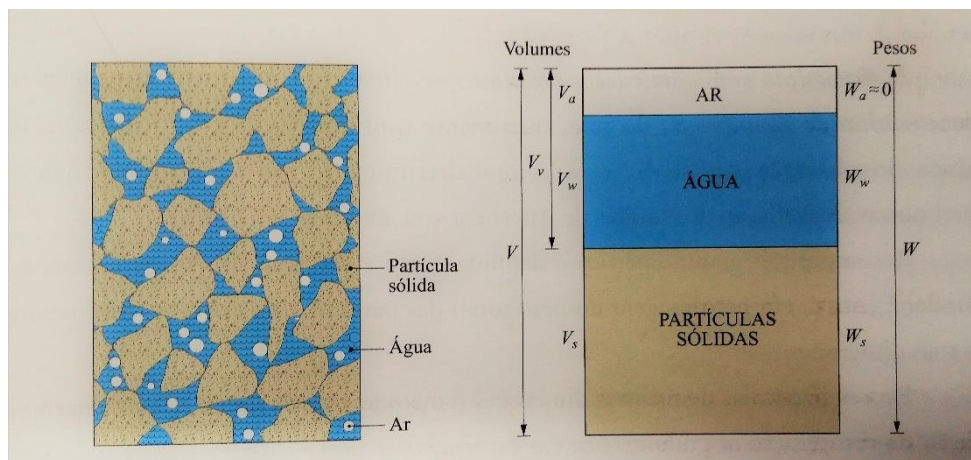


Figura 1 - Grandezas básicas dos solos (Fernandes, 2006).

3.2 Composição granulométrica.

Segundo o autor Fernandes (2006), a composição granulométrica é definida como a distribuição ponderada das partículas do solo de acordo com as suas dimensões. No caso de partículas de maiores dimensões o método convencional para determinar a composição é a peneiração, relativamente aos materiais de menores dimensões utiliza-se o método de sedimentação.

3.3 Limites de consistência

A utilidade dos limites de consistência prende-se com a necessidade de determinar o comportamento da fração mais fina de um solo nomeadamente a fração argilosa. Esta fração assume grande importância no comportamento de um solo sendo necessária a sua caracterização para a identificação e classificação do solo.

Um dos parâmetros que define a consistência do solo é a sua plasticidade. Esta plasticidade descreve a capacidade de um solo sofrer deformação sem se romper. O grau de plasticidade depende do conteúdo de partículas argilosas no solo, ou seja, da quantidade e tipo de minerais argilosos.

Quando o espaço vazio entre as partículas é preenchido por água, esta funciona como pressão negativa produzindo assim um grau de coesão entre as partículas permitindo que o solo seja moldado sem romper.

3.4 Composição mineralógica

A fase sólida de um solo é constituída pela fração mineral que geralmente corresponde à maior parte do solo, sendo a restante parte constituída por uma fração orgânica que em determinados solos pode atingir 30% da sua constituição.

Segundo Faria (2005), esta fração mineral é essencialmente constituída por minerais primários como o quartzo, feldspatos, piroxenas, anfíbolos entre outros e também por minerais secundários tais como minerais argilosos, óxidos, hidróxidos de Ferro e de Alumínio, carbonatos entre outros.

O comportamento da fração mineral depende da forma e tamanho das partículas que a constituem.

As partículas maiores apresentam uma superfície específica menor originado desta forma forças inter-partículas que são determinadas pela composição mineral, muito embora, estas forças sejam ultrapassadas pelas forças originadas pelo próprio peso.

A composição mineralógica da fração fina possui um papel muito importante no comportamento de um solo. Desta composição resultam forças que atuam no solo através de forças atrativas e repulsivas dependentes das cargas electrostáticas que certos minerais apresentam e que, deste modo, influenciam o desempenho do solo.

3.5 Água no solo

A água atua no solo sobre diversas formas, através das suas propriedades físicas dependendo do estado em que se apresenta (líquido, sólido e gasoso) e também das propriedades químicas (dissolução, hidratação ou hidrólise).

3.5.1 Influência do teor em água nas propriedades do solo

Os solos são materiais permeáveis, ou seja, a sua estrutura compreende a existência de poros interligados entre as partículas, o que permite a circulação de água livre.

A água presente no solo surge como um aspeto que é necessário ter em conta quando se determinam as suas características comportamentais.

Neste contexto da presença de água, as partículas de menores dimensões assumem maior protagonismo que as restantes presentes na composição do solo.

Do contacto da superfície das partículas com a água, resultam forças intermoleculares que influenciam as suas ligações e, conseqüentemente, as características da estrutura do solo. Sendo a superfície específica das partículas mais finas superior à superfície específica das partículas maiores, percebe-se a importância daquelas nas forças de ligação existentes na estrutura do solo.

Por outro lado, como a água pode conter sais ou moléculas com polaridade, no seu seio, existe predisposição (maior ou menor, dependendo dos elementos presentes na água) para o estabelecimento de ligações com as partículas do solo. Assim, o comportamento de um dado solo está fortemente condicionado pela quantidade e qualidade do seu fluido intersticial.

Todavia, as moléculas de água também integram a estrutura cristalina dos minerais, em particular dos minerais argilosos, cuja apetência para a adsorção promove a existência de trocas com o fluido que as rodeia.

3.5.2 Tensão neutra e tensão efetiva

Os solos podem ser compreendidos como sistemas complexos, daí a necessidade do estudo profundo do seu comportamento.

Um dos aspetos que condiciona o comportamento do solo é a tensão a que este está sujeito. A tensão total a que o solo está submetido decompõe-se em tensão efetiva e tensão neutra.

Segundo Folques (1987), a tensão neutra corresponde à tensão existente no fluido intersticial que não depende das partículas do solo. Ao passo que a tensão efetiva é a tensão que atua no “esqueleto” do solo.

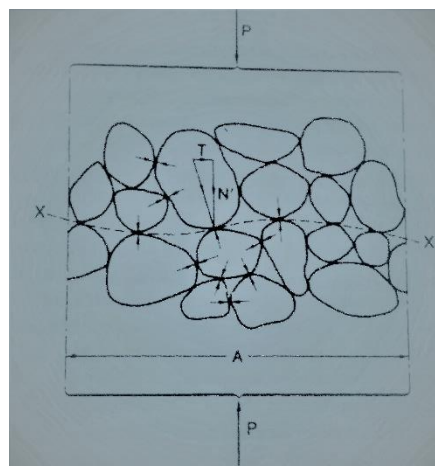


Figura 2 - Interpretação da tensão efetiva (CRAIG, 2007)

Dentro de um solo as forças que atuam no mesmo são muito aleatórias, tanto em magnitude como direção.

3.6 Resistência e mecânica dos solos

3.6.1 Nota prévia

As obras de terra bem como outras estruturas de engenharia civil induzem nos maciços terrosos estados de tensão que modificam, mais ou menos profundamente, o estado de tensão de repouso.

O estudo das propriedades de resistência dos solos revela-se como um importante capítulo e contem várias aplicações imediatas, como seja o cálculo de fundações, determinação da estabilidade de taludes, cálculo do impulso de terras, dimensionamento de pavimentos e previsão de assentamentos.

As resistências à deformação variam muito de solo para solo, e dependem do teor em água, baridade, estrutura interna do solo e modo de aplicação das tensões Pereira (1971).

Aquando da elaboração do projeto de uma estrutura, um de dois critérios pode ser utilizado no dimensionamento:

- A tensão de segurança à rotura (o estado de tensão resultante desta interação entre a estrutura e o maciço deverá ser tal, que impeça o colapso ou rotura do solo).
- A deformação causada no maciço com a instalação da estrutura, deverá ser tolerável pela própria estrutura.

Conforme Fernandes (2006), daqui resulta a necessidade do conhecimento e determinação dos valores de resistência e deformabilidade de um determinado maciço terroso.

Consoante Folques (1987), um dos núcleos problemáticos da mecânica dos solos é o binómio Consolidação-Resistência ao corte do solo. Dentro desta temática existem questões que estão relacionadas com as teorias de rotura, que são também complexas e envolvem um estudo profundo para o conhecimento das mesmas.

A caracterização da resistência de uma amostra permite conduzir à previsão dos estados de tensão que ocorrem num maciço e dão origem a uma rotura local ou pontual.

3.6.2 Rotura por cisalhamento

3.6.2.1 Teoria de rotura de Mohr-Coulomb

De acordo com CRAIG (2007), relativamente ao critério de Mohr-Coulomb, um solo entra em rotura num determinado ponto quando, a partir de um momento num par de planos que passam nesse ponto é atingida uma dada relação entre a componente normal (σ) e a componente tangencial (τ) como se verifica na seguinte expressão.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\phi$$

Em que ϕ representa o ângulo de atrito, c a coesão, σ a tensão vertical e τ a resistência ao corte.

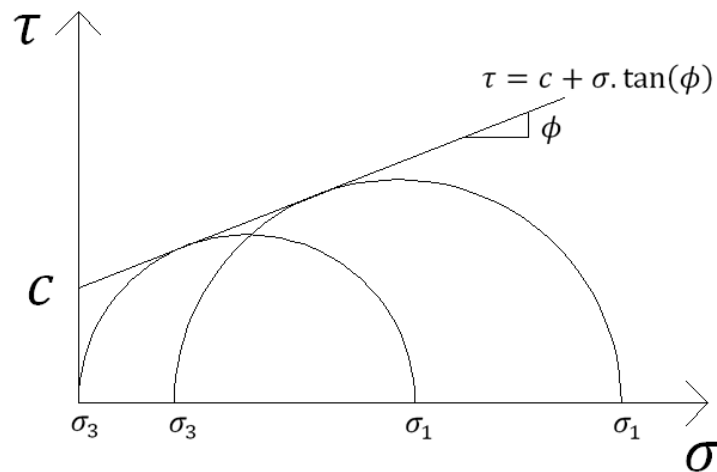


Figura 3 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb.

Todavia, esta teoria é unicamente baseada na estrutura interna de uma massa no interior da qual se desenvolvem mecanismos de atrito.

Contudo, os valores de resistência só podem ser dados pelo esqueleto das partículas sólidas do solo. Assim, é importante referir que a resistência ao cisalhamento é definida pela função da tensão normal efetiva (σ') e os parâmetros de resistência ao cisalhamento como coesão efetiva (c') e ângulo de atrito (ϕ').

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg}\phi'$$

Assim sendo, é necessário compreender que a (c') e o (ϕ') são constantes matemáticas que caracterizam a relação da resistência ao cisalhamento e a tensão normal efetiva.

Estes estados de tensão podem ser representados graficamente através do círculo de Mohr, como se representa na figura 3, onde é desenhada uma envoltória de rotura estando o campo de tensões representado abaixo dessa linha. Através desta linha é possível depois obter os valores de (c') e o (ϕ').

3.6.2.2 Resistência ao corte em areias

Em solos arenosos um dos parâmetros que comanda a sua resistência são as forças de atrito resultantes do contacto entre as partículas. A forma como as partículas estão distribuídas influencia a sua resistência, sendo esta tanto maior quanto maior for a sua compactidade.

Como se pode verificar na figura 4, existe uma grande diferença entre o comportamento do solo compactado e o do solo solto. Observa-se que a amostra compactada exibe acentuadas variações de volume ao longo do corte, o que não se verifica para a amostra de solo solto.

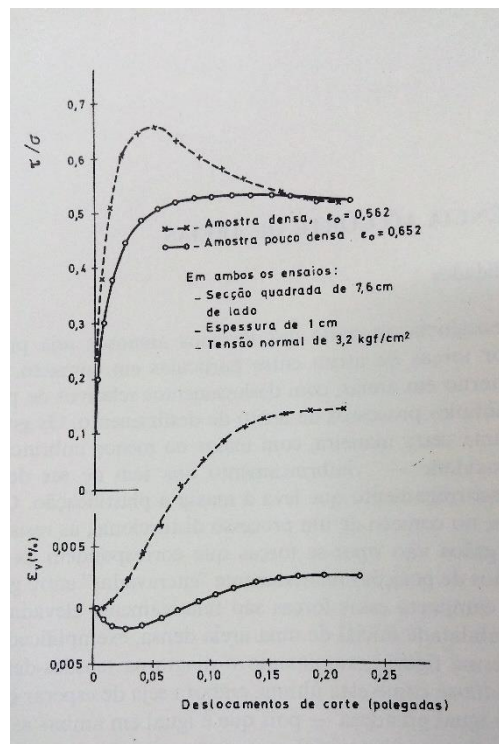


Figura 4 - Comportamento tensão-deformação de solos compactados e soltos (areias), (Folques, 1987).

Relativamente à tensão de corte segundo CRAIG (2007), é de prever que, o solo compactado apresente maiores valores diminuindo progressivamente após a tensão de pico, enquanto que no caso do solo solto a tensão é inferior e verifica-se uma estabilização dos valores de tensão ao longo do corte aumentando progressivamente até estabilizar.

O autor CRAIG (2007), refere que um dos fenómenos que interfere no comportamento das areias é a dilatância.

A dilatância define-se como o aumento do volume ao longo do corte de um solo arenoso compactado. Macroscopicamente o cisalhamento ocorre no sentido horizontal, mas o deslizamento acontece sobre diversos planos microscópios através do movimento das várias partículas umas sobre as outras.

Em relação ao material solto este fenómeno não é tao significativo pois as partículas não têm que “superar” tantos obstáculos em comparação com o que acontece no solo compactado.

Esta diferença de comportamento entre a amostra compactada e solta está diretamente relacionada com a granulometria e a compacidade.

Segundo Folques (1987), a influência da granulometria não se deve inteiramente ao diâmetro das partículas, mas sim à sua distribuição que apresenta repercussões no valor do ângulo de atrito.

Quando o solo é submetido a uma compactação é potenciado um certo “imbricamento” que influencia fortemente a resistência de pico, bem como a deformação transversal. Assim, a eficiência deste “imbricamento” ou “rugosidade” deve-se à distribuição granulométrica que, em certas proporções, resulta em elevados valores de resistência.

3.6.2.3 Resistência ao corte em argilas

Em solos argilosos a resistência ao corte apresenta diversas peculiaridades e complexidades. Relativamente a este tipo de solos existem muitos parâmetros que têm de ser abordados tais como: a estrutura do solo, composição do fluido intersticial, consolidação e a dilatância.

“Dentro de uma massa argilosa uma partícula ficará em equilíbrio a uma distância média das partículas de sua imediata vizinhança, tal que igualem o somatório de forças que atraem para as partículas vizinhas e o somatório de forças que delas repelem.

Se existir uma força exterior como a compactação e adensamento das partículas, verifica-se um aumento das forças atrativas.

Numa massa muito compacta é pequena a distância média entre as partículas, são grandes as forças atractivas e também as forças repulsivas; a igualdade entre as forças estabelece-se para um elevado nível ponderal; são grandes as forças intergranulares, são grandes as tensões efectivas” Folques (1987).

4. Materiais e métodos

As metodologias de ensaio e as amostras a usar no desenvolvimento deste estudo, bem como os documentos normativos associados à concretização dos objetivos propostos, obedeceram a uma escolha norteada pela prática de trabalho que se realiza no controlo da qualidade dos materiais utilizados na construção de aterros viários, em particular naquelas a que aos solos dizem respeito.

Assim, muito embora não importe a localização das amostras a colher, dado que não se pretende fazer um mapeamento, interessava colher amostras de solos que tivessem incluídas em algum empreendimento viário, pelo que se escolheram 3 amostras representativas de solos existentes no Lanço B da A26 (próximo de Santa Margarida do Sado), 1 amostra representativa de um solo existente no Lanço B da A15 (no Nó de Malaqueijo) e 1 amostra representativa de um solo existente no Lanço A da A8 (próximo de Alfeizerão). O enquadramento geográfico e geológico destas amostras apresenta-se no item seguinte.

Do mesmo modo, ao longo deste estudo teremos sempre presente as limitações impostas pelo CETO, às características dos solos e à sua aplicação na construção dos aterros. Mais à frente, apresenta-se também um resumo das regras patenteadas no CETO mais relevantes para este estudo.

Por fim, expõe-se ainda de modo mais detalhado, as metodologias de ensaio adotadas na determinação dos parâmetros característicos dos solos.

4.1 Enquadramento geográfico e geológico

A área de amostragem dos solos nomeadamente Z1, Z2 e Z3 localiza-se na nova estrada em construção, no lote que se inicia na interceção do IP1/A2 (Grândola) com direção a Figueira dos Cavaleiros. Este lanço tem uma extensão total de 18.550 Km tendo a recolha dos solos sido realizada na proximidade do Km 5.600.

Na figura 5, apresenta-se a localização da colheita das amostras Z1, Z2 e Z3, com recurso a duas imagens distintas.



Figura 5 - Localização da zona de amostragem dos solos Z1, Z2 e Z3, retirado de Google maps.

A escolha desta zona para amostragem deveu-se ao facto de possuir solos que estavam presentes e foram utilizados ao longo da construção da via referida. É de realçar que aquando da amostragem a estrada ainda não estava concluída, encontrando-se em fase final de construção, viabilizando assim a recolha das várias amostras.

Relativamente à geologia, esta área de amostragem desenvolve-se sobre materiais cenozoicos da Bacia do Sado que se encontram em discordância angular com a unidade de Gabros de idade Paleozoica. As litologias que predominam e se podem observar na imagem da figura 6, são as seguintes:

- Aluviões (Quaternário, Holocénico);
- Areias de dunas e de praias (Quaternário, Holocénico);
- Terraços fluviais e depósitos de vertente (Quaternário, Holocénico);
- Areias, arenitos e cascalheiras (Plio-Quaternário);
- Argilas, margas, calcários, areias e conglomerados (Terciário, Miocénico);

Relativamente às amostras Z1, Z2 e Z3, estas correspondem essencialmente materiais de terraços fluviais e depósitos de vertente (Quaternário, Holocénico).



Figura 6 – Excerto da Carta Geológica de Portugal Continental à escala original 1/200 000 com o traçado do lanço B (Nó de Grândola – Ferreira do Alentejo) in Projeto de execução Subconcessão Baixo Alentejo Lanço B: IP8 PE1-Terraplenagem.

As amostras Z4 e Z5 foram cedidas para este estudo pela Nova Estrada ACE, tendo sido recolhidas, respetivamente, junto ao Nó de Malaqueijo (no Lanço B da A15 – Caldas da Rainha / Santarém) e ao Km 7+125 do Lanço A da A8 – Caldas da Rainha / Leiria.

Na figura 7 apresenta-se um excerto do esboço corográfico da implantação das autoestradas A8 e A15 assinalando a vermelho a amostra Z4 e a azul a amostra Z5.

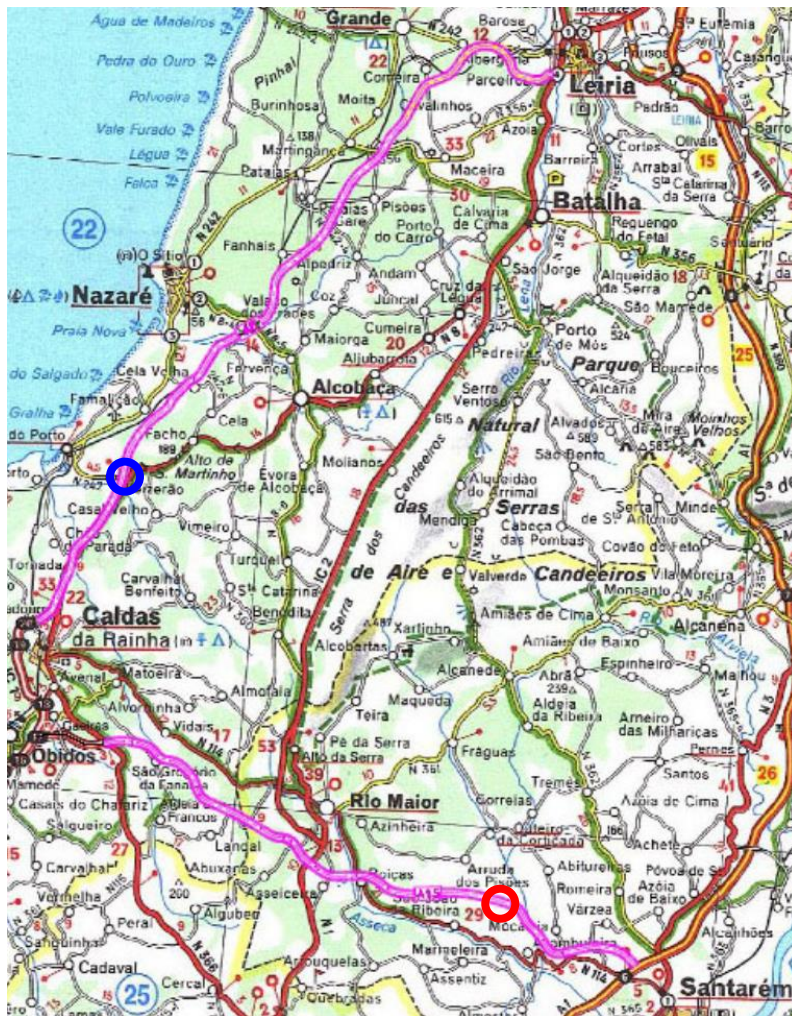


Figura 7 - Excerto do esboço corográfico com indicação do desenvolvimento dos traçados da A8 e A15, retirado dos projetos de execução da A8 e A15.

Sinalizado a cor de rosa identificam-se os traçados da A8 e A15.

O ambiente geológico em que se inserem os traçados da A8 e A15, é representado na figura 8, correspondente a um excerto da carta geológica à escala 1 / 1.000.000.

- a – Depósitos aluvionares
- a/Co – Depósitos alúvio-coluvionares
- Dv – Depósitos de vertente

QUATERNÁRIO:

- Depósitos de terraço fluvial (Q)

TERCIÁRIO:

- P - Pliocénico
- M - Miocénico

SECUNDÁRIO:

- Cretácico
 - C³ - Cretácico Médio
 - C¹⁻² - Cretácico Inferior
- - Jurássico
 - J³⁻⁴ - «Grés superiores»
 - J³_c - «Camadas de Alcobaça»
 - J¹_{ab} - «Margas e Calcários de Dagorda»

ROCHAS ERUPTIVAS:

- δ - Doleritos

4.2 Caderno de Encargos Tipo Obra

O CETO define as características que os solos devem ter para poderem ser utilizados na construção das diversas partes constituintes de um aterro. Assim, segundo aquele documento temos:

- Parte Inferior do Aterro (PIA)

Na Parte Inferior dos Aterros (PIA), devem, de preferência ser utilizados solos pouco sensíveis à água, pertencentes às classes S2, S3, S4 e S5 previstas no Quadro relativo às classes de fundação, que se apresenta na figura 9. Sempre que os aterros se localizem em zonas muito húmidas ou inundáveis, ou integrem camadas

drenantes, estas e/ou a PIA, devem ser construídas com materiais com menos de 5% passados no peneiro 0,074 mm (nº 200) ASTM;

- **Corpo do Aterro (CA)**

No Corpo dos aterros podem ser utilizados os solos de pior qualidade.

Não é permitida a utilização de materiais rochosos (enrocamento) para conclusão da construção de terraplenos, e é proibido o recurso a técnicas do tipo sandwich (utilização de materiais diferentes alternadamente e de forma contínua) de modo a poder garantir-se um comportamento uniforme e contínuo do aterro;

- **Parte Superior do Aterro (PSA)**

Na Parte Superior dos Aterros, numa espessura entre 40 a 85 cm, devem utilizar-se os solos com melhores características geotécnicas. De preferência, aqueles materiais devem satisfazer simultaneamente as classes S2, S3, S4 e S5, do Quadro relativo às classes de fundação, que se apresenta na figura 9, e aos grupos A-1, A-2 e A-3 da Classificação Rodoviária.

- **Leito do Pavimento**

Os materiais para camadas de leito do pavimento em solos, deverão ser constituídos por solos de boa qualidade, isentos de detritos, matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas, devendo obedecer às seguintes características:

- Dimensão máxima - 75 mm

- Percentagem de material que passa no peneiro nº 200 ASTM, máxima - 20%

- Limite de liquidez, máximo - 25%

- Índice de plasticidade, máximo - 6%

- Equivalente de areia, mínimo - 30%

- Valor de azul de metileno (material de dimensão inferior a 75 m), máximo - 2,0

- CBR a 95% de compactação relativa, e teor ótimo em água (Proctor Modificado),
mínimo - 10%

- Expansibilidade (ensaio CBR), máxima - 1,5%

- Percentagem de matéria orgânica - 0%

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

Figura 9 - Quadro de classificação de solos a ser utilizados em aterros (CETO da E.P, S.A).

Contudo, além de balizar os valores dos diversos parâmetros dos solos a usar, o CETO também define as condições de aplicação desses solos em camada de aterro. Uma destas exigências está relacionada com o teor em água do solo aquando da sua compactação, sendo este um tema relevante ao longo desta investigação. Para um solo ser compactado, constituindo uma camada de aterro, tem que cumprir um determinado intervalo do valor de teor em água (W_{nat}), intervalo esse que varia com a natureza dos solos:

- Solos incoerentes

$$0,8 W_{opm} \leq W_{nat} \leq 1,2 W_{opm}$$

- Solos coerentes

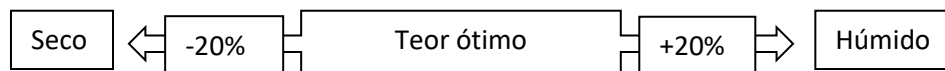
$$0,7 W_{opn} \leq W_{nat} \leq 1,4 W_{opn}$$

em que:

W_{opm} - teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Modificado

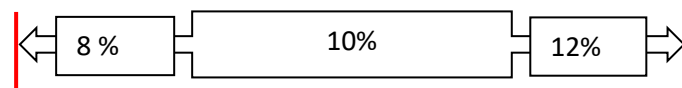
W_{opn} - teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Normal

Daqui resulta que o valor do teor em água com o qual o solo pode ser utilizado depende do teor ótimo obtido no ensaio de compactação. Os valores destes limites (sempre distanciados de 20% do valor do teor ótimo), variam consoante o tipo de solo. Deste modo, quanto mais elevado for o valor do teor ótimo, maior a amplitude terá a gama de valores de humidade aceitáveis para a compactação do solo.



Como exemplo podemos considerar a situação de um solo incoerente em que o teor ótimo em água tem um valor de 10%. Neste caso os limites de variação admitidos para o teor aquando da aplicação deste solo em camada seria o apresentado no esquema seguinte:

$W_{opm} = 10\%$



No caso deste exemplo, o solo em que o teor ótimo é de 10% determinado através do ensaio de compactação Proctor modificado, o teor em água que o solo pode ter na fase de compactação varia entre 8% e os 12%. Podemos verificar que estes valores limite permitem que, para este solo, a amplitude de variação seja de 4% (entre 8% e 12%).

Um dos motivos para serem utilizados estes valores muito próximos do teor ótimo está relacionado com a resistência dos materiais que estão associados diretamente com o grau de compactação. Ou seja, à luz do CETO, a resistência de um determinado solo estará ligada ao seu grau de compactação, sendo o valor de maior resistência correspondente ao maior valor de compactação, daí que se procure usar na execução das camadas de aterro,

tanto quanto possível, um valor mais próximo do teor ótimo de compactação obtido no ensaio laboratorial.

4.3 Amostragem

Tendo em conta o objetivo principal deste estudo, considerou-se importante recolher amostras representativas de solos associados a processos reais de construção de obras de terra. O processo de seleção de amostras foi feito com base na informação existente relativamente aos materiais disponíveis na zona de implantação das já realizadas autoestradas A 26, A8 e A15.

De acordo com as regras de boas práticas constantes nos procedimentos de amostragem, importava proceder à recolha das amostras após a remoção de alguma camada com resíduos orgânicos que pudesse existir. Importava ainda realizar a colheita de forma a que a amostra fosse representativa do solo ocorrente.

Na amostragem foram utilizados sacos de plástico, fio, pá e marcador. De cada tipo de solo, foi recolhida uma amostra com cerca de 150kg distribuídos em sacos com aproximadamente 20/25 kg cada um, como se pode verificar na figura seguinte (figura 10).



Figura 10 - Imagem representativa do processo de amostragem dos solos Z1, Z2 e Z3.

4.4 Preparação dos solos

Depois de colhidas, as amostras passam por uma fase de preparação e repartição, de modo a poderem ser utilizadas na realização dos diversos ensaios laboratoriais. Para o efeito, foi utilizada a Especificação LNEC E 195 – 1966 para a preparação por via seca das amostras com a finalidade da realização dos ensaios laboratoriais.

Na primeira fase do processo espalharam-se as amostras sobre uma manta de plástico com vista à secagem natural dos solos, tal como se pode observar na figura 11.



Figura 11 - Amostra Z1 em fase de secagem.

Após a secagem, procedeu-se ao destorroamento das amostras com o auxílio de um martelo de borracha. Este é um processo muito importante, na medida em que evita fenómenos de segregação e previne uma adequada repartição do solo (sem que as partículas finas fiquem aglutinadas às mais grosseiras).

Feito o destorroamento, procedeu-se à divisão das amostras em porções de cerca de 5Kg com recurso a um repartidor de dimensões adequadas. As subamostras obtidas por repartição foram guardadas em sacos de plástico.

Com o esquema seguinte (Figura 12), pretende-se exemplificar o processo de repartição.

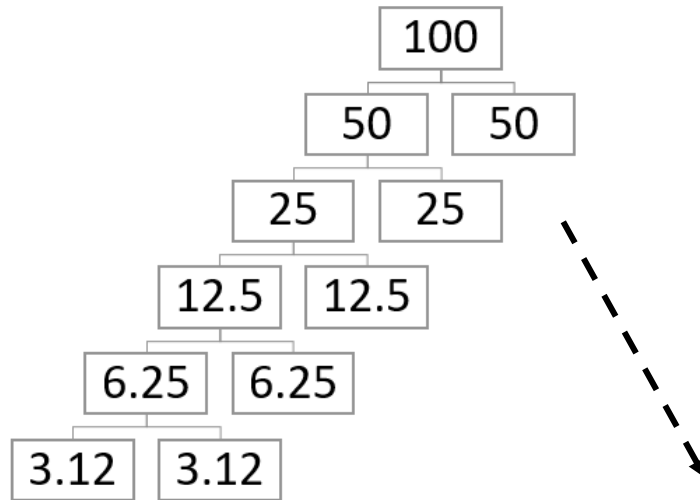


Figura 12 - Esquema ilustrativo da divisão por hierarquia.

Nesta atividade utilizaram-se várias bacias de plástico que acolheram temporariamente porções do solo na fase da repartição, como ilustra a figura 13.

A divisão foi feita sequencialmente desde o seu peso inicial, dividindo-se o solo até à obtenção de porções de amostra com aproximadamente 5Kg.



Figura 13 - Divisão do solo com auxílio de um repartidor

4.5 Ensaio de laboratório

4.5.1 Teor de água natural

A determinação do teor em água natural é importante nas situações em que se pretende antecipar o comportamento do solo nessas condições de humidade.

Muito embora essa não seja a situação prevalecente neste estudo, ainda assim essa determinação foi realizada segundo a norma NP-84 (1965). Seguindo o protocolo, retirou-se uma amostra dos solos recolhidos assim que as amostras chegaram ao laboratório e determinou-se o seu peso húmido com o auxílio de uma balança digital.

Colocou-se numa estufa a uma temperatura $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante um período de aproximadamente 24h. Após a secagem foi retirada da estufa e colocada num exsiccador com sílica-gel anidra e pesada após arrefecida. Na parte final efetuaram-se os respetivos cálculos.

Todavia, este ensaio apenas nos dá informação sobre o seu estado de humidade natural no momento da amostragem, dado que o resultado deste ensaio pode ser muito variável para o mesmo tipo de solo, uma vez que está dependente das condições meteorológicas a que o material esteve sujeito antes da sua amostragem.

4.5.2 Análise granulométrica

A realização deste ensaio de laboratório é necessária para determinar a distribuição granulométrica de um determinado solo, informação que permite compreender e prever o seu comportamento, face às solicitações que lhe serão impostas. Por si só, a distribuição granulométrica nada diz sobre a natureza mineralógica.

Um solo pode conter várias frações granulométricas na sua constituição, sendo a sua denominação definida com base nas proporções existentes de cada fração.

Segundo Faria (2005), relativamente à forma como as partículas de diferentes calibres se distribuem, o solo pode ser considerado bem graduado ou mal graduado. Um solo bem graduado apresenta todas as frações granulométricas entre a dimensão máxima e mínima

e um solo mal graduado pode ser de dois tipos, bem calibrado e mal calibrado. Bem calibrado é constituído praticamente apenas por uma fração granular. Mal calibrado é o caso dos solos que não possuem uma ou mais frações granulométricas.

Consoante Folques (1987), há duas grandezas notáveis que importa realçar na distribuição granulométrica de um solo, designadamente o coeficiente de curvatura e o coeficiente de uniformidade. O coeficiente de uniformidade ($C_u = D_{60}/D_{10}$) é um parâmetro que nos indica a maior ou menor extensão da granulometria das partículas presentes. Para o seu cálculo utiliza-se o diâmetro efetivo das partículas que representam 60% e 10% do peso total da amostra. Do mesmo modo o coeficiente de curvatura está relacionado com a forma da curva granulométrica, que pretende avaliar se a curva é equilibrada ou não. Para o seu cálculo com a expressão $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$, é necessário o diâmetro efetivo das partículas que equivalem a 10%, 30% e 60% do peso da amostra.

É de realçar a importância do diâmetro efetivo (D_{10}), do facto das partículas dos solos serem mais finas, representa uma superfície específica maior que condiciona as propriedades bem como o comportamento de um determinado solo.

4.5.2.1 Execução

Este ensaio foi realizado segundo a especificação do LNEC E-239 - 1970 - “Análise granulométrica por peneiração húmida”, tendo as amostras sido previamente preparadas de acordo com a especificação E 195 – 1966 – “Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação”.

O procedimento deste ensaio inclui as seguintes etapas:

- Secagem da amostra com auxílio de uma estufa a 105°C;
- Pesagem do solo com recurso a balança de precisão à grama;
- Mistura do solo com água para facilitar a desagregação;
- Peneiração: adiciona-se a mistura aos poucos no primeiro peneiro do conjunto apresentado e realiza-se a peneiração com ajuda de uma fonte de água, tendo sempre o cuidado de não colmatar nenhum dos peneiros. Na figura 14, pode observar-se a coluna de peneiros utilizada;

- Secagem do material retido em cada peneiro com recurso a estufa a 105°C, após a sua retirada dos peneiros e colocação em copos. Na figura 15 ilustra-se o conjunto de frações retidas nos diversos peneiros, após a realização da peneiração;

-Pesagem dos copos com as frações secas e realização dos cálculos para determinação da distribuição granulométrica;

<i>Peneiro</i>	
<i>ASTM</i>	(mm)
1 1/2"	38,1
1"	25,000
3/4	19,000
3/8	9,500
4	4,750
10	2,000
20	0,850
40	0,425
60	0,250
140	0,106
200	0,075




Figura 14 - Peneiros ASTM e respetivas dimensões.



Figura 15 - Frações granulométricas inseridas nos respetivos copos.

A apresentação de resultados é feita através de um gráfico com escala semilogarítmica sendo no eixo das abcissas (escala logarítmica) representada a dimensão das malhas dos peneiros e no eixo das ordenadas (escala decimal) representados os valores das percentagens acumuladas passadas, em peso de cada fração.

4.5.3 Limites de consistência ou de Atterberg

O teor em água exibido por um dado solo é um elemento essencial a ter em conta na avaliação e previsão seu comportamento. A variação deste parâmetro faz variar outras características do solo.

A consistência (ou estado de consistência) de um solo depende do seu teor de água e constitui, por si só, um indicador do seu comportamento reológico.

Os solos finos, em que a fração argilosa assume proporções importantes, exibem um comportamento altamente dependente do teor em água, enquanto que para os solos grosseiros este parâmetro tem menor importância. A argila é, com efeito, a fração ativa do solo e da sua composição quantitativa e qualitativa depende em grande parte o comportamento deste (Pereira, 1971).

Podemos definir os três limites de Atterberg como sendo os (ou correspondendo aos) teores de água que visam limitar dois estados de consistência distintos. Os estados físicos dos solos correspondem a diferentes comportamentos daí a necessidade de definir uma fronteira entre os vários estados, de forma a separar os comportamentos correspondentes. Atterberg definiu três limites (ou “fronteiras”) sendo eles os seguintes: limite de retração, limite plasticidade e o limite de liquidez.

Segundo Folques, estes limites não são “pontuais”, mas sim uma faixa de passagem em que para alguns solos este intervalo pode ser relativamente mais elevado.

Os limites foram definidos consoante o comportamento do solo, deste modo segundo (Pereira, 1971), o Limite de retração (LR) é o teor em água que estabelece a transição entre o comportamento semi-sólido e sólido. O limite de plasticidade (LP) corresponde ao ponto de passagem do comportamento semi-sólido para plástico e por fim o limite de liquidez (LL) é a transição do comportamento de plástico para líquido.

Na figura 16, apresenta-se um esquema ilustrativo sobre os limites de consistência.

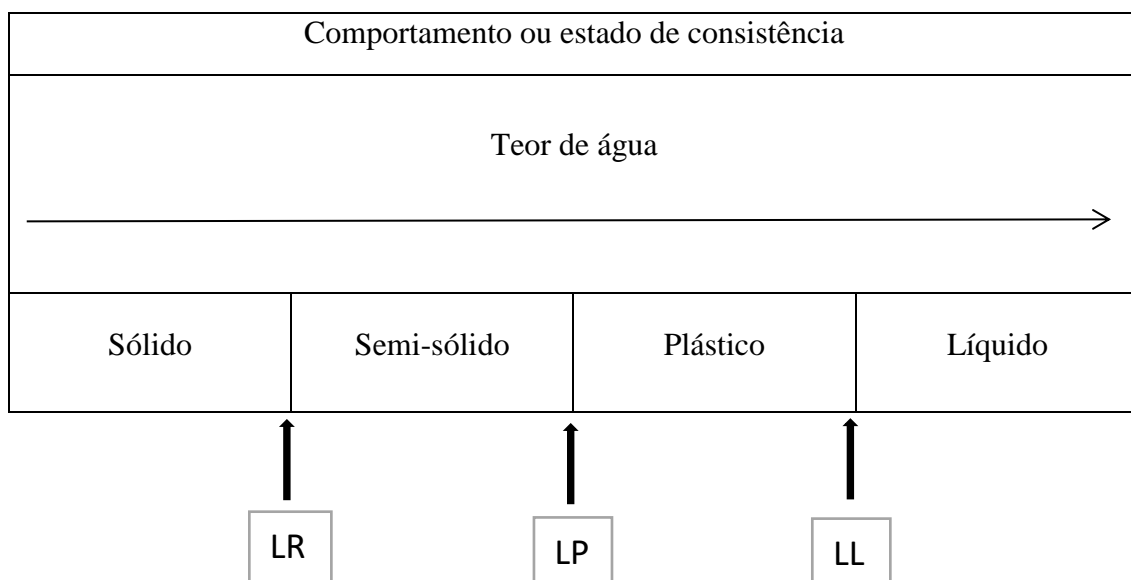


Figura 16 – Representação da consistência dos solos e os seus limites, adaptado de Faria (2005).

Associado a estes limites de consistência importa igualmente considerar um índice que é função dos limites de liquidez e plasticidade. Trata-se do índice de plasticidade (IP) que representa o intervalo de entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) e corresponde à diferença entre LL e LP. Este índice é um elemento fundamental, necessário à classificação dos solos segundo as classificações normalmente usadas para propósitos de engenharia.

Considerando somente este índice, segundo Jenkis (1988), os solos podem classificar-se como referido na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de solos segundo o índice de plasticidade.

Classificação	Índice de plasticidade (%)
Não plástico	IP= 0
Pouco plástico	$1 < IP < 7$
Mediamente plástico	$7 < IP < 15$
Muito plástico	IP > 15

Segundo Faria (2005), é de salientar que todas as classificações de solos mais utilizadas, nomeadamente a classificação para fins rodoviários, a classificação unificada e a classificação GTR, têm como pilar os valores dos limites de Atterberg.

Os limites de consistência dividem-se em três ensaios, o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o limite de retração, sendo realizados apenas os dois primeiros por serem apenas estes os usados em obras de terra, e como tal, na investigação realizada neste trabalho.

Para a realização deste ensaio considerou-se a norma portuguesa NP-143 1969 “Determinação dos limites de consistência”.

4.5.3.1 Limite de liquidez

Este parâmetro é obtido através do ensaio com a concha de Casagrande. Atualmente já existe outro método de obtenção deste limite, com utilização do cone penetrométrico, método que será mais à frente referido.

Inicia-se a preparação dos solos, obtendo-se uma subamostra 100g de solo passado no peneiro n° 40 ASTM que posteriormente é envolvida com um pouco de água, misturando até se obter uma massa uniforme.

Depois de misturado é aconselhável deixar o solo no mínimo em repouso 24h por forma a que as partículas tenham todas elas oportunidade de “contacto” com as moléculas de água. Este tempo de espera é particularmente importante quando o solo contém minerais argilosos, especialmente se esses minerais argilosos forem muito expansivos, como é o caso da montmorilonite.

Para iniciar o ensaio coloca-se uma porção do solo humedecido na concha e espalha-se de modo a obter uma camada superiormente plana e que no centro tenha 1 cm de altura. Traça-se uma linha longitudinal com um riscador adequado a meio da superfície de forma a criar um sulco.

Na figura 17, apresentam-se duas imagens da concha de Casagrande, tendo uma delas o solo já colocado e marcado pelo riscador, para dar início ao ensaio.

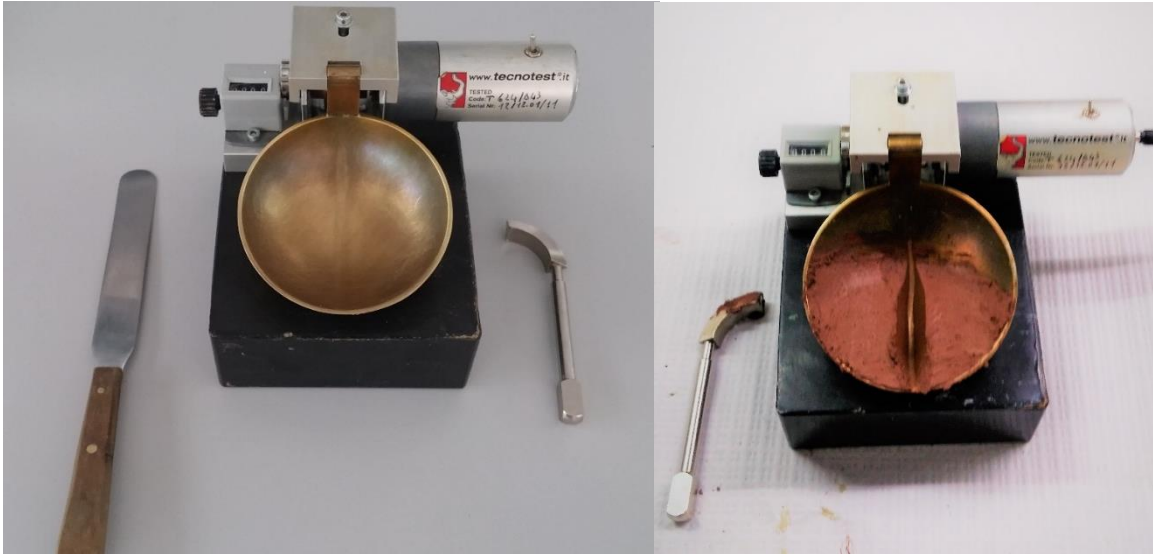


Figura 17 - Concha de Casagrande.

Inicia-se o ensaio aplicando-se uma sequência de golpes numa cadência certa, registrando-se o número de golpes necessários para fechar o sulco acima referido, numa extensão de 1 cm. Retira-se então uma porção do solo na zona do sulco e com ele determina-se o teor em água. Repete-se este processo após fazer variar (aumentar ou diminuir) a humidade do solo.

A repetição do procedimento acontece até que se consigam obter 4 pontos com o número de golpes entre os 10 e 40 golpes. Com os valores obtidos pode então definir-se uma reta de melhor ajuste e determina-se o valor do teor de água correspondente a 25 golpes, valor esse que corresponde ao limite de liquidez.

Os dados obtidos são então projetados num gráfico em que nas abcissas, em escala logarítmica se colocam os valores do número de golpes determinado para cada ponto do ensaio e em ordenadas os valores dos teores em água correspondentes.

Na figura 18, apresenta-se um exemplo de um gráfico deste tipo.

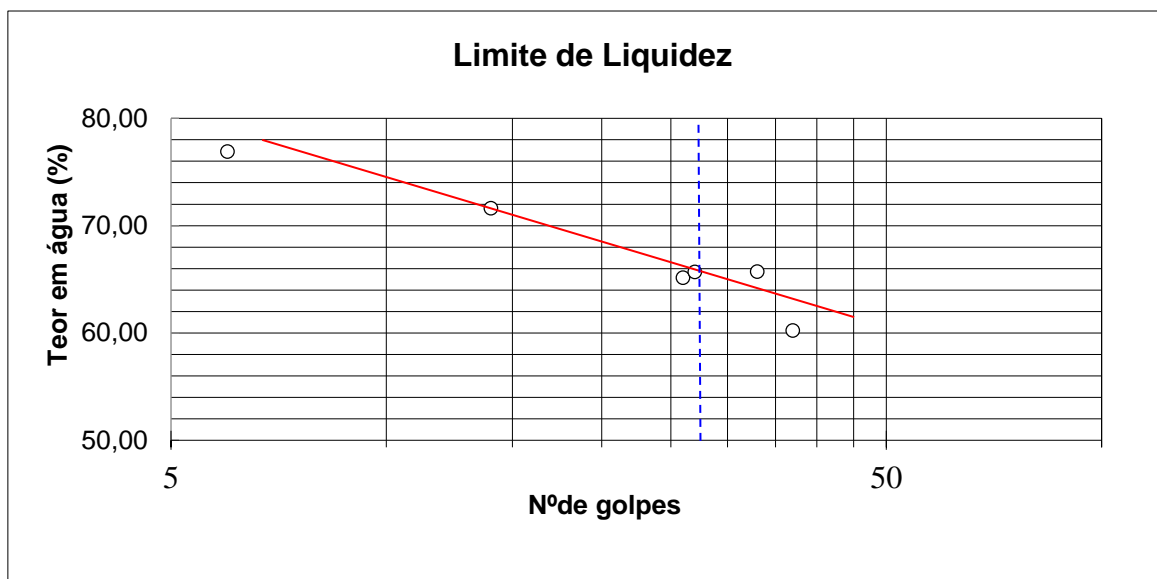


Figura 18 - Exemplo de um gráfico demonstrativo do resultado do limite de liquidez pelo método de concha de Casagrande.

4.5.3.2 Limite de liquidez pelo Cone penetrométrico

A realização deste ensaio tem vindo a ser usado como método alternativo ao método da concha de Casagrande para a determinação do valor de LL. A norma utilizada para o efeito é a ISO/TS 17892-12:2004 (E).

O primeiro passo na execução deste ensaio corresponde à preparação do solo, pelo mesmo processo anteriormente descrito para o limite de liquidez da Concha de Casagrande.

Com o solo humedecido e o equipamento montado inicia-se o ensaio. O solo é colocado num copo próprio para o ensaio, enchendo-o, tentando garantir que não existam vazios, analisando no fim a parte superior do solo. Coloca-se o copo no equipamento de modo a que a superfície do solo fique justa à parte inferior do cone. Ajustado o cone, faz-se uma leitura inicial do ponteiro (l_0). Com a máquina programada para deixar o cone penetrar até cinco segundos começa-se o ensaio soltando o cone, ao fim destes cinco segundos é feita uma segunda leitura (l_1) e calcula-se a diferença entre os valores obtidos.

Limpa-se o copo e executa-se novamente o mesmo procedimento até que se obtenham dois valores com diferença inferior a 0,5 mm, aceitando-se a média desses valores e determina-se o teor em água desse ponto.

Este processo é posteriormente repetido para os diversos teores em água, preferencialmente dois pontos abaixo e dois pontos acima dos 20mm de penetração. Com estes valores é traçada uma reta de melhor ajuste, onde se obtém o valor correspondente ao valor de limite de liquidez. No gráfico da figura 19 é possível ver a reta traçada a servir de exemplo, assim como valor de LL correspondente a 20mm de penetração.

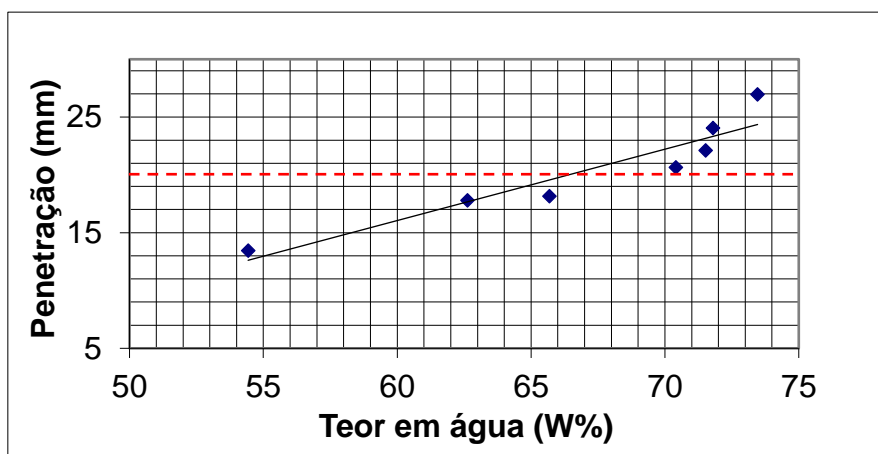


Figura 19 – Gráfico representativo do valor de penetração do cone em função do teor em água.

4.5.3.3 Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade é o valor mais simples de obter pois não necessita de aparelhos, mas apenas de um operador, um vidro e respetivo equipamento para obter o teor em água.

Inicia-se com a preparação do solo com a mesma metodologia utilizada no limite de liquidez.

Com o solo humedecido, efetua-se uma pequena esfera com as mãos. De seguida faz-se rebolar esta esfera sobre uma placa de vidro até obter um cilindro com cerca de 3mm de diâmetro, geometria com que deve fissurar o cilindro, caso tenha a humidade correspondente ao Limite de plasticidade.

Quando o solo sofre rotura determina-se o teor em água correspondente a esse ponto. Repete-se o mesmo processo até atingirmos 4 a 6 pontos e calcula-se a média dos teores em água, a qual corresponderá ao limite de plasticidade.

4.5.4 Expansibilidade

Este ensaio tem como objetivo avaliar a variação volumétrica da fração fina de um determinado solo em contacto com a água, nas condições de compactação e acondicionamento definidas na norma regulamentar que o rege.

Este fenómeno da expansão do solo acontece de forma mais exuberante quando este possui na sua constituição minerais argilosos expansivos que adsorvem a água na sua estrutura cristalina aumentando, desta forma, o seu volume e, conseqüentemente, o volume ocupado pelo solo que integram.

Todavia, se o solo possuir espaços vazios a variação volumétrica (ou parte dela), será acomodada nos espaços vazios existentes, situação que se reflete no valor da expansão do solo, minorando-a. Quando estes espaços não ocorrem, ou são diminutos, o solo aumenta o seu volume de modo mais significativo.

4.5.4.1 Execução

A realização do ensaio decorreu de acordo com a especificação do LNEC E 200 – 1967 “Ensaio de expansibilidade”. A variação de volume do provete de ensaio decorre da ascensão capilar de água através do provete, situação que faz com que a água fique disponível para interagir com as partículas minerais constantes do solo. De acordo com a norma referida, para a preparação do provete de ensaio utiliza-se uma porção de aproximadamente 100g da fração do solo composto pelas partículas de calibre inferior a 0,425 mm (correspondente ao material passado no peneiro n°40 ASTM).

É feita a secagem da subamostra numa estufa a 105°C durante um período mínimo de 16 horas. Posteriormente, com o equipamento montado, tal como se pode observar na figura 20, realiza-se a compactação do solo em duas camadas iguais com o auxílio de um pilão de compactação, com o qual se efetuam 50 pancadas por camada.

Depois, rasa-se o provete compactado, limpa-se o solo eventualmente caído na base do equipamento e coloca-se o equipamento num recipiente em que se adiciona água destilada até à altura da base do provete, momento em que se dá início ao ensaio (Figura 20).



Figura 20 - Fotografia do expansímetro.

O ensaio começa assim que a água destilada toca o provete, momento em que se inicia uma sequência de leituras do valor exibido pelo defletómetro, em tempos previamente definidos conforme a norma. O ensaio dá-se por concluído quando não se verificar alteração do valor lido num espaço de 2 horas entre leituras consecutivas.

O cálculo do valor da expansibilidade apresenta-se em percentagem e é feito através da seguinte equação:

$$\frac{(L1-L0)}{H} \times 100, \text{ em que:}$$

L0 = Leitura inicial do defletómetro

L1 = Leitura final do defletómetro

H = Altura do solo inicial (corresponde à altura do molde)

4.5.5 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação de um solo tem como objetivo a determinação da baridade seca máxima (peso volúmico máximo seco), que este pode atingir quando sujeito à aplicação de determinada energia de compactação, bem como do teor ótimo em água do solo com que essa baridade máxima é conseguida.

A compactação constitui um método mecânico de tratamento do solo, no sentido de promover a melhoria das suas competências físicas e mecânicas, como é o caso da capacidade de carga que pode aumentar significativamente em consequência deste aumento de baridade.

A compactação permite igualmente aumentar as características de resistência ao corte dos solos (quer a coesão quer o ângulo de atrito interno) e diminuir a sua deformabilidade.

Uma das principais aplicações deste método, consiste na sua utilização para a obtenção de um valor padrão laboratorial, que possibilite a realização de um controlo de compactação de solos aplicados em camadas de aterro, realizadas com o solo estudado laboratorialmente Faria (2005).

Esta compactação resulta da aplicação de uma energia normalizada a diversos provetes de solo humedecidos com diferentes teores em água entre si. Na tabela 2 resumem-se as tipologias de compactação previstas na norma referida.

Tabela 2 - Tipos de compactação Proctor.

Tipo	Molde	Nº de golpes	Nº de camadas
Leve	Pequeno	25	3
Leve	Grande	55	3
Pesada	Pequeno	25	5
Pesada	Grande	55	5

O procedimento deste ensaio contempla dois tipos de compactação: leve e pesada. Cada um destes corresponde a um nível de intensidade de compactação.

A escolha do molde a usar em cada caso, depende da distribuição granulométrica do solo a compactar.

Na figura 21 está representado o gráfico da diferença do peso volúmico seco (baridade seca) para dois tipos de energia de compactação distintas. Este gráfico, apresenta ainda informação sobre como a orientação das partículas que pode variar em função da energia de compactação aplicada e do teor em água que o solo possui.

Dado que a realização deste ensaio possibilita a obtenção de elementos padrão característicos do solo, que permitirão avaliar o grau de compactação existente em obra pela aplicação e compactação de uma camada constituída por esse solo. A escolha da energia de compactação a usar em laboratório está depende do tipo de energia a aplicar em obra.

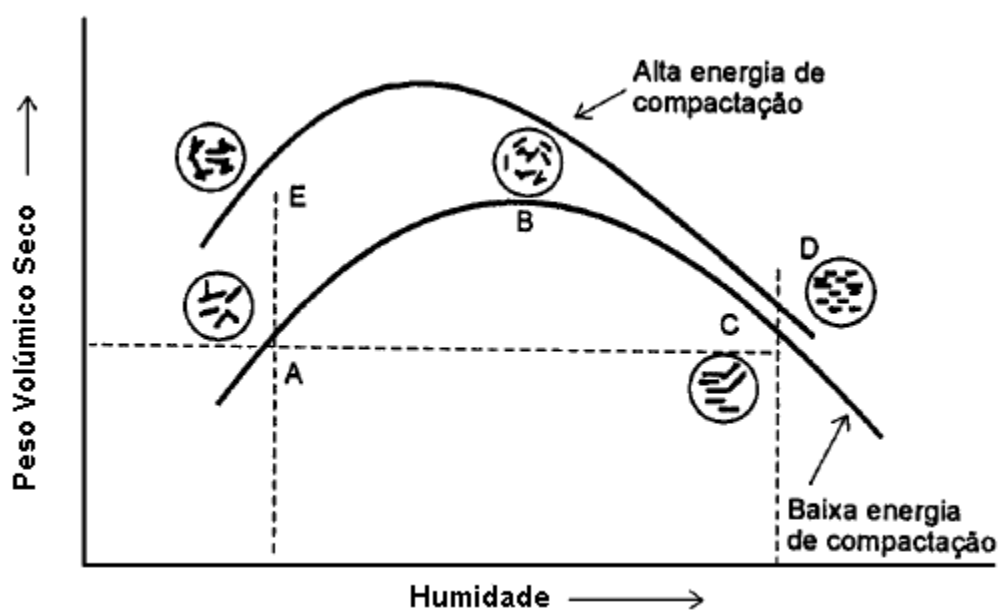


Figura 21 - Teoria de Lambe Ribeiro (2008).

4.5.5.1 Execução

O ensaio realizou-se segundo a especificação E 197 – 1966 LNEC (E197, 1966) – “Ensaio de Compactação”. No caso desta investigação, interessava utilizar energia de compactação pesada, simulando assim a compactação efetuada na construção de aterros em obras rodoviárias e/ou ferroviárias, utilizando o molde grande por conveniência, muito embora a granularidade dos solos permitisse a utilização de molde pequeno.

O primeiro passo é calcular o volume e o peso do molde a ser utilizado. Com o solo previamente repartido em provetes de cerca de 5 kg, procedeu-se ao humedecimento de cada provete de modo a que tenham diferentes teores em água.

Assim, para cada amostra, utilizaram-se cerca de cinco provetes de solo (5Kg cada) com teores em água diferentes, no sentido de se conseguir pelo menos dois pontos abaixo e dois pontos acima do teor ótimo de compactação.

Na figura 22 pode observar-se uma imagem do solo em fase de humedecimento.



Figura 22 – Imagem do solo humedecido.

Na compactação de cada provete, o solo previamente humedecido é dividido em cinco porções idênticas. Insere-se uma porção do solo no molde e procede-se à compactação com o equipamento de compactação Proctor, programado para a aplicação de energia pesada (que corresponde a 55 pancadas com martelo pesado). Em seguida adiciona-se outra porção de solo e repete-se o processo de compactação, e assim sucessivamente, até que a última camada esteja compactada. Por fim, retira-se o molde do equipamento, a alonga e nivela-se o solo até obter uma superfície plana. Determina-se o peso do molde com o solo e em seguida colhe-se um pouco do solo do provete para determinar o seu teor em água.

Na figura 23, podem observar-se duas imagens, uma do equipamento de compactação usado, e outra do molde com o solo já compactado.

Posteriormente, repete-se o ensaio para os restantes provetes previamente humedecidos. Para terminar, projetam-se num gráfico de baridade seca versus teor em água, os resultados obtidos para cada provete compactado. Ao valor da baridade máxima teórica determinada, corresponde o valor do teor ótimo em água.



Figura 23 - Fotografia da máquina de compactação e o respetivo molde grande com o solo compactado.

4.5.6 Ensaio de resistência ao corte direto

Consoante Pereira (1971), o estudo das propriedades de resistência dos solos é um tema de grande importância na mecânica de solos, com especial relevo para o estudo ou dimensionamento e projeto de fundações, estabilidade de taludes, impulso de terras, dimensionamento de pavimentos e a previsão de assentamentos.

Caso as solicitações impostas ao solo superem a sua capacidade resistente, a rotura do maciço instala-se. Na figura 24 podem observar-se alguns exemplos esquemáticos de roturas.

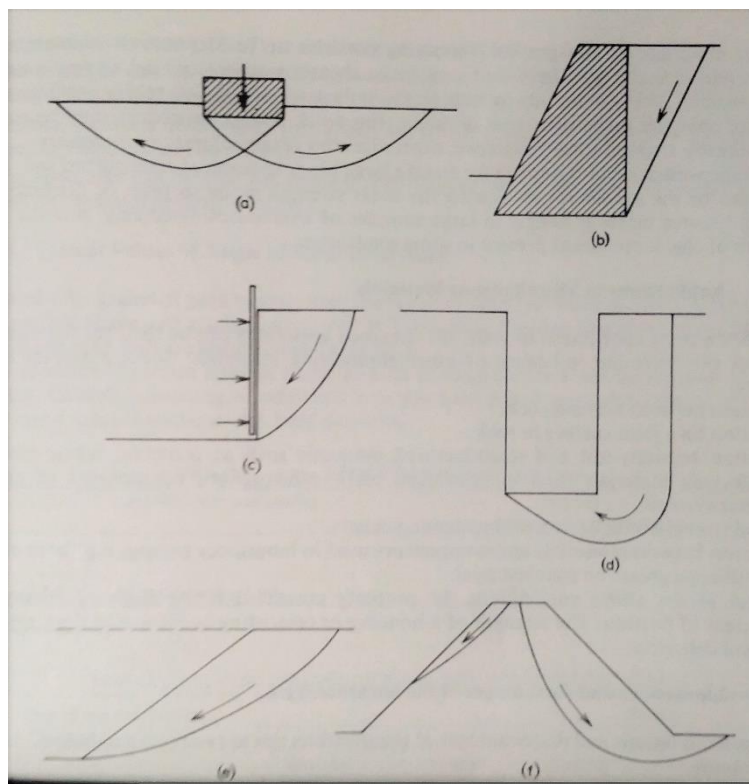


Figura 24 - Exemplos simplificados de roturas em materiais terrosos, (K H HEAD, 1992).

Um dos métodos para a determinação dos parâmetros característicos da resistência ao corte de um solo, é o ensaio de corte direto.

Este ensaio permite a determinação dos parâmetros de resistência ao corte, coesão e ângulo de atrito, pelo conhecimento das relações entre as tensões aplicadas no plano de rotura, utilizando o critério de rotura de Coulomb, Faria (2005).

O equipamento usado para a realização deste ensaio, vulgarmente chamado de máquina de corte, consiste essencialmente num aparelho que impõe o estabelecimento de um plano

de corte num provete, sujeito a determinada tensão vertical. Permite determinar a resistência de um solo ao corte num determinado plano e sentido impostos.

Este aparelho permite a obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito da resistência pico, bem como a resistência residual do solo e a resistência do corte reversivo.

Dito de outro modo, neste ensaio existem três vertentes que podem ser analisadas:

- A resistência ao corte direto (CD) é o principal objeto deste ensaio. Esta resistência denominada também por tensão de pico, é o valor pelo qual o solo sofre a rotura.
- A resistência residual (CDR) corresponde aos valores de resistência estabilizados, medidos após a rotura do solo.
- A resistência do corte reversivo (CR), é a resistência de pico medida quando o ensaio é realizado no sentido contrário ao corte direto.

Para a realização do dito ensaio é necessário definir dois parâmetros. Um dos parâmetros é a condição no qual o corte se realizará, podendo este ser realizado segundo uma das várias situações:

- Consolidado, drenado;
- Consolidado, não drenado;
- Não Consolidado, não drenado;

Outro dos parâmetros é a tensão vertical, sendo que em cada um dos três provetes é aplicada uma determinada tensão diferente. As tensões verticais aplicadas neste estudo são as seguintes: 9.80 N/cm^2 , 19.61 N/cm^2 e 29.42 N/cm^2 .

Para além dos aspetos referidos anteriormente, é necessário definir a velocidade de ensaio. As velocidades podem corresponder a ensaio rápido ou ensaio lento. A escolha do valor da velocidade depende do solo em questão e do objetivo do ensaio.

É necessário estabelecer uma estimativa da deformação provável para definirmos uma velocidade do ensaio. Num ensaio rápido, a velocidade deve induzir o corte num período de 5 min a 10 min enquanto que, para um ensaio lento o estabelecimento do corte poderá durar horas. Relativamente a duração do ensaio, esta dependente naturalmente da velocidade e da extensão horizontal.

Na figura 25, pode observar-se uma imagem da máquina de corte usada (WYKEHAM FARRANCE ENG.LTD).



Figura 25 - Fotografia da máquina de corte.

4.5.6.1 Execução

Este ensaio foi realizado segundo a norma britânica BS-1377, com introdução de algumas adaptações. Com o intuito de avaliar a variação da resistência ao corte dos solos, simulando uma situação de aterro rodoviário ou ferroviário, os provetes usados no ensaio de corte, contrariamente ao previsto na norma referida, foram extraídos de um provete previamente compactado em molde grande do ensaio de Proctor, com energia pesada. A velocidade estabelecida para o ensaio foi de 1mm/min com uma extensão horizontal de 14 mm, que resulta numa duração total do ensaio de 14 min.

Com o solo compactado realizou-se a extração dos provetes para o corte, com a ajuda de um amostrador e de um macaco hidráulico (Figura 26).

Em seguida, o provete assim extraído é colocado na caixa de corte e submetido à tensão vertical para ele definida, aguardando a diminuição da deformação vertical até se verificar a sua estabilização. Abaixo, na figura 26, estão ilustrados alguns dos passos de montagem do provete para a realização do ensaio.



Figura 26 - Processo de extração do provete do solo compactado para o ensaio de corte direto.

Após extração, o provete de solo compactado é colocado numa caixa de base quadrada, que se encontra dividida em duas metades iguais. Na figura 27, pode ver-se uma imagem da caixa de corte com o provete colocado.

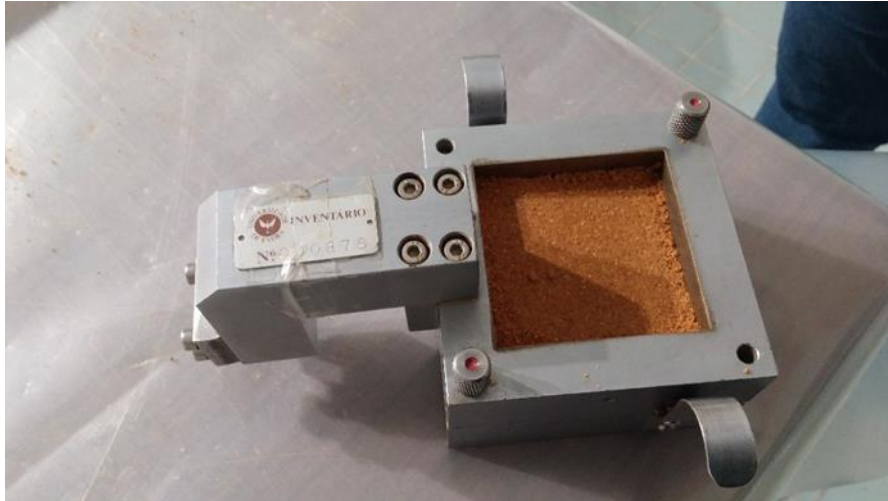


Figura 27 - Solo compactado na caixa da máquina de corte direto.

O provete compactado, previamente colocado na caixa de corte, é então submetido a uma força vertical mantendo-se o equipamento em espera até que se atinja a estabilização da deformação vertical devida à aplicação da referida força vertical. Depois, é aplicada uma força horizontal a velocidade constante até que se atinja o corte do solo segundo uma superfície definida, a qual corresponde ao plano de separação da caixa de corte.

Esta operação repete-se pelo menos mais duas vezes para outros tantos provetes obtidos exatamente do mesmo modo, mas submetidos a uma tensão vertical diferente.

Após a realização dos três cortes, projetam-se as leituras efetuadas num gráfico de tensão de corte versus deformação horizontal. Na figura 28 apresenta-se o gráfico assim elaborado para a amostra Z1.

Neste exemplo obtiveram-se os valores para a resistência do corte direto nomeadamente a tensão de pico e também os valores da resistência residual do solo.

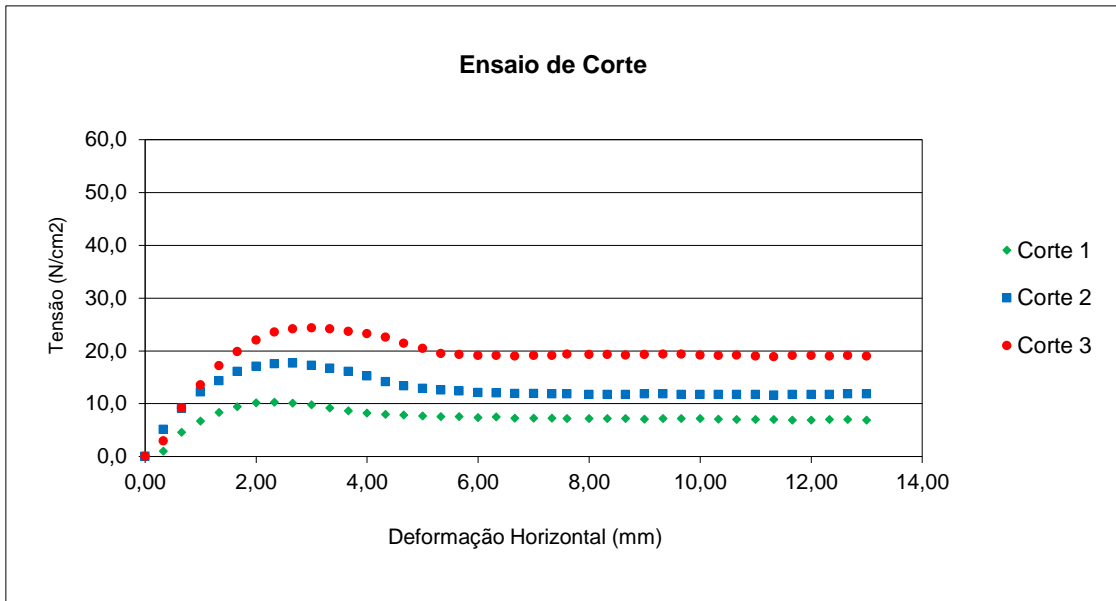


Figura 28 - Gráfico ilustrativo da deformação horizontal e a tensão de corte.

Com base na informação do gráfico do tipo do acima apresentado, é então determinado o valor da tensão de rotura exibido por cada curva e projetado um novo gráfico da tensão de corte versus tensão vertical, como se exemplifica na figura 29.

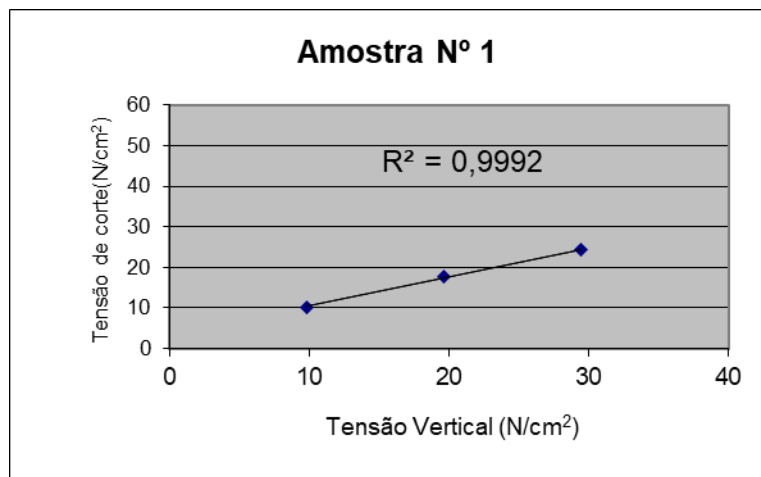


Figura 29 - Gráfico da tensão vertical em função da tensão de corte.

Segundo o critério de Mohr-Coulomb e com base nos dados constantes do gráfico, determina-se o ângulo de atrito interno e a coesão.

4.6 Geoslope

O programa Geoslope é um componente que integra um pacote completo de programas ligados à geotecnia produzidos pela Geostudio. Este programa apresenta como principal função o cálculo e a análise da estabilidade de taludes.

Dentro do programa existem dois tipos de análises possíveis, mais simples e uma para análise de problemas mais complexos. As análises mais simples estão direcionadas para casos mais comuns, enquanto que as complexas se enquadram em problemas mais particulares que envolvem mais fatores condicionantes desde a introdução de medidas de reforço como muros de suporte, pregagens, ancoragens, níveis piezométricos entre outras condicionantes. Dentro destas duas tipologias existem cinco componentes essenciais que se pode definir:

- Definição da Geometria de taludes, descrição da estratigrafia e a forma de potenciais superfícies de rotura;
- Resistência de solos: definição dos parâmetros e descrição da resistência dos materiais;
- Pressão intersticial da água: condições da pressão da água no solo;
- Medidas de reforço: pregagens, ancoragens, muros de contenção entre outras;
- Cargas: cargas pontuais, sobrecargas, simulação de sismos entre outros;

Escolhidos estes parâmetros o passo seguinte centra-se na definição das potenciais superfícies de rotura, no cálculo de estabilidade e determinação dos valores de fator de segurança associados.

Também alguns parâmetros característicos dos solos são necessários para o cálculo de estabilidade. Para definir o material são necessários três parâmetros nomeadamente os valores de coesão (KN/m^2), ângulo de atrito ($^\circ$) e baridade seca máxima (KN/m^3).

Para o desenvolvimento do cálculo de estabilidade, o programa oferece uma variedade de metodologias de análise, de entre os quais os métodos de Janbu, Spencer, Bishop, Morgenstern-Price e Fellenius.

4.6.1 Procedimento

Com o objetivo de analisar a competência dos solos estudados, utilizou-se este software para o cálculo da estabilidade de taludes para um conjunto de geometrias possíveis em taludes de aterro.

Como referido anteriormente, existem aspetos que importa definir para proceder ao cálculo. Um deles é a geometria do talude a ser definida, pelo que um dos primeiros passos foi consultar que tipos de geometria são geralmente adotados em projetos.

De modo geral os taludes de aterro são projetados com inclinação de 1:1,5 (V:H). Isto significa que por cada metro de altura na vertical (V), o talude terá uma base com comprimento horizontal (H) de um metro e meio.

Assim, atendendo a este facto considerou-se esta inclinação para aterros com altura de 10 e 20 metros. Para avaliar situações mais ousadas em aterros com estas alturas, considerou-se ainda variações de inclinação do talude. No total, estudaram-se seis geometrias diferentes para simular o talude de aterro a usar no cálculo de estabilidade segundo os métodos de cálculo considerados. Na tabela 3 resume-se a geometria dos taludes adotados.

Tabela 3 - Geometria dos taludes adotados.

Altura do aterro	10m			20m		
Inc.do Talude (V:H)	1:1,5	1:1	1:0,75	1:1,5	1:1	1:0,75

Com as geometrias propostas, importava definir os parâmetros dos solos a considerar nos cálculos, nomeadamente os valores de coesão, ângulo de atrito e a baridade seca máxima.

Atendendo a que neste trabalho se considera o estudo do comportamento dos solos em vias de comunicação, projetou-se ainda uma sobrecarga de forma a simular o tráfego rodoviário.

O programa de cálculo possui uma vasta gama de metodologias de análise para o cálculo de estabilidade, com obtenção do respetivo valor do fator de segurança. Dentro dos vários métodos disponíveis, optou-se pelos seguintes: Bishop, Janbu e Spencer.

5. Análise de resultados

Neste capítulo apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos em todos os ensaios de laboratório realizados, assim como os resultados referentes ao cálculo de estabilidade obtidos pelo Geoslope. Mais à frente neste documento, também é feita uma análise desta informação, tendo em conta os objetivos que a nortearam.

5.1 Ensaios laboratoriais

Ao longo da fase experimental deste trabalho de investigação, numa primeira etapa, foram realizados diversos ensaios laboratoriais, com vista à caracterização física e mecânica dos solos em estudo. Na etapa seguinte, foi efetuada uma avaliação da variação das características de resistência ao corte em função do teor em água exibido pelo solo compactado.

No sentido de permitir uma melhor perceção da extensão do trabalho laboratorial desenvolvido, apresenta-se na tabela 4 uma quantificação dos ensaios efetuados.

Tabela 4 - Síntese do número de ensaios laboratoriais realizados.

Amostra/Tipo de ensaio	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Total
Teor em água natural	1	1	1	-	-	3
Análise granulométrica	1	1	1	1	1	5
Limites de consistência	LL (concha)	1	1	1	1	5
	LL (cone)	1	1	1	1	5
	LP	1	1	1	1	5
Expansibilidade	1	1	1	1	1	5
Proctor modificado	6	7	6	6	6	31
Corte direto	18	21	18	18	18	93
Corte direto(Reversivo)	18	21	18	18	18	93

5.1.1 Teor em água natural

Como já foi referido anteriormente, importa registar que a determinação do teor em água do solo após colheita, se deveu essencialmente à necessidade de complementar a informação, dado que o objetivo principal associado a este estudo não tem por base o estado hídrico natural do solo. Esta situação é particularmente pertinente para o caso das amostras Z4 e Z5, que foram cedidas para este estudo e já haviam sido colhidas há algum tempo, tendo estado armazenadas em lugar próprio.

Deste modo, para estas duas amostras, não faria qualquer sentido a determinação do teor em água exibido pelo solo dado que estes já tinham sido destorroados e secos previamente.

Os resultados obtidos constam da tabela 5.

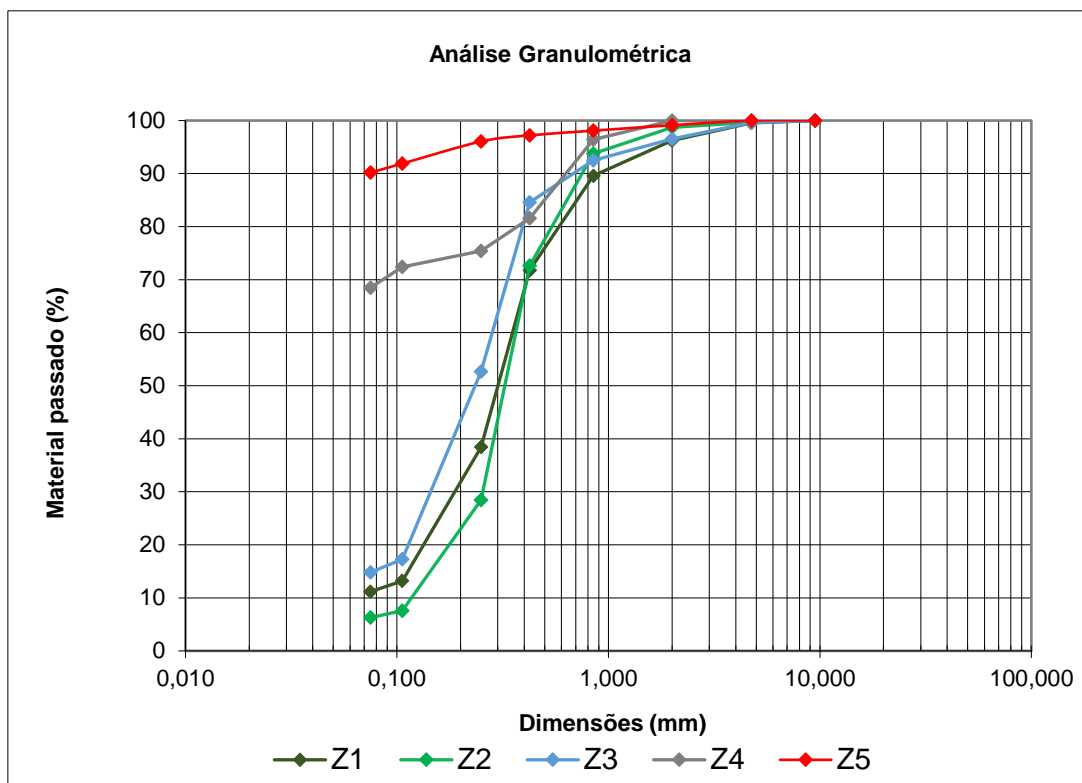
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de teor em água natural.

Nº DA AMOSTRA	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Teor em água (%)	5,49	2,14	2,74	-	-

5.1.2 Análise granulométrica

Tal como referido anteriormente no capítulo relativo a materiais e métodos, a análise granulométrica foi realizada segundo a especificação LNEC E-239 – 1970.

Os resultados obtidos pela realização deste ensaio foram representados graficamente, de modo a que melhor se compreendam as diferenças existentes nas curvas granulométricas dos diferentes solos ensaiados. Esse gráfico consta da figura 30.



Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
0,002	0,06	0,2	0,6	2,0	6,0	20,0	

Figura 30 - Curvas granulométricas das diversas amostras estudadas e a escala ABNT para a classificação dos solos.

Analisando o gráfico acima, verifica-se logo uma distinção entre dois conjuntos de amostras. As amostras Z4 e Z5 apresentam uma distribuição granulométrica bem diferente das restantes.

Pela escala ABNT, reproduzida abaixo do gráfico, pode-se classificar o solo de uma forma geral, relativamente à sua granularidade.

Atendendo às frações granulométricas, o solo Z1 e o solo Z2 enquadram-se num solo do tipo areia média e o solo Z3 comporta-se como uma areia fina a média.

Relativamente aos solos Z4 e Z5, mais de 68% das partículas (68,5% para o Z4 e 90,2%, para o Z5), constituintes do solo corresponde à fração silte/argila. Como não se realizou o ensaio de sedimentação, à semelhança do que se verifica na caracterização dos solos a

usar na construção de aterros de obras viárias, não podemos classificar segundo a escala acima ilustrada.

Quando comparadas com as amostras Z4 e Z5, as amostras Z1, Z2 e Z3 são visivelmente mais grosseiras. No caso das amostras Z2 e Z3, pode observar-se que apenas entre 6,29% e 14,8%, respetivamente das partículas que as constituem têm dimensão inferior a 0,074 mm (correspondendo ao material que passa no peneiro n.º 200), ao passo que no caso das amostras Z4 e Z5, se observa que a sua constituição comporta entre de 68,5% e 90,2% respetivamente de partículas com calibre inferior ao referido. Verifica-se assim que as amostras Z4 e Z5 representam solos mais finos que os representados pelas amostras Z1, Z2 e Z3.

É ainda possível observar que as distribuições granulométricas das amostras Z1, Z2 e Z3 são muito semelhantes apresentando uma distribuição típica de solos arenosos.

Uma outra forma de classificar o solo a partir da curva granulométrica pode ser executada segundo triângulo de Feret, que se apresenta na figura 31.

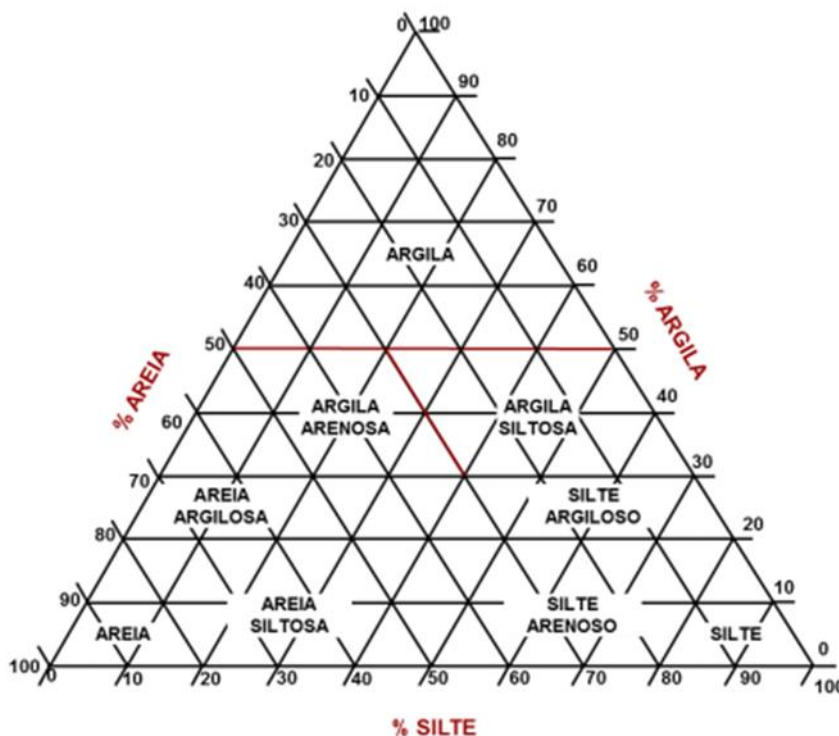


Figura 31 - Triângulo de Feret: Designação dos solos.

Fonte: <http://broadwaycomputers.us/diagrama-trilinear-solos.html>

Como é possível visualizar na figura 31, existe uma série de designações, que se podem atribuir aos solos com mais de 68% das partículas (68,5% para o Z4 e 90,2% para o Z5).

Os três solos arenosos enquadram-se na classe das areias. Contudo, para uma completa classificação do solo seria necessário conhecer a distribuição granulométrica da sua fração mais fina.

Outros parâmetros que podem ser retirados da curva granulométrica são o C_u e C_c . Estes permitem-nos avaliar se os solos são bem ou mal graduados.

O cálculo destes parâmetros só foi possível para as três primeiras amostras, uma vez que apenas nestas é possível determinar os valores de D_{10} , D_{30} e D_{60} , necessários.

Tabela 6 - Resultado do Coeficiente de uniformidade e curvatura para os solos Z1, Z2 e Z3.

	Z1	Z2	Z3
C_u	8.75	2.91	9.33
C_c	2.85	2.67	2.67

Da tabela 6, resulta que o solo Z1 se classifica como um solo bem graduado pelo C_c e C_u , o solo Z2 apresenta divergência, pelo C_u é classificado como mal graduado, mas pelo C_c é bem graduado. Relativamente ao solo Z3 define-se como bem graduado pelos dois coeficientes.

5.1.3 Limites de consistência

Com o intuito de compreender o comportamento do solo, realizaram-se os limites de consistência. A realização destes ensaios seguiu as diretrizes da Norma NP 143 – 1969 do LNEC.

Os ensaios foram realizados para todas as amostras, muito embora, apenas para os solos Z4 e Z5 se tenham obtido valores de LL e LP.

Sobre a preparação do solo Z4 para a determinação dos limites importa referir a dificuldade em humedecer o solo convenientemente tornando-o numa massa homogénea. Verifica-se que na presença da água, o solo formava pequenos aglomerados de partículas que exibem uma espécie de superfície protetora (como que impermeabilizante) onde a água não chega a entrar e humedecer o solo na totalidade. Este facto dificultou o processo de

humedecimento levando a que a preparação do solo desta amostra fosse mais demorada que a preparação das restantes amostras.

Para os solos arenosos (Z1, Z2 e Z3) não foi possível determinar LL ou LP (ensaios não realizáveis), dada a sua inexequibilidade, devido ao facto de estes solos serem estritamente arenosos.

Contudo, e contrariamente ao que aconteceu com a concha de Casagrande, foi possível determinar o valor de LL pelo método do cone penetrométrico.

Uma das razões que pode justificar esta situação prende-se no facto de que no cone, o solo encontra-se contido e confinado num recipiente cilíndrico o que impede a água de percolar e sair da sua estrutura, enquanto que na concha de Casagrande a água flui até à parte inferior da camada de solo e funciona como lubrificante entre o solo e a concha.

No decorrer do ensaio do cone penetrométrico observou-se que, devido às oscilações e reacção do impacto da penetração do cone ocorre ascensão de água através dos seus poros, até à superfície do provete, situação que era mais notória quando o solo era manuseado com um teor mais elevado. Como o solo não possuía fração fina importante e certamente que também não possuía minerais argilosos em quantidade suficiente, havia dificuldade em armazenar a água em excesso de forma homogénea na sua estrutura.

Na figura 32, é possível verificar este comportamento.

Relativamente à determinação do limite de plasticidade das amostras Z1, Z2 e Z3, verificou-se a mesma dificuldade já descrita para a determinação do limite de liquidez pelo método da concha de Casagrande, pelo que apenas foi possível obter esses valores para as amostras Z4 e Z5.

A figura 33 representa um momento da execução deste ensaio.



Figura 32 - Pormenor da realização do ensaio de limite de liquidez pelo cone penetrométrico.



Figura 33 - Pormenor da realização do ensaio do limite de plasticidade.

Na tabela 7 podem ver-se os resultados dos limites de consistência, bem como o valor do Índice de Plasticidade, determinado pela diferença entre o valor do Limite de Liquidez, obtido pelo ensaio da concha de Casagrande, e o valor do limite de plasticidade.

Tabela 7 - Síntese de resultados dos limites de consistência.

Solo / Limites	L.L	L.L (Cone)	L.P	IP
Z1	NR	24	NP	-
Z2	NR	19	NP	-
Z3	NR	24	NP	-
Z4	66	66	24	42
Z5	33	39	24	9

*NP=Não plástico, NR= Não realizável

Com base nestes dados, e segundo a classificação de Jenkis anteriormente referida, classificaram-se estes solos, sendo essa classificação apresentada na tabela 8.

Tabela 8 - Classificação dos solos segundo a Classificação proposta por Jenkis,1988.

Classificação	IP (%)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Não plástico	IP= 0	✓	✓	✓		
Pouco plástico	1 < IP < 7					
Mediamente plástico	7 < IP < 15					✓
Muito plástico	IP > 15				✓	

5.2 Classificação dos solos

Na mecânica de solos são usadas diversas classificações para os solos. Dependendo do que se pretende contemplar podemos adaptar a escolha da classificação ao nosso objetivo. Neste trabalho as classificações de solos escolhidas são as usadas para propósitos de engenharia, em particular, para a construção de vias de comunicação.

5.2.1 Classificação de solos para fins rodoviários

Segundo a Especificação LNEC E240 – 1970 – Classificação de solos para fins rodoviários que, na prática corresponde à Classificação H.R.B (Highway Research Board) ou A.A.S.H.T.O (American Association State Highway and Transportation Officials), os solos são classificados por ordem decrescente de qualidade em sete grupos principais, desde A-1 a A-7, com base na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade. Esta classificação é a usada no CETO, para limitação dos solos a usar nas diversas partes dos aterros. Na tabela 9, apresenta-se um excerto da referida Especificação, em que se podem observar as diversas classes e subclasses definidas neste documento.

Tabela 9 - Quadro para classificação de solos, excerto da especificação E240 – 1970 do LNEC.

CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Tipos de solos	Materiais granulares [85 % ou menos passando no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM]							Materiais silto-argilosos [mais de 35 % passando no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM]				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6	
Granulometria — % passando nos peneiros ASTM:												
2,00 mm (n.º 10)	50 máx	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,420 mm (n.º 40)	30 máx	50 máx	51 mín	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,074 mm (n.º 200)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	—
Características de fracção passando no peneiro de 0,420 mm (n.º 40) ASTM:												
Limite de liquidez	—	—	—	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín ⁽¹⁾
Índice de plasticidade	6 máx	—	não plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	11 mín
Índice de grupo ⁽²⁾	0	0	0	0	0	0	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx	20 máx
Tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais	calhau, seixo e areia		areia fina	seixo e areia siltosos ou argilosos				solos siltosos		solos argilosos		
Comportamento na camada sob o pavimento	excelente a bom							regular a muito mau				

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

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

(3) O índice de grupo indica-se entre parêntesis depois do símbolo do grupo ou subgrupo. Exemplos: A-3 (10); A-2-7 (3); A-7-5 (10).

5.2.2 Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S.) ASTM D 2487 – 85

Esta classificação (vulgarmente conhecida como Classificação Unificada), embora não seja a mais ajustada para definir os solos a usar na construção dos aterros em obras viárias, é a mais usada em engenharia, a nível internacional. Esta classificação considera solos

inorgânicos e orgânicos e contém 15 grupos ou classes, em que os solos se podem enquadrar, sendo essa divisão feita com base nas características granulométricas e plásticas por eles exibidas. A classificação do solo corresponde à atribuição de um símbolo e de uma designação.

Na tabela 10, pode observar-se um excerto desta classificação.

Tabela 10 - Quadro do Sistema Unificado de Classificação de solos (ASTM).

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

5.2.3 Classificação Francesa - GTR (NF P 11 300) LCPC/SETRA

Esta classificação também está direcionada para a utilização de solos na construção de aterros. Baseia-se em três aspetos: a natureza e origem dos solos, o comportamento mecânico e os parâmetros de estado.

Quando comparado com as outras classificações, uma das principais diferenças notadas prende-se com a utilização de outros parâmetros (para além da distribuição granulométrica e limites de consistência), como é o caso do valor de azul de metileno. Este dado representa uma quantidade de adsorção de azul-de-metileno nas superfícies das partículas, estando essencialmente dependentes dessa característica dos materiais. Este parâmetro é utilizado para a caracterização da argilosidade do solo.

Outra diferença consiste no facto de esta norma também permitir classificar rochas. Este aspeto não é abordado neste trabalho, por não ter nele enquadramento.

Nas figuras 34 e 35, apresentam-se excertos da norma francesa, relativos aos solos.

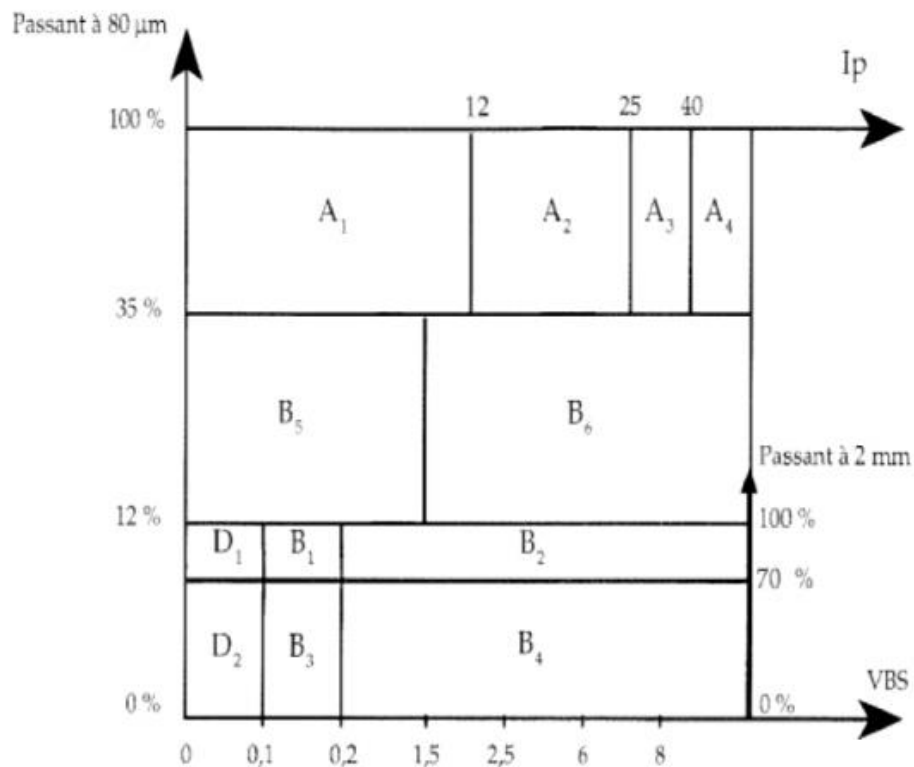


Figura 34 – Classificação de solos com partículas de $D_{m\acute{a}x} \leq 50\text{mm}$ (GTR).

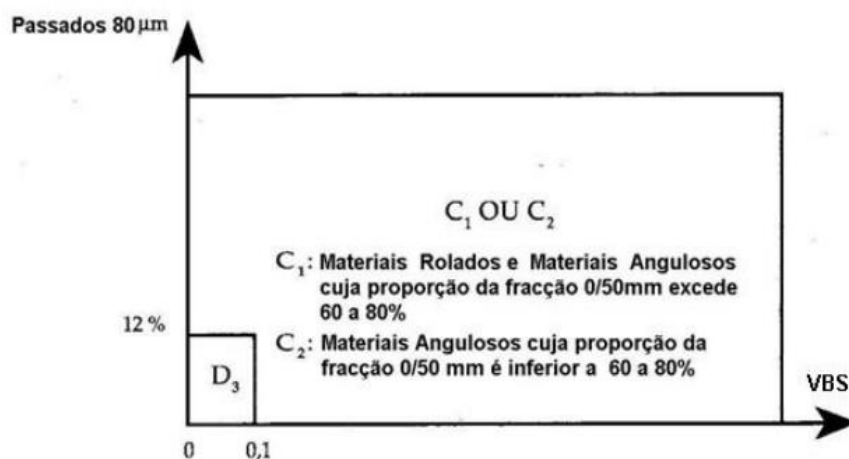


Figura 35 - Classificação de solos com partículas de $D_{máx} > 50\text{mm}$.

5.2.4 Resultado da classificação dos solos

Na tabela 11 apresenta-se o resultado das classificações dos solos integrantes deste estudo.

Tabela 11 - Classificação dos solos em estudo.

Amostra/Classificação	LNEC – E240	SUCS	LCPC/SETRA
Z1	A-2-4(0)	SP-SM (Areia bem graduada com silte)	(D1 ou B1 ou B2)*
Z2	A-3(0)	SP-SM (Areia mal graduada com silte)	(D1 ou B1 ou B2)*
Z3	A-2-4(0)	SM (Areia siltosa)	(B5 – B6)*
Z4	A-7-6(18)	CH (Argila gorda arenosa)	A4
Z5	A-4(8)	CL (Argila magra)	A1

* Os solos pertencem a um dos grupos assinalados, no entanto não foi possível determinar a qual deles pertence devido a não se conhecer o valor de VMS (Azul de metileno).

5.3 Expansibilidade

Pela realização deste ensaio, de acordo com a norma NP E 200 – 1967 LNEC os resultados obtidos foram os constantes da tabela 12.

Tabela 12 - Síntese de resultados do ensaio de expansibilidade.

Amostra	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Exp (%)	1.3	0	0.2	41.3	6.5

Os solos Z1, Z2 e Z3 não apresentam expansibilidade significativa, exibindo a amostra Z1 o valor mais alto destes três solos.

Estes resultados podem indicar a diminuta presença (ou mesmo ausência) de minerais expansivos na composição do solo.

Já o solo Z4 exhibe expansibilidade com valor de 41,3 %, indicador da provável presença de minerais expansivos.

Por fim o solo Z5, sendo um solo argiloso apresenta apenas expansibilidade moderada, com valor de 6,5 %.

5.4 Ensaio de compactação

Com o propósito de conhecer os parâmetros adequados para a compactação dos solos, realizou-se o ensaio de compactação Proctor.

Como já foi referido no capítulo anterior realizou-se compactação Proctor pesado com o objetivo de simular a energia de compactação aplicada pelos cilindros, na construção das camadas de um aterro inserido numa via de comunicação.

Na tabela 13 podem observar-se os resultados obtidos

Tabela 13 - Síntese de resultados do ensaio de Proctor para o teor ótimo de compactação.

Amostra	Teor ótimo (%)	Baridade seca máxima (g/cm³)	Baridade seca máxima (KN/m³)
Z1	6,5	1,95	19,1
Z2	13	1,73	16,9
Z3	11,5	1,77	17,3
Z4	18,5	1,73	16,9
Z5	12,7	1,98	19,4

Na preparação dos solos com diferentes teores em água para o ensaio, observou-se diferenças de comportamento entre si.

Nos solos arenosos (Z1, Z2 e Z3) o humedecimento foi mais simples de fazer, comparativamente com os restantes.

Previamente ao humedecimento era feito um cálculo da quantidade de água necessária para atingir um determinado teor. Aquando da compactação, para estes três solos havia dificuldade em trabalhar com os provetes mais húmidos (com teores de água acima do teor ótimo de compactação), sendo perceptível que a água percolava no provete apesar da compactação.

Na figura 36 ilustram-se algumas dificuldades e problemas que ocorreram.

Como o molde não é totalmente impermeável, o excesso de água que o solo não consegue adsorver, começa a fluir através do provete até à parte inferior. Todavia, esta situação foi só observada nos solos arenosos. Em relação ao solo Z4 a principal complexidade, à semelhança do que se havia já experienciado aquando da realização dos limites de consistência, era o humedecimento do solo. Por ser um solo argiloso tornava-se difícil homogeneizar a mistura da água com as partículas.

No caso do solo Z5 era ligeiramente mais fácil que no Z4 misturar a água no solo, conseguindo-se mais facilmente provetes com humedecimento homogéneo.



Figura 36 - Pormenores ocorridos ao longo do ensaio de compactação Proctor.

5.5 Corte direto

O ensaio de corte direto foi o principal ensaio desta investigação tendo sido realizado repetidamente ao ponto de constituir a parte mais trabalhosa da componente laboratorial. Como referido anteriormente, realizaram-se 93 ensaios de resistência ao corte direto e corte reversivo.

Uma vez realizados os cortes diretos, iniciava-se o corte reversivo (com movimentação da caixa no sentido inverso), a fim de comparar os valores de resistência assim obtidos.

Para estes ensaios foram medidos três parâmetros de resistência. A resistência de pico do corte direto, resistência residual do corte direto e a resistência de pico do corte reversivo.

Nos gráficos apresentados nas figuras 37 e 38, ilustra-se a informação retirada dos diversos ensaios de corte efetuados.

No gráfico abaixo estão representados os dados obtidos nos cortes efetuados em três provetes do solo Z1. Cada um destes cortes é feito com aplicação de uma carga vertical, distinta da carga vertical usada nos restantes.

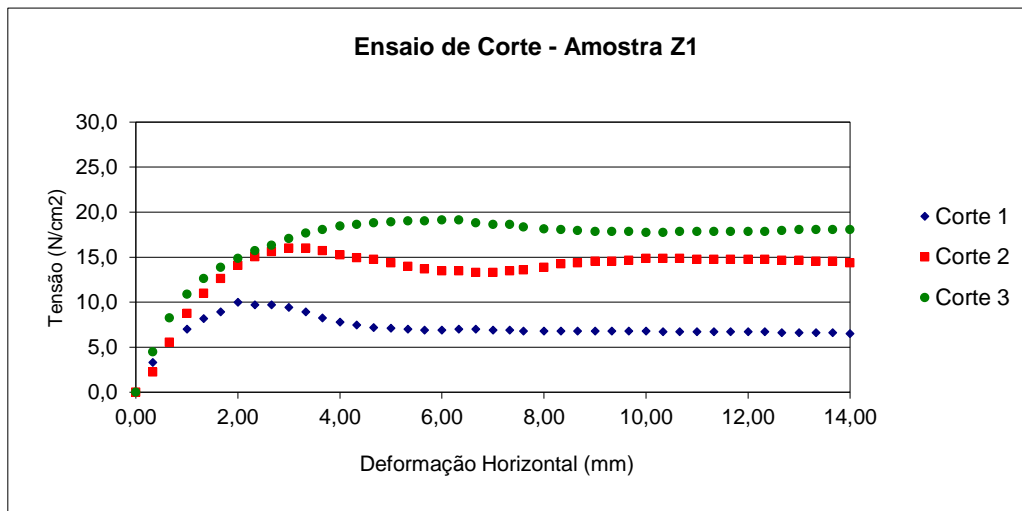


Figura 37 - Exemplo de um gráfico de ensaio de corte direto (Tensão vs Deformação horizontal).

Destes gráficos podemos retirar dois valores: a tensão de pico pelo qual se dá a rotura do solo e também a tensão residual que o solo exhibe depois de ser cortado.

A tensão de pico, corresponde ao maior valor de tensão resistente ao corte do solo quando este está sujeito a determinada tensão vertical e a uma força de corte tangencial. A tensão residual, reflete a resistência que o solo mantém depois de romper.

Com os valores de resistência ao corte direto (resistência de pico) obtido para as três tensões verticais aplicadas, pode então definir-se envoltória de Mohr-Coulomb.

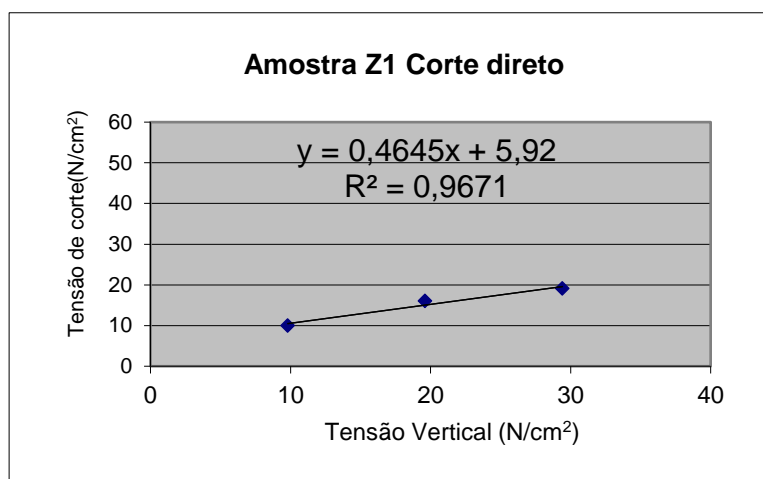


Figura 38 - Gráfico de tensão de corte vs tensão vertical.

No exemplo constante da figura 38, está representado o gráfico correspondente às tensões de pico de ensaios de corte direto, representadas no eixo das abcissas e os valores da tensão vertical nas ordenadas.

É com base nesta informação que se determinaram os valores da coesão e ângulo de atrito.

Salienta-se que apenas foram consideradas e validadas as situações dos testes em que o coeficiente de regressão linear obtido para o ajustamento da curva, foi superior a 95%, razão pela qual os resultados de alguns testes não foram considerados neste estudo.

A coesão, que neste caso corresponde a $5,92 \text{ N/cm}^2$, é o valor da ordenada interceptada pela reta definida no gráfico pela projeção dos três valores de tensão de corte.

O ângulo de atrito corresponde ao declive dessa reta sendo neste caso de $24,91^\circ$.

5.5.1 Apresentação de resultados Z1

Para o solo Z1 foram realizados dezoito ensaios de corte direto. Na apresentação dos dados, cada conjunto dos três ensaios de uma dada amostra, está identificado como teste seguido de um número que corresponde à ordem da sua realização.

Em cada provete foi determinado o teor em água do solo, de modo a que fosse depois possível estudar os resultados tendo presente a variação do teor em água, relativamente ao teor observado no ensaio de compactação.

Nas tabelas 14 a 16, estão indicados os valores correspondentes ao ângulo de atrito e coesão obtidos nos diversos testes respeitantes à amostra de solo Z1.

Tabela 14 - Resultado dos ensaios de corte direto para os vários conjuntos de provetes compactados com diferentes teores em água.

CD – Z1				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m ²)	ϕ (°)
Teste 4	3,18	-3,3	0,00	38,51
Teste 1	3,28	-3,2	19,60	38,99
Teste 3	6,49	0,0	30,10	27,20
Teste 6	7,96	1,4	35,60	33,90

Tabela 15 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os vários conjuntos de provetes compactados em diferentes teores em água.

CDR – Z1				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	3,18	-3,3	9,10	33,11
Teste 1	3,28	-3,2	9,10	34,87
Teste 2	4,94	-1,6	10,90	31,31
Teste 3	6,49	0,0	13,90	30,25
Teste 5	8,21	1,7	14,90	30,45

Tabela 16 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os vários conjuntos de provetes compactados com diferentes teores em água.

CR – Z1				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	3,18	-3,3	9,7	53,04
Teste 2	4,94	-1,6	15,60	50,55
Teste 3	6,49	0,0	15,50	49,98
Teste 5	8,21	1,7	18,80	49,63

As três tabelas acima resumem a informação retirada dos ensaios, particularmente os valores de coesão e ângulo de atrito determinados para as três situações consideradas: valores de pico do corte direto (CD), valores residuais do corte direto (CDR) e valores de pico do corte reversivo (CR).

Para uma melhor percepção da variação de cada parâmetro face ao teor em água, e à sua distância ou proximidade do teor ótimo de compactação, projetaram-se os gráficos seguintes (39 e 40):

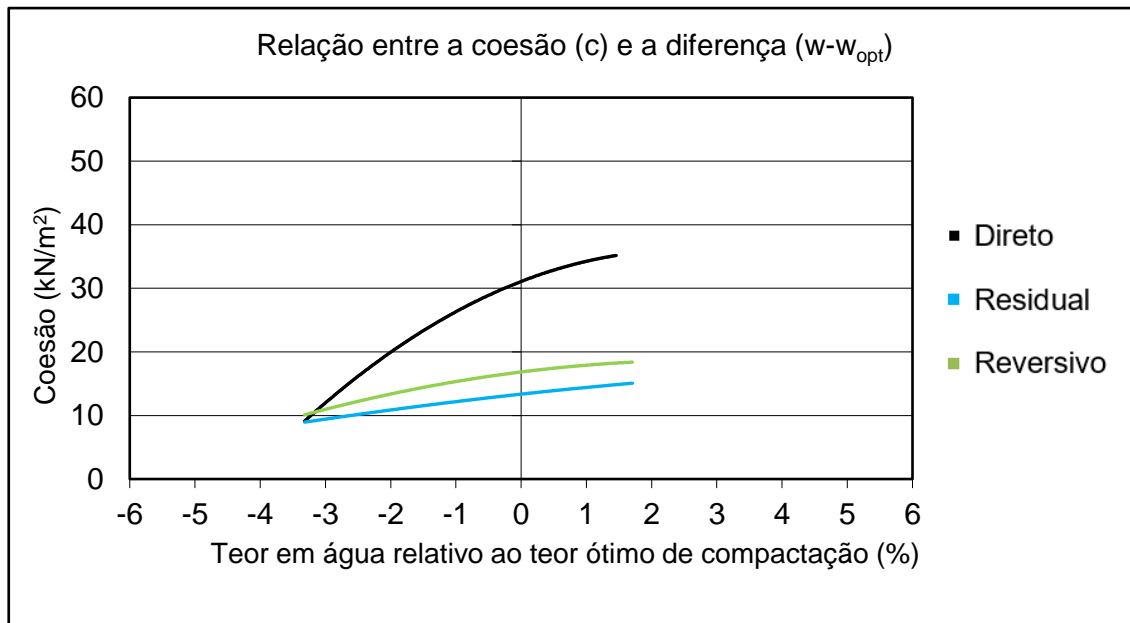


Figura 39 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z1.

Analisando o gráfico da coesão (figura 39), tornam-se claras algumas situações. O valor da coesão para o ensaio de CD aumenta em função do aumento do teor em água, observando-se o valor mais baixo quando o solo compactado está mais seco.

Nos gráficos referentes aos dados das tensões residuais e reversivas, os valores de coesão são sensivelmente equidistantes entre si, e visivelmente menores quando comparados com os resultados do CD. Estes valores acompanham a tendência de crescimento em função do teor em água, exibida pelo CD, mas com uma taxa de crescimento distinta da observada naquele caso.

Do mesmo modo, apresenta-se o gráfico elaborado com a projeção dos valores de ângulo de atrito e a diferença entre o teor de humidade de compactação da série de provetes e o teor ótimo de compactação do solo.

Verifica-se que a variação do ângulo de atrito com o teor de humidade, é diferente da observada para a coesão.

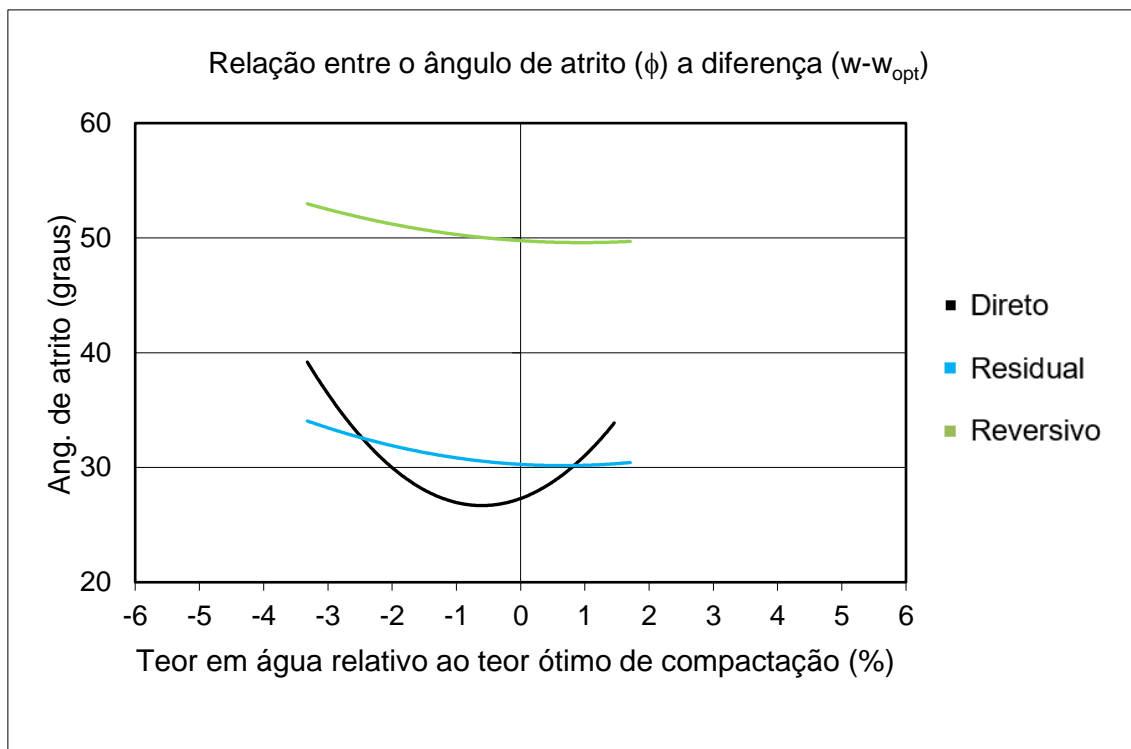


Figura 40 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z1.

Para a tensão residual do corte direto e do pico do corte reversivo, observamos uma tendência de variação semelhante, maioritariamente decrescente, definindo linhas quase paralelas e distanciadas entre si de cerca de 18° a 20° , sendo os valores do reversivo superiores aos do residual.

No caso da resistência de pico do corte direto existe diferença no comportamento. Para as séries de provetes compactadas o valor do ângulo de atrito decresce até próximo do teor ótimo (sensivelmente até um teor cerca de 0,5% inferior ao ótimo) e volta a subir à medida que aumenta o teor em água.

Um dos fenómenos que poderão justificar este comportamento está relacionado com a própria mecânica do solo. Quando o solo é compactado força-se uma reorganização das partículas e conseqüente ajustamento, ficando este também dependente do espaço disponível (vazios não preenchidos).

Quando compactado abaixo do teor ótimo o solo apresenta um maior ângulo de atrito pois é menor a presença da água. Desta forma o solo apresenta uma maior área de contacto entre as partículas potenciando assim o atrito.

A intervenção da água neste comportamento é a de funcionar como uma espécie de lubrificante, facilitando o movimento das partículas entre si até que se atinja o teor ótimo de compactação.

Outra observação relevante é na resistência de pico do corte direto, onde junto ao teor ótimo e em função o ângulo de atrito o seu valor aumenta. Este facto pode-se explicar recorrendo ao que observámos na execução do ensaio de proctor quando o solo é compactado acima do teor ótimo. Verificou-se que a água em excesso se escapava do molde levando consigo as partículas finas, funcionando esta saída de água como uma lavagem do solo diminuindo o seu conteúdo em partículas mais finas, implicando assim um rearranjo entre as partículas, o que também possibilitou o aumento a proximidade entre as partículas mais grosseiras cujo movimento relativo provoca maior atrito.

5.5.2 Apresentação de resultados Z2

Na amostra Z2 foram efetuados sete testes que correspondem a 21 ensaios de corte direto.

Nas tabelas 17 a 19, apresentam-se os resultados obtidos em seis desses testes, devidamente validados.

Tabela 17 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z2.

CD – Z2				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,08	-9,9	23,30	29,4
Teste 2	5,04	-8,0	31,60	28,77
Teste 3	7,43	-5,6	28,40	29,84
Teste 4	9,34	-3,7	26,60	32,00
Teste 6	12,55	-0,4	14,20	37,81

Tabela 18 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z2.

CDR – Z2				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,08	-9,9	6,10	31,71
Teste 2	5,04	-8,0	13,90	29,17
Teste 4	9,34	-3,7	11,60	29,62
Teste 5	11,42	-1,6	8,00	31,3
Teste 6	12,55	-0,4	6,10	31,5
Teste 7	13,58	0,6	5,80	31,1

Tabela 19 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z2.

CR – Z2				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,08	-9,9	3,90	51,24
Teste 3	7,43	-5,6	3,00	50,33
Teste 5	11,42	-1,6	5,90	50,79
Teste 6	12,55	-0,4	6,20	50,55
Teste 7	13,58	0,6	7,70	50,46

Os dados obtidos permitem uma análise mais pormenorizada do solo na fase mais seca, pois foi muito difícil conseguir realizar os ensaios para valores de humidade superiores ao ótimo, como oportunamente referido no capítulo relativo à metodologia.

Com estes dados, e à semelhança do que se fez para o caso da amostra Z1, prepararam-se os gráficos constantes das figuras 41 e 42, sendo um respeitante aos valores de coesão e outro respeitante aos valores de ângulo de atrito.

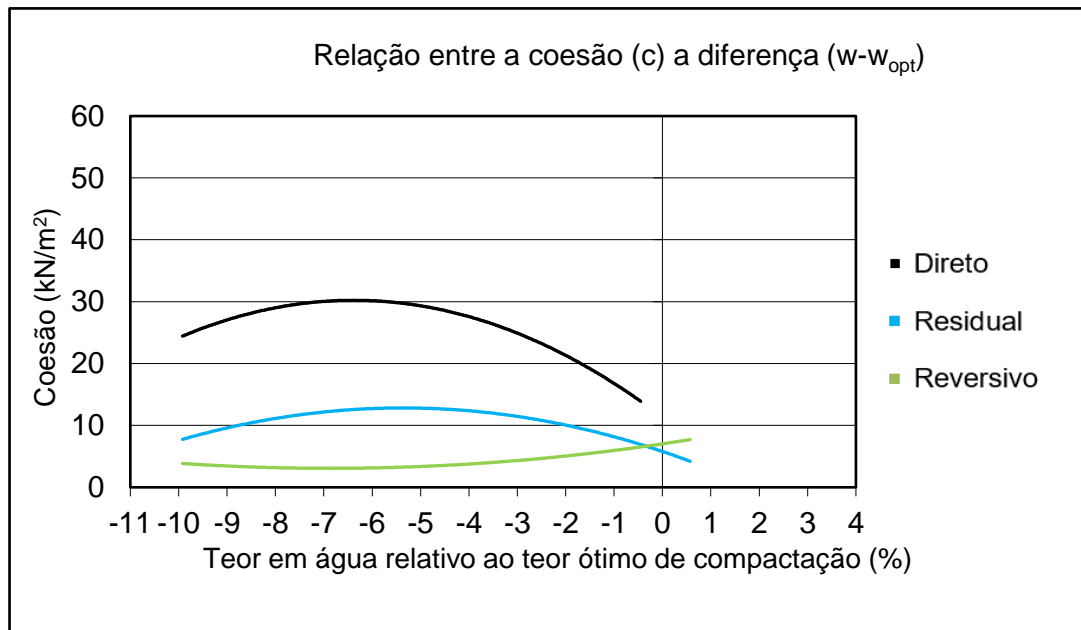


Figura 41 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z2.

Sendo o corte direto o que apresenta maiores valores quando comparado com o residual e reversivo, uma das justificações para esta situação deve-se ao facto de que no momento da obtenção da tensão de pico, o solo ainda não sofreu rotura e as partículas apresentam uma maior união entre si, enquanto que na determinação da tensão residual este já foi cortado, existindo deste modo apenas forças de atrito a funcionar.

Quanto ao reversivo, era de esperar baixos valores de coesão, dado que este ensaio é executado após o corte do provete.

Relativamente ao ângulo de atrito (figura 42), tanto para o caso reversivo como para o residual o comportamento é muito semelhante, diferindo significativamente na grandeza de valores exibidos, sendo que no reversivo os valores situam-se na casa dos 50° e no residual na casa dos 30° .

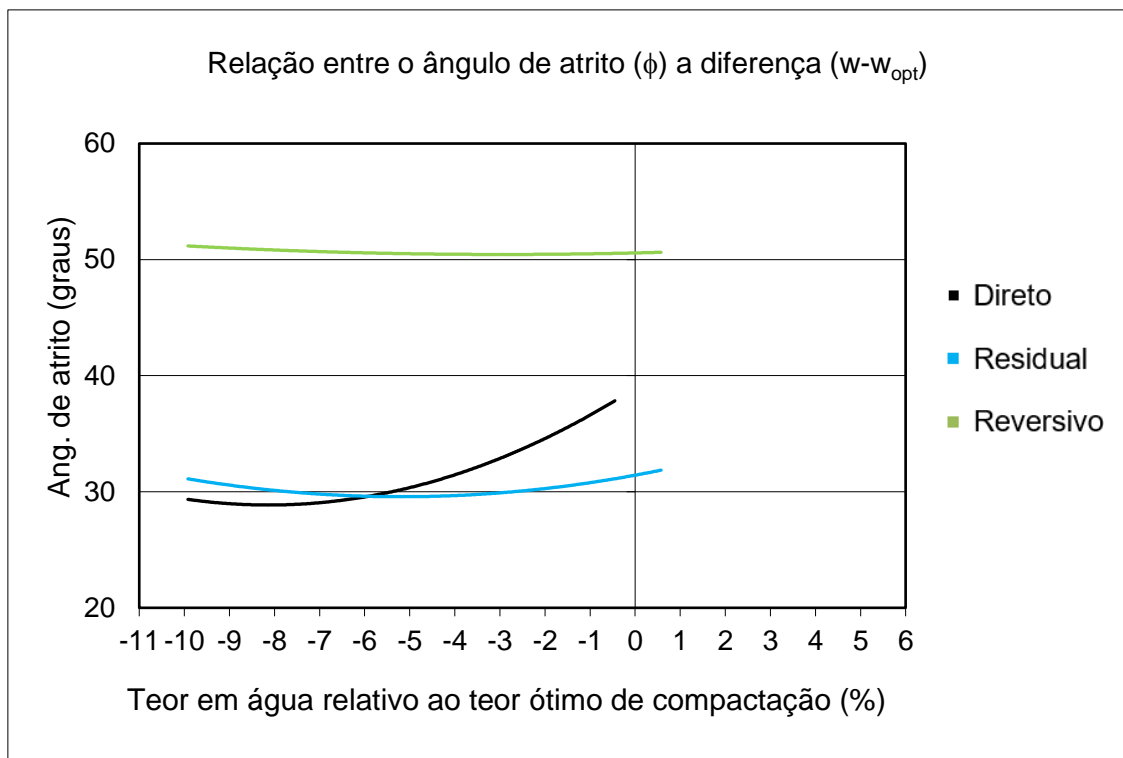


Figura 42 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z2.

No caso do corte direto, o atrito exibe outro comportamento. O valor do ângulo de atrito apresenta uma tendência de crescimento com o aumento do teor de água que possui, verificando-se que esse aumento é mais significativo na proximidade do teor ótimo.

5.5.3 Apresentação de resultados Z3

Nas tabelas 20 a 22, estão ilustrados os resultados dos ensaios de corte executados com o solo Z3.

Com esta amostra foram realizados 6 testes, ou seja, 18 ensaios de corte direto e outros tantos de corte reversivo.

Tabela 20 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z3.

CD – Z3				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,06	-8,4	13,50	33,13
Teste 2	5,74	-5,8	36,50	30,03
Teste 6	9,72	-1,8	22,60	36,00
Teste 4	11,88	0,4	6,80	41,35
Teste 5	13,41	1,9	0	41,18

Tabela 21 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z3.

CDR – Z3				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,06	-8,4	9,70	30,67
Teste 2	5,74	-5,8	12,90	29,62
Teste 3	8,42	-3,1	7,10	31,1
Teste 4	11,88	0,4	7,20	30,67
Teste 5	13,41	1,9	0	32,72

Tabela 22 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z3.

CR – Z3				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 1	3,06	-8,4	16,20	49,75
Teste 2	5,74	-5,8	13,20	49,52
Teste 3	8,42	-3,1	10,00	50,45
Teste 4	11,88	0,4	10,60	49,64
Teste 5	13,41	1,9	0	50,91

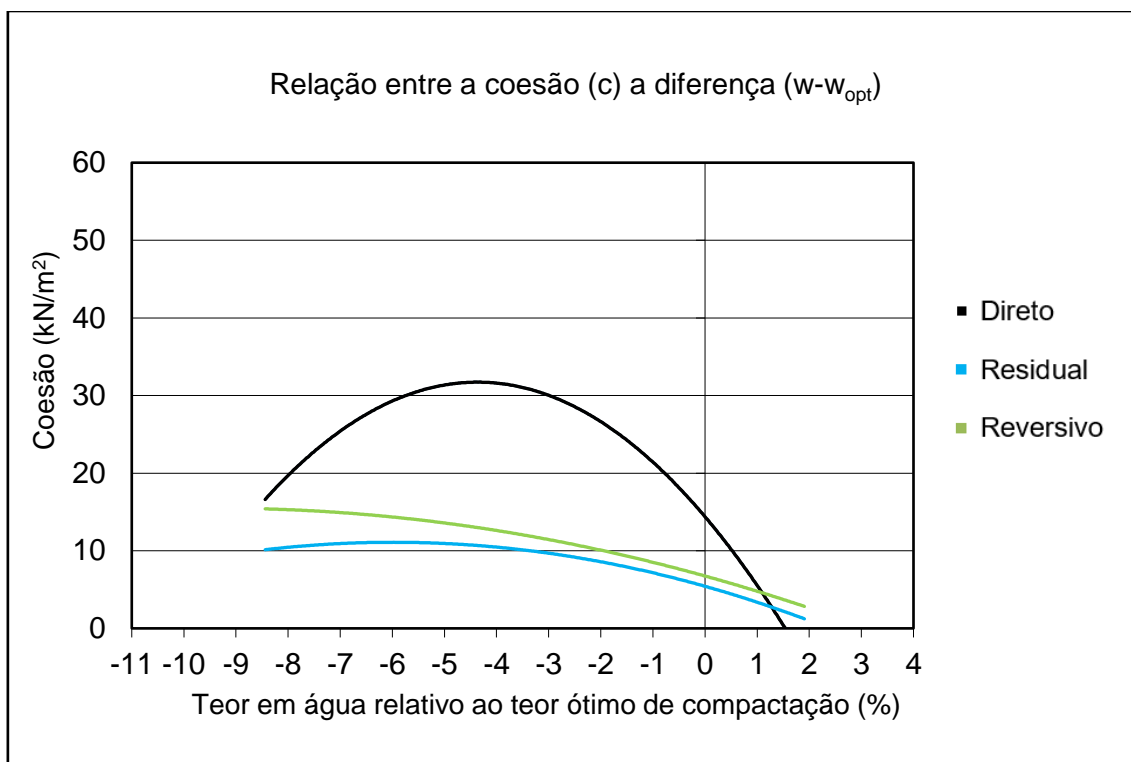


Figura 43 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z3.

Analisando o gráfico acima, a primeira conclusão que se retira é a semelhança de comportamento da coesão no corte residual e reversivo. Em ambos os casos, os valores apresentam a mesma tendência de diminuição com o aumento do teor em água.

No corte direto a coesão tende a aumentar até atingir um pico máximo, ponto a partir do qual diminui sempre com o aumento do teor em água.

Relativamente ao ângulo de atrito, projetado no gráfico da figura 44, apresenta um pendor crescente para o CD em função do aumento do teor em água. Relativamente ao CDR e CR as tendências de variação do atrito são semelhantes, ou seja, mantêm-se crescentes, embora com taxa de crescimento muito menor que a observada para o caso do CD, especialmente no reversivo.

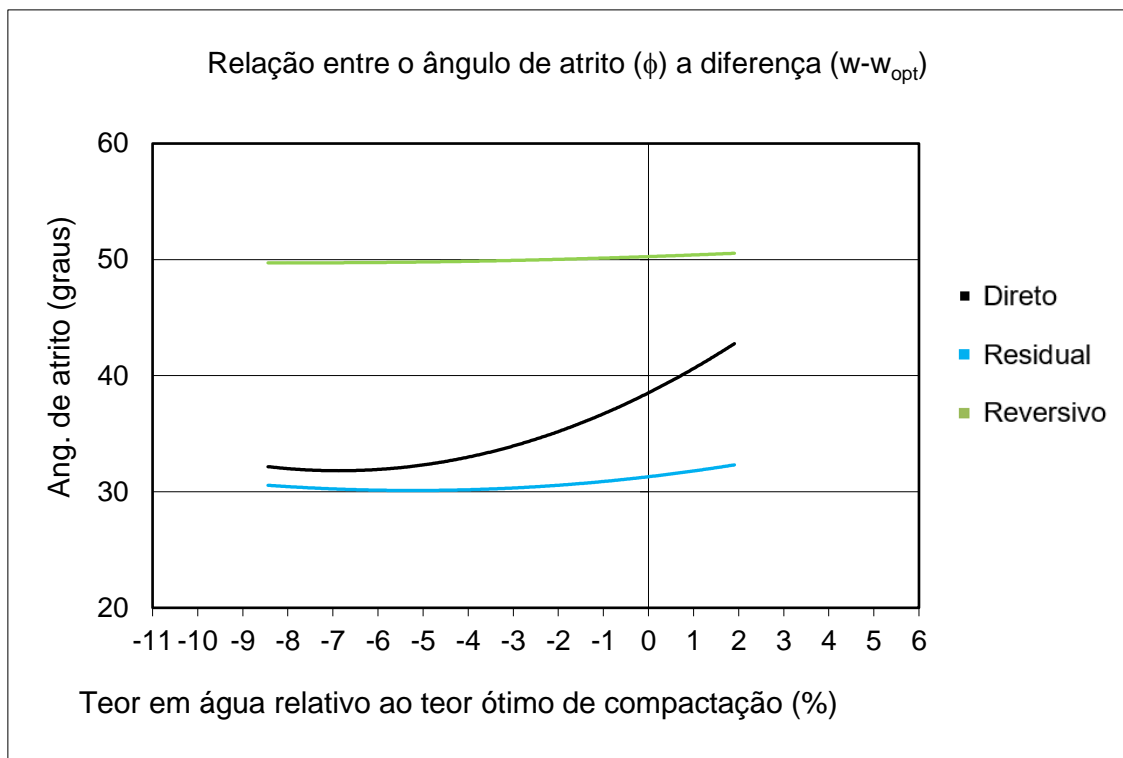


Figura 44 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z3.

5.5.4 Apresentação de resultados Z4

Contrariamente aos solos arenosos anteriormente analisados, o solo Z4 é um solo argiloso pelo que se esperava a observação de diferenças no seu comportamento, comparativamente ao comportamento patenteado pelos solos arenosos.

A execução dos ensaios para solo Z4 envolveu algumas dificuldades, já relatadas anteriormente, devidas à sua natureza mais argilosa. Algumas das dificuldades eram observadas no manuseamento do solo na fase mais seca, pois este demonstrava uma elevada resistência ao manuseamento quando se promovia o seu humedecimento.

Também neste caso, tal como nos anteriores, se apresentam três tabelas (tabelas 23, 24 e 25) com os resultados correspondentes aos três tipos de valores de resistência determinados, obtidos em quatro dos seis testes realizados, que no total corresponderam a 18 ensaios de corte.

Tabela 23 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z4.

CD – Z4				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 3	14,05	-4,4	163,20	43,2
Teste 1	18,01	-0,5	274,00	16,80
Teste 2	20,26	1,8	148,30	22,06
Teste 6	21,26	2,8	44,30	38,16

Tabela 24 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z4.

CDR – Z4				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	12,91	-5,6	35,60	36,00
Teste 3	14,05	-4,4	80,80	23,04
Teste 1	18,01	-0,5	129,20	12,81
Teste 2	20,26	1,8	31,40	20,82
Teste 6	21,26	2,8	18,20	22,29

Tabela 25 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z4.

CR – Z4				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	12,91	-5,6	12,30	56,87
Teste 3	14,05	-4,4	84,70	44,67
Teste 1	18,01	-0,5	160,20	26,31
Teste 2	20,26	1,8	50,40	36,74
Teste 6	21,26	2,8	22,70	40,36

Tal como nos casos anteriores, apresenta-se na figura 45 o gráfico com a relação entre a coesão e a variação do teor em água e na figura 46, o gráfico com a relação entre o ângulo de atrito interno e a variação do teor em água.

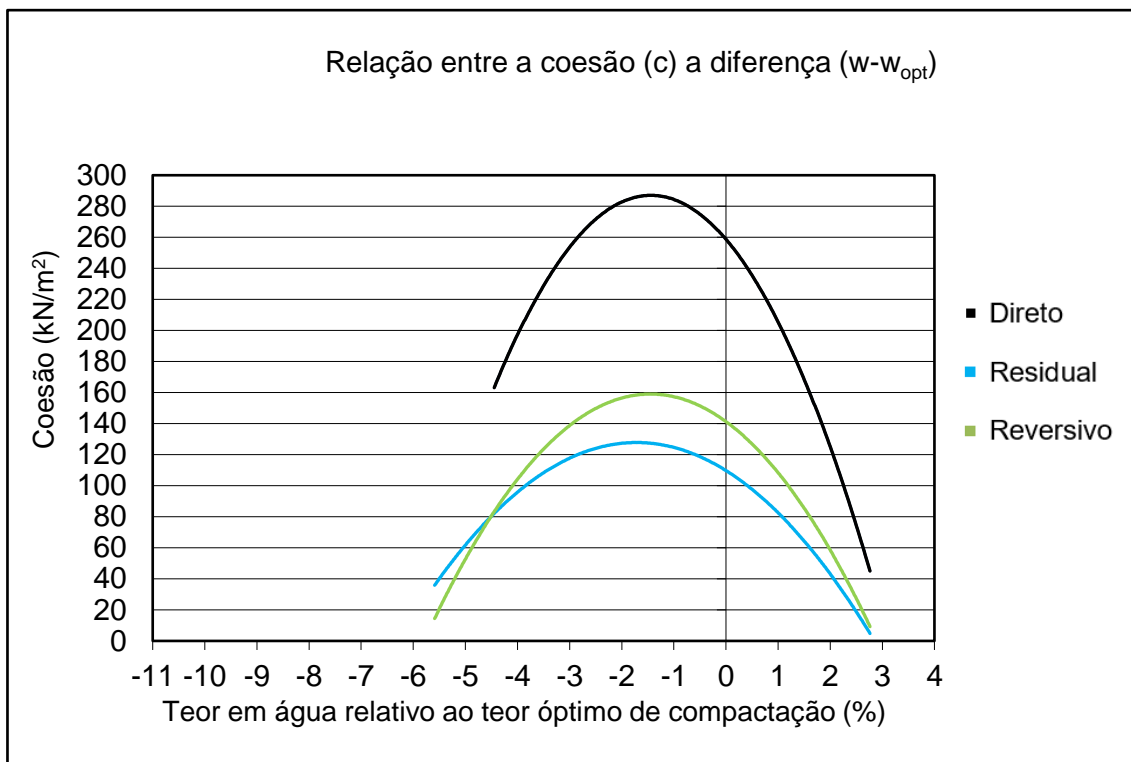


Figura 45 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z4.

De uma primeira análise ao gráfico acima apresentado, é visível a semelhança de comportamento entre o CD, CDR e CR.

Para todas as situações (CD, CDR e CR) os valores de coesão aumentam com o incremento do teor em água até atingir um pico máximo para um valor de humidade ainda inferior ao teor ótimo de compactação, passando então a diminuir, com o aumento do teor em água, a partir desse ponto.

Também se verifica que a amplitude da variação é elevada e atinge valores próximos de 290 KN/m^2 para o caso do CD, de 130 KN/m^2 para o caso do CDR e de 160 KN/m^2 para o caso do CR.

Relativamente ao ângulo de atrito também se nota o comportamento semelhante entre os três situações.

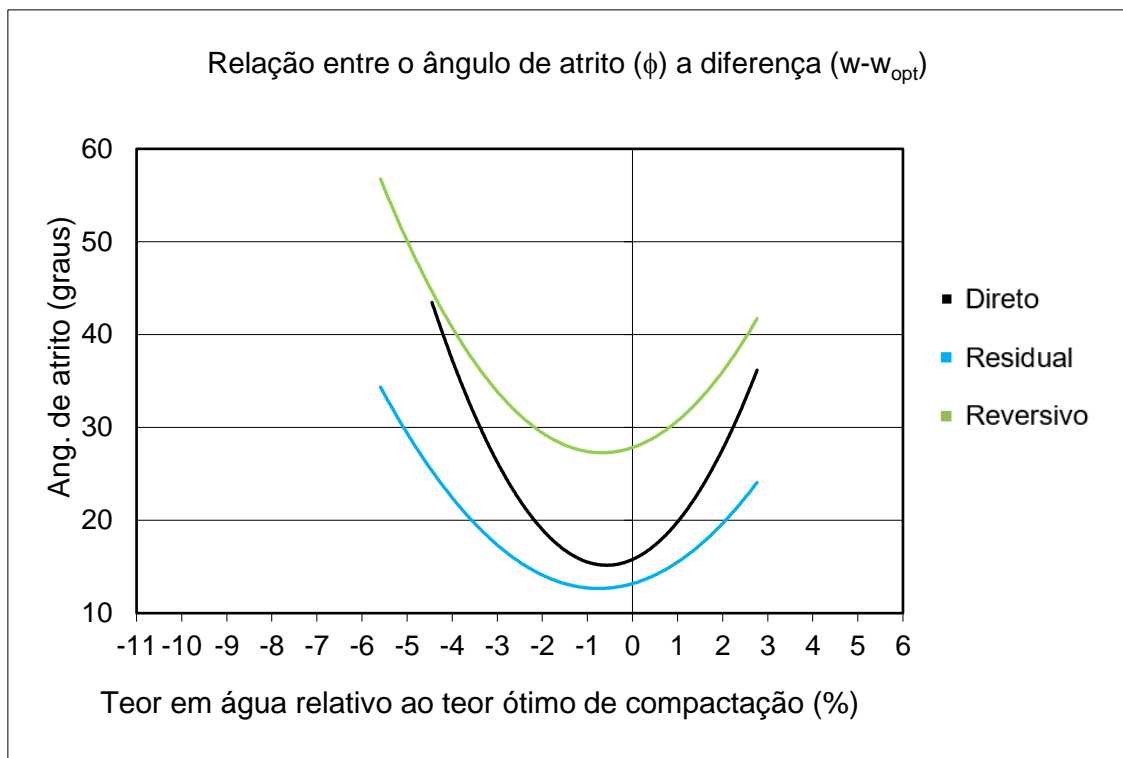


Figura 46 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z4.

Como era expectável o ângulo de atrito apresenta, para o CR, valores mais altos. Para todos os casos o valor mais baixo situa-se próximo, do teor ótimo de compactação.

O CDR exhibe um comportamento semelhante ao anterior, com os menores valores para o ângulo de atrito. No caso do CD os seus valores exibidos situam-se entre dos outros dois.

5.5.5 Apresentação de resultados Z5

Este solo tal como o representado pela amostra Z4, é um solo argiloso pelo que se esperava a existência de semelhanças no seu comportamento.

A realização dos ensaios nesta amostra decorreu dentro da normalidade, não se verificando as dificuldades no humedecimento dos provetes assinaladas para o caso do solo Z4, revelando-se a extração dos provetes compactados abaixo do teor ótimo, mais difíceis de executar.

Os resultados obtidos contam das tabelas 26 a 28, e das figuras 47 e 48.

Tabela 26 - Resultado dos ensaios de corte direto para os diferentes teores em água da amostra Z5.

CD – Z5				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	8,47	-4,2	12,90	40,5
Teste 1	11,03	-1,7	0	53,55
Teste 6	16,15	3,5	33,60	34,68
Teste 2	17,17	4,5	57,20	27,66

Tabela 27 - Resultado dos ensaios de corte direto (residual) para os diferentes teores em água da amostra Z5.

CDR – Z5				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	8,47	-4,2	23,90	34,68
Teste 1	11,03	-1,7	0	39,38
Teste 6	16,15	3,5	24,60	22,79
Teste 2	17,17	4,5	33,60	27,66

Tabela 28 - Resultado dos ensaios de corte reversivo para os diferentes teores em água da amostra Z5.

CR – Z5				
Nº corte	W% do corte	Dif (Wc-Wopt)	Coesão (KN/m²)	φ (°)
Teste 4	8,47	-4,2	0	58,57
Teste 3	9,99	-2,7	17,50	55,82
Teste 5	13,47	0,8	61,50	42,11
Teste 6	16,15	3,5	60,10	37,81
Teste 2	17,17	4,5	76,90	32,92

Apesar de este solo também ser argiloso, relativamente ao observado para o Z4, nota-se uma diferença significativa nas tendências de variação da coesão e o ângulo de atrito, com o valor do teor em água.

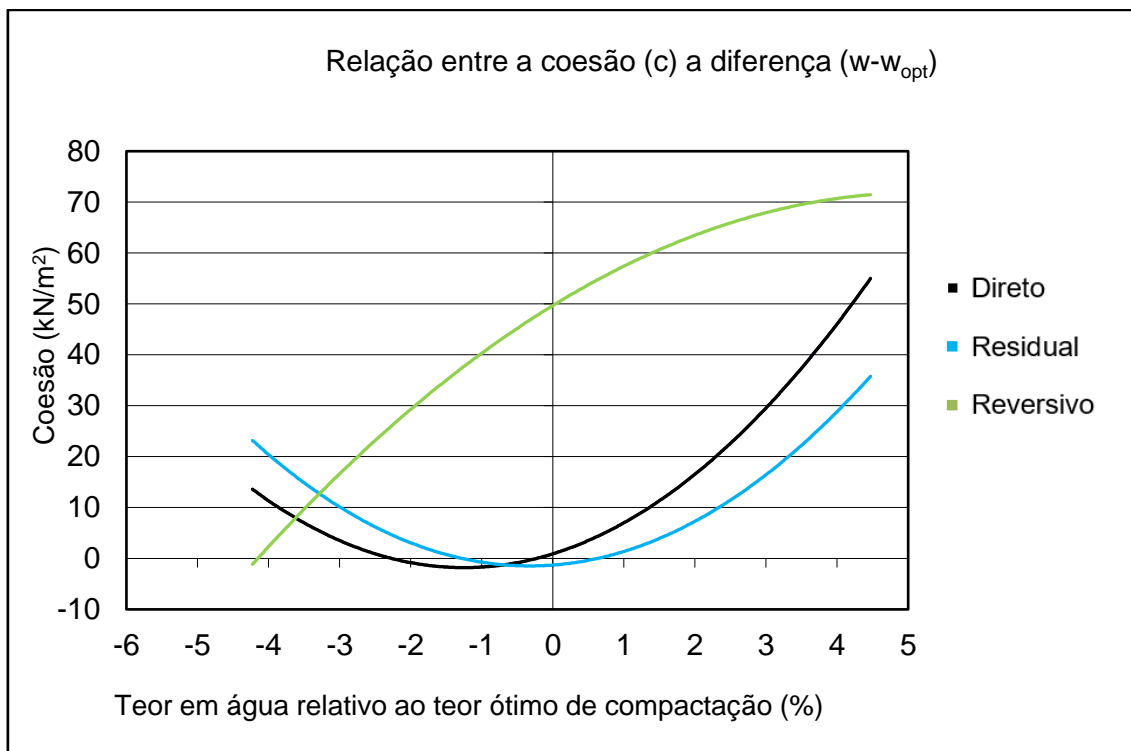


Figura 47 - Relação entre a coesão e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z5.

Através do gráfico acima verifica-se que para o corte direto e residual a coesão apresenta um comportamento semelhante entre si, mas com curvatura contrária à anteriormente observada para o caso do solo Z4.

A coesão tende a diminuir desde a fase mais seca até teores em água muito próximos do teor ótimo (ainda do lado seco) e ascende progressivamente na fase mais húmida, com o aumento daquele teor.

No caso do corte reversivo, o valor da coesão revela sempre crescimento, desde a fase seca até a fase húmida, apresentado uma ligeira descida da taxa desse crescimento para valores maiores de humedecimento do solo.

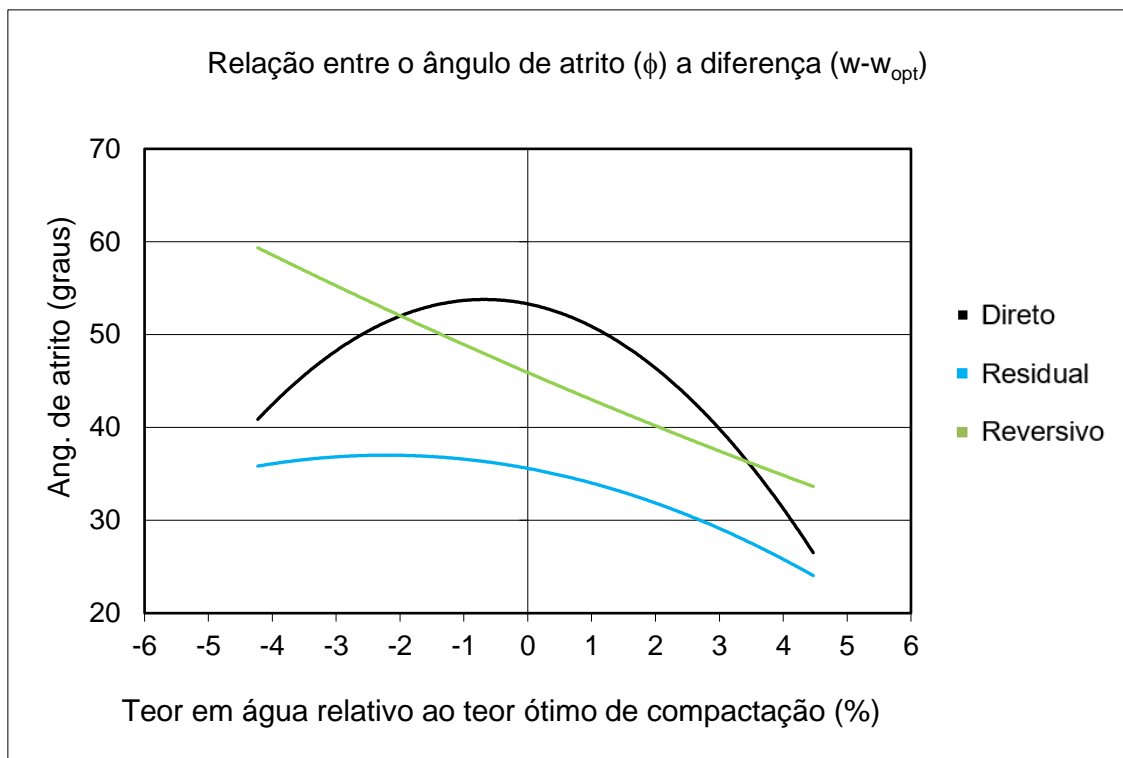


Figura 48 - Relação entre o ângulo de atrito e a diferença entre o teor em água de compactação da série de provetes ($w-w_{opt}$) para os três cortes da amostra Z5.

No que respeita à variação do ângulo de atrito, verifica-se que o corte direto e o corte direto residual exibem desempenhos de parecidos muito embora com uma taxa de crescimento e decréscimo distintas. No CDR ocorre um ligeiro aumento do ângulo de atrito na fase seca até determinado ponto seguindo-se o decréscimo do valor destes parâmetros com o aumento da humidade do solo. Em relação ao CR, pode notar-se uma certa constância na variação deste parâmetro com a variação da humidade, diminuindo desde a fase mais seca até a fase mais húmida.

Já para os resultados do CDR, verificamos que, muito embora a extensão da variação não seja tão expressiva como a verificada para o CD, a variação dos valores de atrito são semelhantes.

Na situação do corte direto, o ângulo de atrito varia de forma gradual com subida do seu valor até o teor ótimo e subsequente descida no estado mais húmido.

5.5.6 Análise geral dos resultados

Analisando os solos de forma geral, são logo visíveis as diferenças nos seus desempenhos. É espectável que alguns solos apresentem comportamentos semelhantes entre si nomeadamente os solos arenosos (Z1, Z2, Z3) e os solos argilosos (Z4 e Z5).

Deste modo será mais correto comparar os solos arenosos entre si, assim como para os argilosos analisando depois as diferenças entre ambos os tipos.

Os solos arenosos (Z1, Z2 e Z3) são muito semelhantes, embora não pertençam às mesmas classes, segundo as diversas classificações usadas.

Observando a coesão para o CD dos três solos arenosos, verifica-se que no Z1 tende a aumentar em função do teor em água. Nos outros dois solos o comportamento é diferente do apresentado pelo Z1, observando-se um desempenho semelhante entre ambos.

Relativamente ao CDR o comportamento é similar ao CD. No solo Z1 ocorre um aumento em função do teor em água, e no solo Z2, Z3 verifica-se o mesmo formato de gráfico. No CR tanto no Z1 como o Z3 apresentam o mesmo comportamento. Para o Z2 o CR apresenta um ligeiro aumento junto ao teor ótimo.

Contudo, em relação à ordem de grandeza dos valores, no CD estes variam entre os 10 – 35 KN/m² para o Z1, para o Z2 entre 15 – 30 KN/m² e para o Z3 entre 0 – 33 KN/m². Para o caso do CDR, a variação de valores de coesão situa-se entre os 10 – 15 KN/m² no Z1, entre 5 – 12 KN/m² no Z2 e entre 5 – 15 KN/m² no Z3.

Outro dos parâmetros analisados é o ângulo de atrito. Este parâmetro, comparativamente à coesão, não apresenta muitas diferenças entre os vários solos.

Para o CD no solo Z1 existe uma diminuição do valor até um pouco abaixo do teor ótimo e subsequente subida em função do aumento do teor em água. Nos solos Z2 e Z3 o comportamento é semelhante com um aumento progressivo até o teor ótimo.

No CDR e CR o desempenho destes solos é muito semelhante só variando a ordem de grandeza valores. No Z1 este desempenho tende a diminuir ligeiramente até estabilizar passando a ser constante ao longo da variação do teor ótimo para a fase mais húmida. Nos solos Z2 e Z3 o desempenho do CDR e CR é também muito semelhante, onde os valores tendem a ser constantes desde a fase mais seca até a fase mais húmida.

Relativamente à ordem de grandeza valores para o CD varia no solo Z1 desde os 27° até os 40°, no Z2 dos 29° até 39° e no Z3 dos 32° até os 42°. Para o CDR entre os três solos não variam mais que 5° e andam na casa dos 30°, em comparação para o CR onde os valores são os mais elevados dos três cortes, rondando a casa dos 50°.

Assim, de uma primeira análise dos solos arenosos verificou-se que existem algumas diferenças entre eles, tendo os solos Z2 e Z3 um comportamento mais idêntico.

Analisando a coesão para os solos argilosos tentou-se verificar se ocorriam semelhanças no seu comportamento. Observando o solo Z4 tanto para o CD, CDR e CR o gráfico de desempenho é semelhante variando apenas a ordem de grandeza de valores. Nos três casos ocorre um aumento da coesão até atingir um pico máximo ainda antes do teor ótimo e conseqüente descida até a fase mais húmida.

Verifica-se que a o CD possui os maiores valores chegando a atingir 280 KN/m^2 , enquanto que para o CDR, se atingiram valores de 120 KN/m^2 e no CR 160 KN/m^2 .

Para este solo Z4, verificou-se que o seu comportamento é diferente dos observados para solos argilosos, constantes no estudo idêntico realizado (Faria, 2005), estudo esse que consta da pesquisa bibliográfica efetuada. Um dos motivos pode dever-se do facto deste solo se comportar parcialmente como um solo arenoso devido à presença de pequenos aglomerados no solo, que se comportam como partículas. Na fotografia da figura 49 é possível verificar este facto.



Figura 49 - Fotografia da caixa de corte com a amostra Z4, onde se notam pontos mais claros correspondentes a aglomerados de partículas cortados.

Examinando os resultados obtidos para o solo Z5, observa-se que a coesão apresenta um comportamento muito distinto do verificado para o solo Z4. Por outro lado, nota-se que existe semelhança no comportamento deste parâmetro para o CD e o CDR onde se nota uma diminuição dos seus valores em direção do teor ótimo, passando depois a aumentar com o aumento do teor em água. No CR observa-se um aumento dos seus valores desde a fase mais seca até a fase mais húmida. A ordem de grandeza de valores é substancialmente menor comparativamente ao solo anterior analisado. Para o CD, a coesão varia entre os 0 e 55 KN/m², no CDR entre os 0 e 35 KN/m² e no CR entre os 0 e os 70 KN/m².

No que respeita ao ângulo de atrito, verifica-se que a tendência de variação é distinta da observada para a coesão, tanto para o solo Z4 como para o solo Z5. Assim, no solo Z4 o CD, CDR e CR registam uma diminuição dos valores de atrito até atingir um mínimo próximo do teor ótimo e subsequente subida. O CD exhibe valores que oscilam entre os 43° e os 15°, para o CDR 35° e 12° e no CR 58° e 28°.

Já no caso do solo Z5 no CD e CDR, observa-se um aumento dos valores de ângulo de atrito com o aumento do teor em água até próximo do teor ótimo, ponto a partir do qual se regista a descida daquele parâmetro, sendo a amplitude desta variação mais acentuada no CD do que no CDR. O CR apresenta um decréscimo dos valores desde a fase seca até a fase húmida.

No que se refere á ordem de grandeza dos valores, para o CD estes variam entre os 53° e 28°, no CDR entre 38° e os 25° e, por último no CR os valores oscilam entre os 59° e 34°.

5.6 Geoslope

Através do software Geoslope realizaram-se vários cálculos de estabilidade usando para o efeito os três métodos de cálculo anteriormente referidos (Bishop, Spencer e Janbu), obtendo-se, para cada caso o correspondente círculo de rotura crítico e o valor de fator de segurança a ele associado.

Na tabela seguinte (tabela 29) está ilustrado o número de cálculos efetuados para os diversos solos tendo em conta a variação dos seus parâmetros de resistência ao corte (coesão e ângulo de atrito) com a humidade do solo e as diversas geometrias de talude adotadas. No seu conjunto, realizaram-se 544 cálculos de estabilidade.

Tabela 29 – Quantidade de cálculos efetuados com o Geoslope.

Método	Tipo de ensaio	Nº simulações
Bishop	CD	94
	CDR	90
Janbu	CD	90
	CDR	90
Spencer	CD	90
	CDR	90
Nº total = 544		

Como já foi oportunamente mencionado, dos ensaios realizados obtiveram-se três valores de resistência: resistência de pico, resistência residual para o corte direto, e resistência de pico do corte reversivo, para provetes compactados com diferentes teores em água.

Pretendia-se, entretanto, realizar o cálculo de estabilidade de vários taludes de aterro (com diferente altura e/ou inclinação) considerando que a compactação dos solos na execução desses aterros, foi efetuada com determinado teor em água, de modo a perceber como varia o fator de segurança em função do teor em água usado na construção do aterro. Interessava avaliar esta situação para aterros compactados com solos humedecidos com o teor ótimo e teores deste distanciados (abaixo e acima) em 3%.

Assim, atendendo a que nos ensaios os provetes não foram humedecidos exatamente com esses teores, determinaram-se os valores de coesão e ângulo de atrito para esses teores a partir dos gráficos anteriormente apresentados.

Do mesmo modo, determinou-se o valor da densidade a usar em cada caso, a partir da curva Proctor correspondente. Os valores assim determinados apresentam-se nas tabelas seguintes (30 e 31).

Tabela 30 - Resultados do ensaio de Proctor com a diferença de -3% em relação ao teor ótimo.

Amostra	Teor ótimo (%) – 3%	Baridade (g/cm³)	Baridade (KN/m³)
Z1	3,5	1,78	17,4
Z2	10	1,69	16,5
Z3	8,5	1,73	16,9
Z4	15,5	1,68	16,4
Z5	9,7	1,88	18,4

Tabela 31 - Resultados do ensaio de Proctor com a diferença de +3% em relação ao teor ótimo.

Amostra	Teor ótimo (%) +3%	Baridade (g/cm³)	Baridade (KN/m³)
Z1	9.5	1,74	17,0
Z2	16	1,68	16,4
Z3	14.5	1,75	17,1
Z4	21.5	1,68	16,4
Z5	15.7	1,89	18,5

Para a realização dos cálculos de estabilidade apenas foram utilizados os valores correspondentes do CD e do CDR, por serem os mais relevantes.

Efetivamente a não realização destes cálculos para os valores do CR, prendeu-se no facto de que os parâmetros de resistência para este corte serem elevados, e deste modo nos conduziram a uma majoração dos valores do fator de segurança. Ou seja, a utilização destes valores nos cálculos de estabilidade não estaria do lado da segurança.

Os quadros (32 a 41) representam a síntese de dados retirados graficamente, como referido anteriormente. Nos cálculos de estabilidade, nas situações em que graficamente se obteve valor negativo para coesão, utilizou-se coesão nula

Tabela 32 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação ± 3% do teor ótimo na amostra Z1.

Direto Z1	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	3,5	6,50	9,50
C (KN/m ²)	11,99	31,08	35,79
φ (°)	36,41	27,30	48,67

Tabela 33 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto(residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z1.

Residual Z1	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	3,5	6,50	9,50
C (KN/m ²)	9,43	13,35	16,13
φ (°)	33,45	30,27	31,51

Tabela 34 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z2.

Direto Z2	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	10	13	16
C (KN/m ²)	24,91	11,34	-10,57
φ (°)	32,87	38,92	47,72

Tabela 35 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z2.

Residual Z2	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	10	13	16
C (KN/m ²)	11,45	5,79	-4,28
φ (°)	29,90	31,43	34,19

Tabela 36 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z3.

Direto Z3	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	8,5	11,5	14,5
C (KN/m ²)	30,03	14,39	-17,61
φ (°)	33,95	38,53	45,67

Tabela 37 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z3.

Residual Z3	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	8,5	11,5	14,5
C (KN/m ²)	9,69	5,42	-1,69
φ (°)	30,32	31,29	33,04

Tabela 38 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z4.

Direto Z4	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	15,5	18,5	21,5
C (KN/m ²)	253,71	258,70	17,05
φ (°)	26,26	15,77	38,24

Tabela 39 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z4.

Residual Z4	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	15,5	18,5	21,5
C (KN/m ²)	117,68	109,69	-8,59
φ (°)	17,36	13,20	25,71

Tabela 40 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z5.

Direto Z5	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	9,7	12,70	15,70
C (KN/m ²)	9,53	0,92	22,24
φ (°)	48,26	53,30	43,57

Tabela 41 - Valores de Coesão (KN/m²) e ângulo de atrito (°) do corte direto (residual) com variação de ± 3% do teor ótimo na amostra Z5.

Residual Z5	Wotp – 3%	Wotp	Wotp + 3%
W (%)	9,7	12,70	15,70
C (KN/m ²)	10,13	-1,28	11,21
φ (°)	36,83	35,58	30,64

Com base nestes dados, procedeu-se ao cálculo de estabilidade dos taludes, considerando as várias geometrias definidas e segundo os diferentes métodos adotados. A totalidade dos resultados assim obtidos para cada solo, constam nas tabelas que são apresentadas ao longo do texto abaixo.

Como resultado de cada cálculo, o programa elabora um relatório e gera uma imagem com os aspetos mais importantes do resultado. Na figura 50, apresenta-se como exemplo de resultado gráfico, a imagem gerada para um cálculo realizado para o solo Z1, com o método Bishop.

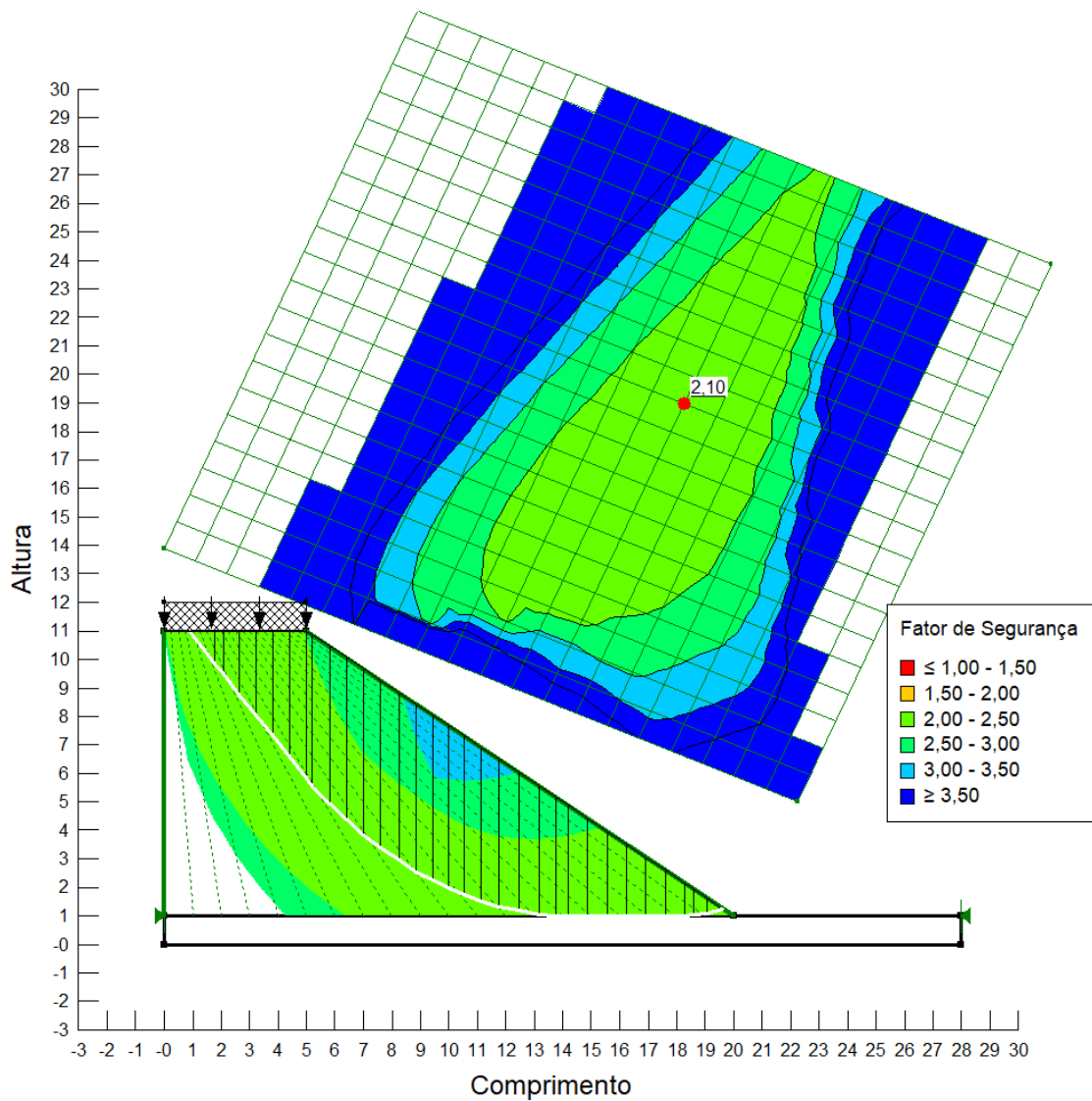


Figura 50 - Resultado do cálculo da estabilidade, pelo método de Bishop, através do programa Geoslope.

O exemplo acima corresponde ao cálculo de estabilidade para os dados do corte direto, obtidos com provetes do solo Z1, compactados com teor ótimo. O talude de aterro possui dimensões de 10m de altura e 15m de comprimento (inclinação de 1:1,5).

O programa determina todas as soluções possíveis e assinala com um ponto a vermelho o fator de segurança mínimo que corresponde à superfície crítica de rotura. Na imagem, a linha branca assinalada no corte transversal do aterro, corresponde à superfície de rotura associada ao valor do fator de segurança, estando indicado na planta com um ponto a vermelho.

Por cada cálculo realizado obteve-se uma imagem do mesmo tipo constante da figura 50, perfazendo um total de 544 imagens obtidas, número que inviabiliza a apresentação de todas elas neste documento, levando a que os resultados fossem assim apresentados na sua totalidade apenas sob a forma de tabelas, sendo as respectivas imagens apresentadas em anexo.

Todavia, devido ao volume de dados que se obtiveram, bem como à semelhança dos resultados obtidos pelo cálculo com os diferentes métodos, optou-se por analisar com mais detalhe, somente os resultados segundo o método Bishop, por ser o mais comumente usado em projetos de execução de empreendimentos viários.

Para a situação do talude com inclinação de 1:1,5 (V:H) de um aterro com 10 metros de altura, construído com o solo Z3, determinaram-se os parâmetros de resistência ao corte e de baridade, para os seguintes teores em água: ótimo -3%; ótimo -2%; ótimo -1%; ótimo; ótimo +1%; ótimo +2% e ótimo +3%. Com estes dados, realizaram-se os cálculos de estabilidade pela aplicação do método de Bishop, cujos resultados se apresentam projetados no gráfico constante da figura 51.

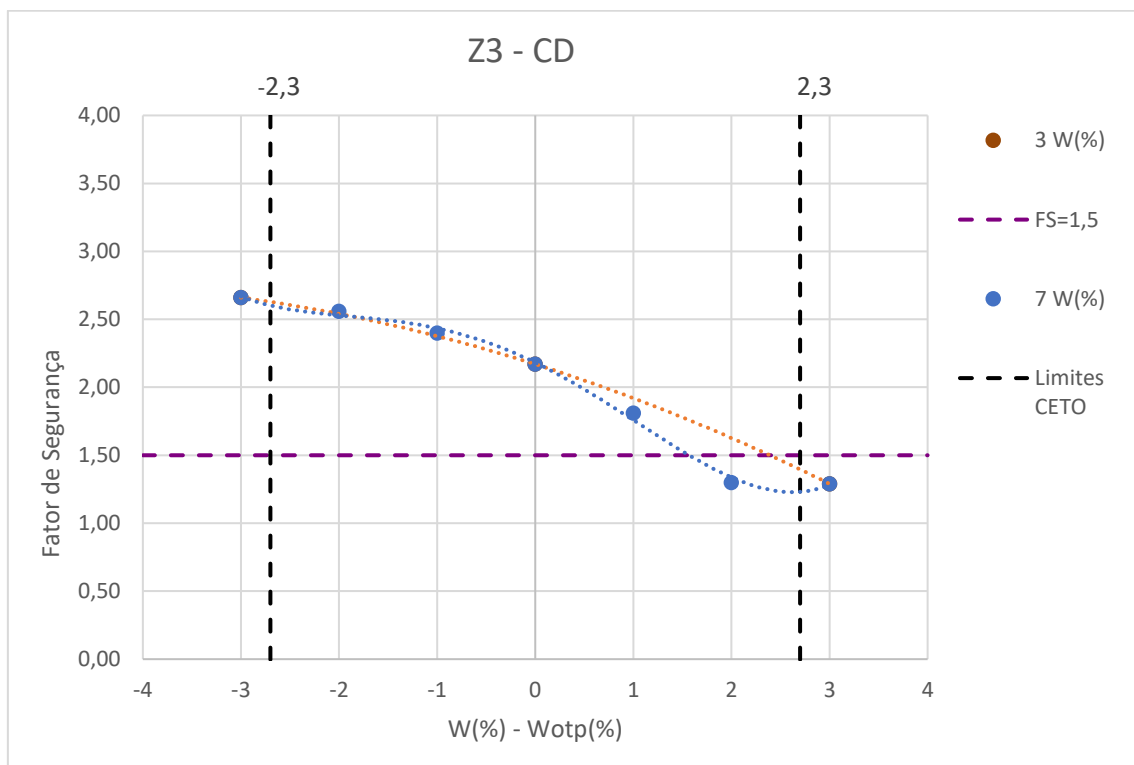


Figura 51 - Comportamento do fator de segurança com 3 e 7 teores em água para o solo Z3 com os parâmetros de resistência do CD.

Neste gráfico, para além do registo dos resultados dos cálculos de estabilidade, estão assinaladas três linhas importantes que ajudam a interpretar os resultados:

- Uma linha horizontal correspondente ao valor de $FS=1,5$, que facilita a perceção das situações em que o valor de FS para a situação crítica é aceitável;
- Duas linhas verticais que correspondem aos limites (inferior e superior) definidos no CETO para aceitação do estado de humidade do solo compactado.

No presente gráfico existem duas linhas com três e sete pontos. Com três pontos estão projetados os valores de FS para -3%, ótimo e +3% e com sete pontos os valores de FS para -3%, -2%, -1%, ótimo, +1%, +2% e +3%. Esta projeção teve como objetivo compreender mais detalhadamente a tendência dos valores e qual a linha de melhor ajuste.

Importa referir que as linhas de tendência com que se ligam os diversos pontos de cada caso, correspondem a um ajustamento polinomial de grau 4, com valor de regressão superior a 0,99. Assim, para as restantes situações em que se apresentam gráficos deste tipo, construídos somente com dados do FS para três valores de teor em água (ótimo -3, ótimo e ótimo +3), este foi o tipo de ajustamento considerado.

Nas Figuras 52 e 53, apresentam-se os gráficos compostos pelos resultados obtidos para o fator de segurança crítico de taludes de aterro construídos com alturas e/ou inclinações distintas, considerando três teores em água para cada caso. O gráfico da figura 52 corresponde aos valores da tensão de pico do corte direto, enquanto que o gráfico da figura 53 diz respeito aos valores da tensão residual do mesmo corte.

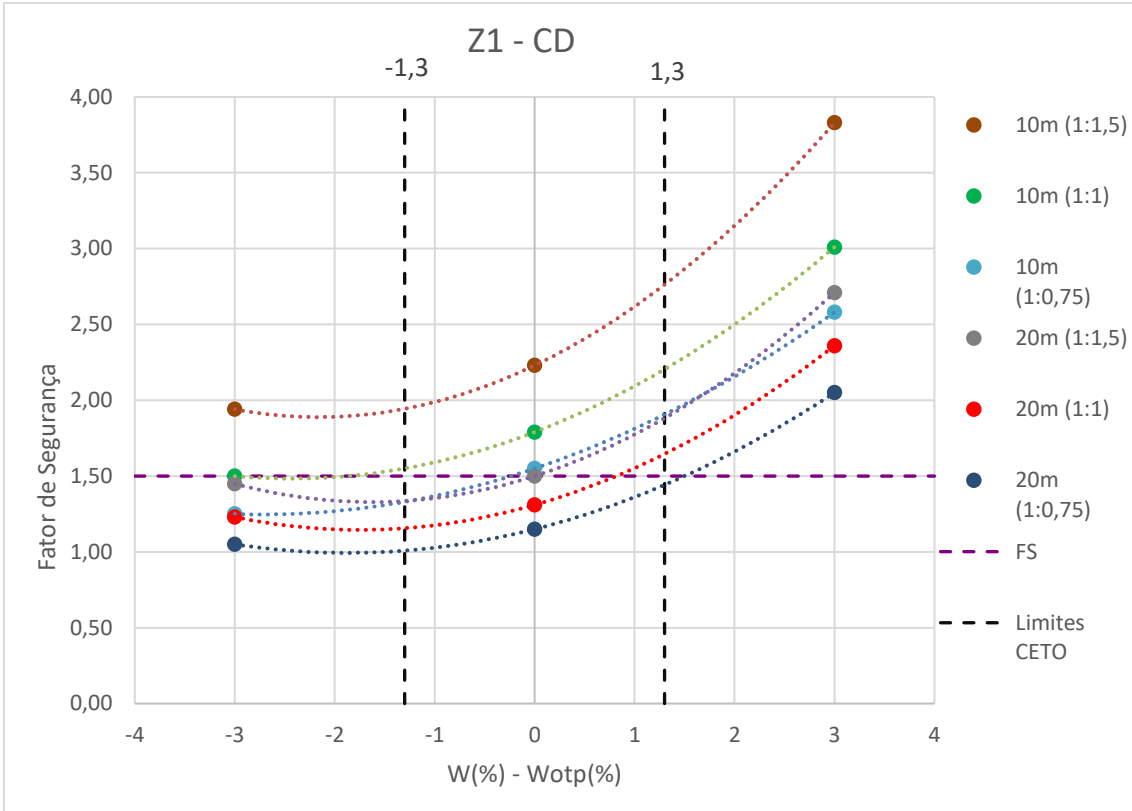


Figura 52 – Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z1 CD.

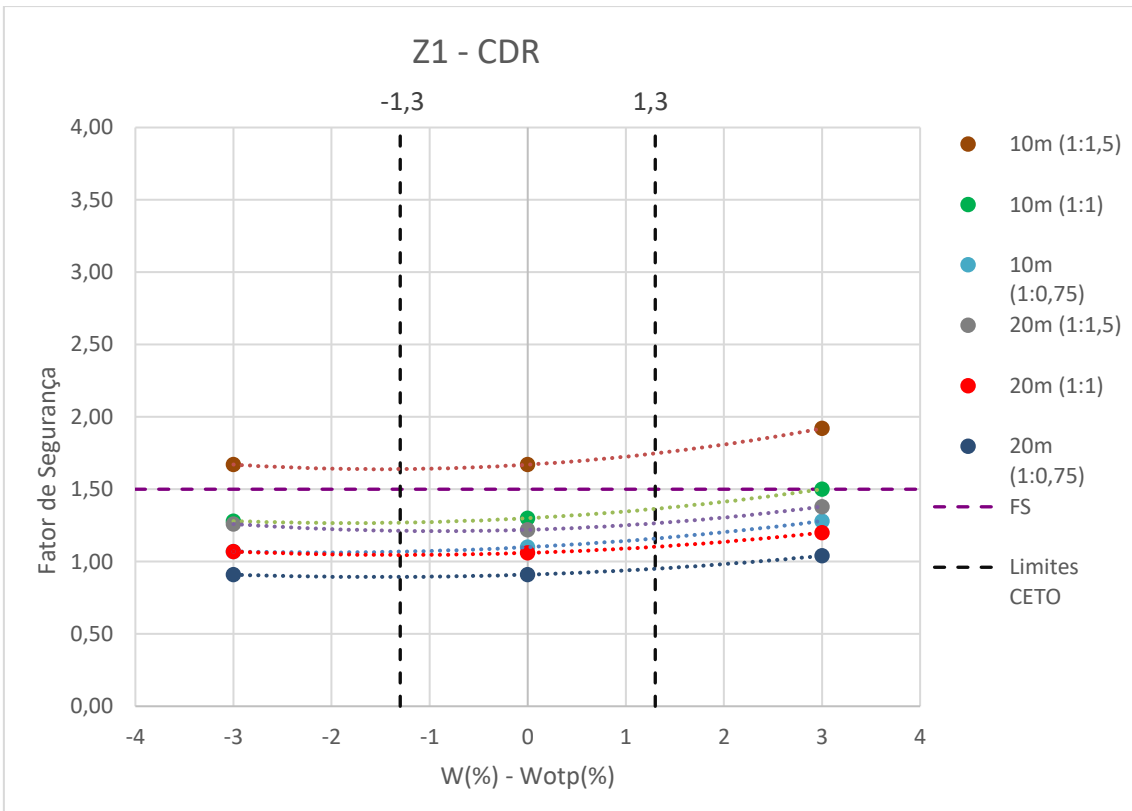


Figura 53 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z1 CDR.

Pela observação das figuras 52 e 53, podemos concluir que são aceitáveis apenas as geometrias assinaladas abaixo:

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CD, para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS \geq 1,5 em todas as situações.
- Inclinação 1:1 – FS \geq 1,5 em todas as situações, muito embora para valores de humidade entre o limite inferior do CETO e o valor correspondente ao teor ótimo -3% estejam no limiar do FS aceitável.
- Inclinação 1:0,75 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade iguais ou superiores ao teor ótimo.

Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade iguais ou superiores ao teor ótimo.
- Inclinação 1:1 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade superiores ao teor ótimo +0,8%.
- Inclinação 1:0,75 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade maiores que o limite máximo do CETO.

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CDR para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS \geq 1,5 em todas as situações.

Gráficos idênticos foram elaborados para os resultados conseguidos para a amostra Z2. Estes constam das figuras 54 e 55.

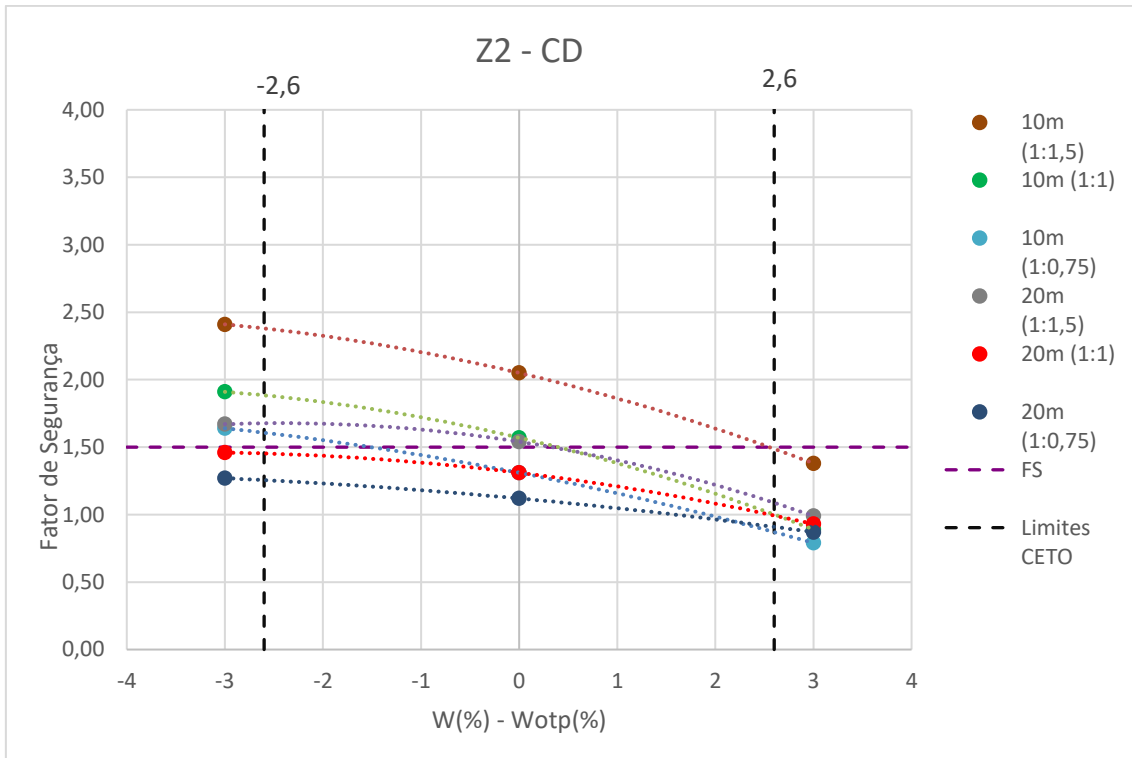


Figura 54 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z2 CD.

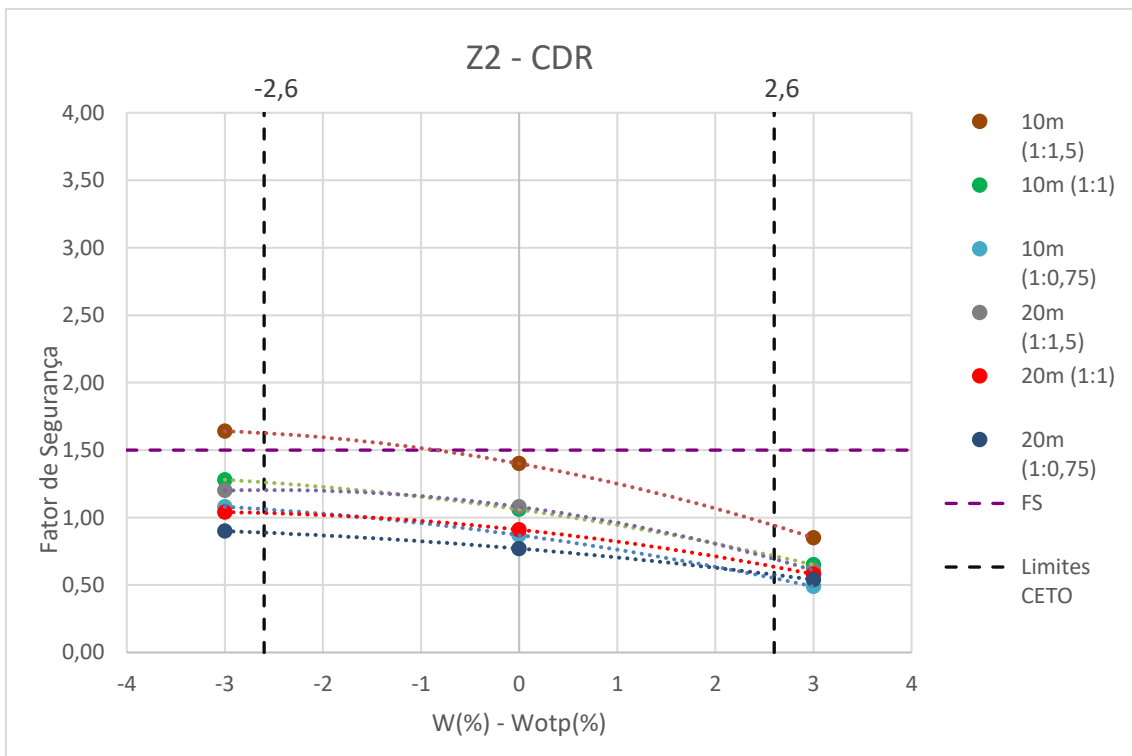


Figura 55 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z2 CDR.

Pela observação das figuras 54 e 55, podemos concluir que são aceitáveis apenas as geometrias assinaladas abaixo:

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CD, para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ para todas as situações até ao limite superior do CETO.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo +0,3%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores inferiores ao ótimo – 1,5%.

Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade de humidade até cerca do ótimo + 0,5%.

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CDR para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade apenas para valores inferiores ao ótimo – 0,8%.

Nas figuras 56 e 57, são apresentados os gráficos correspondentes ao solo Z3

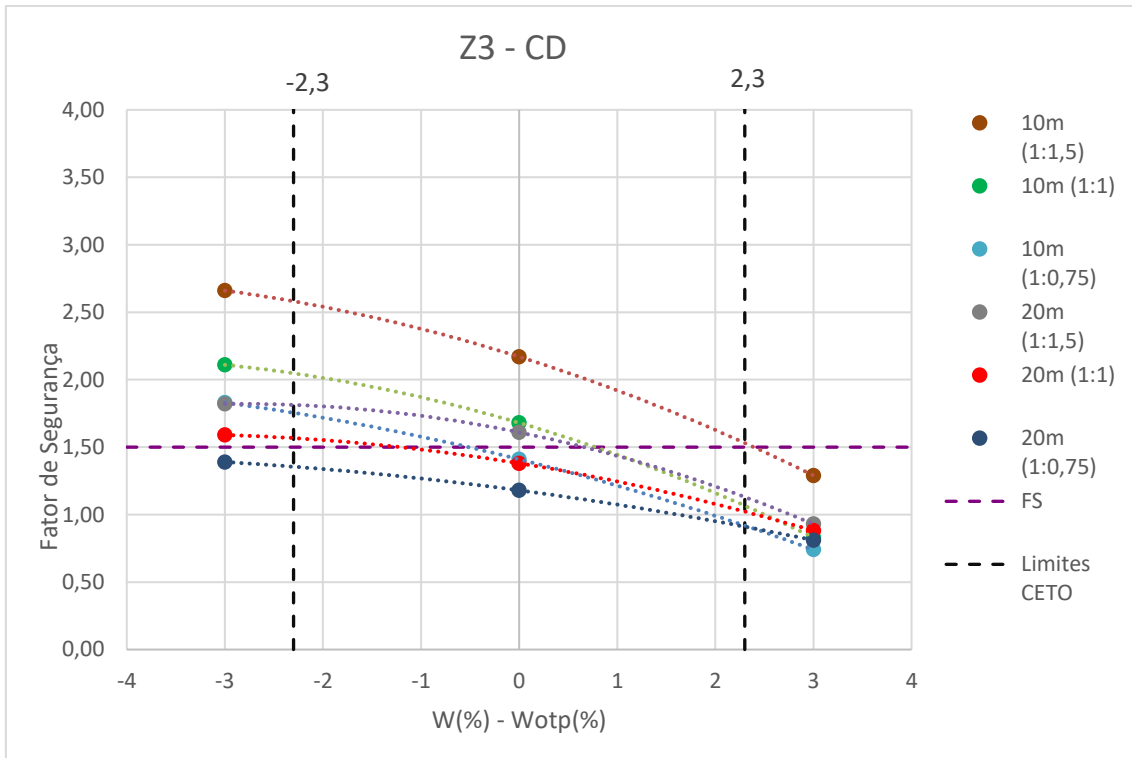


Figura 56 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z3 CD.

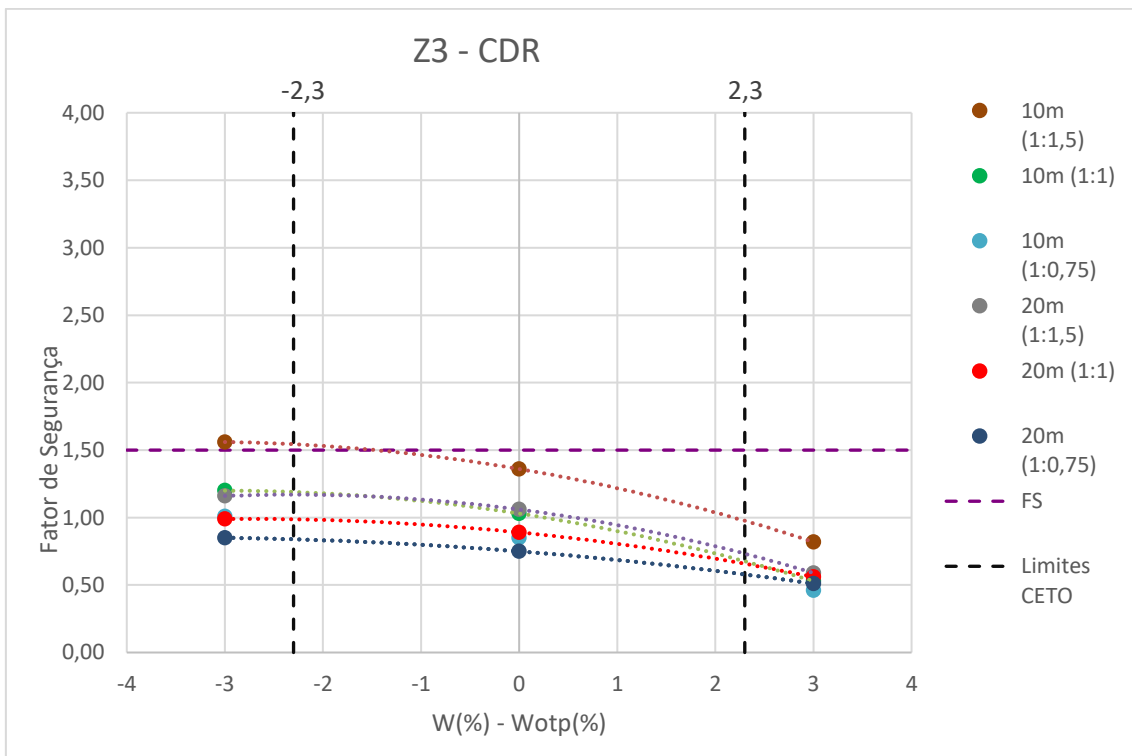


Figura 57 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z3 CDR.

Pela observação das figuras 56 e 57, podemos concluir que são aceitáveis apenas as geometrias assinaladas abaixo:

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CD, para a gama de teores de humidade considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ para todas as situações até ao limite superior do CETO.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo +0,7%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo - 0,5%.

Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS ≥ 1 , apenas para valores de humidade até cerca do ótimo +0,7%.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo - 1,1%.

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CDR para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS ≥ 1 , apenas para valores de humidade até cerca do ótimo - 1,3%.

Para o solo Z4 também se realizou o cálculo de estabilidade para as três inclinações de talude e duas alturas de aterro, cujos resultados se apresentam nas tabelas 49 e 50, apresentando-se ainda nos gráficos das figuras 58 e 59, os resultados obtidos apenas pela aplicação do método de Bishop.

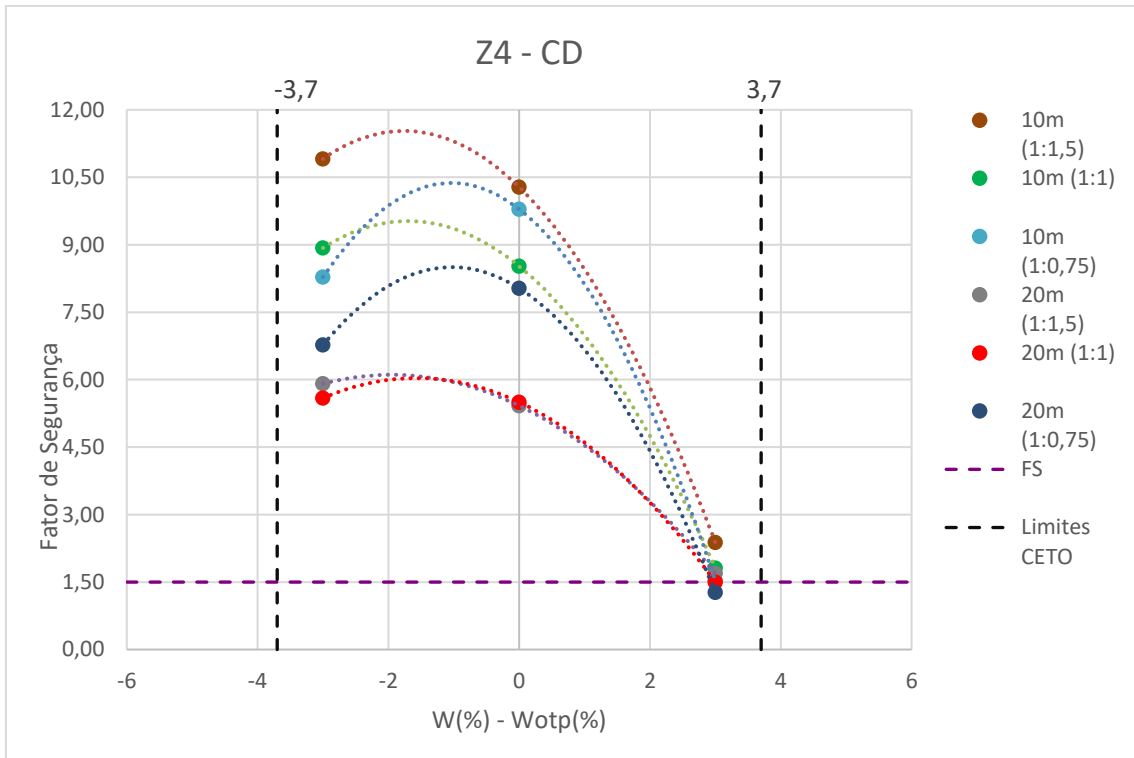


Figura 58 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z4 CD.

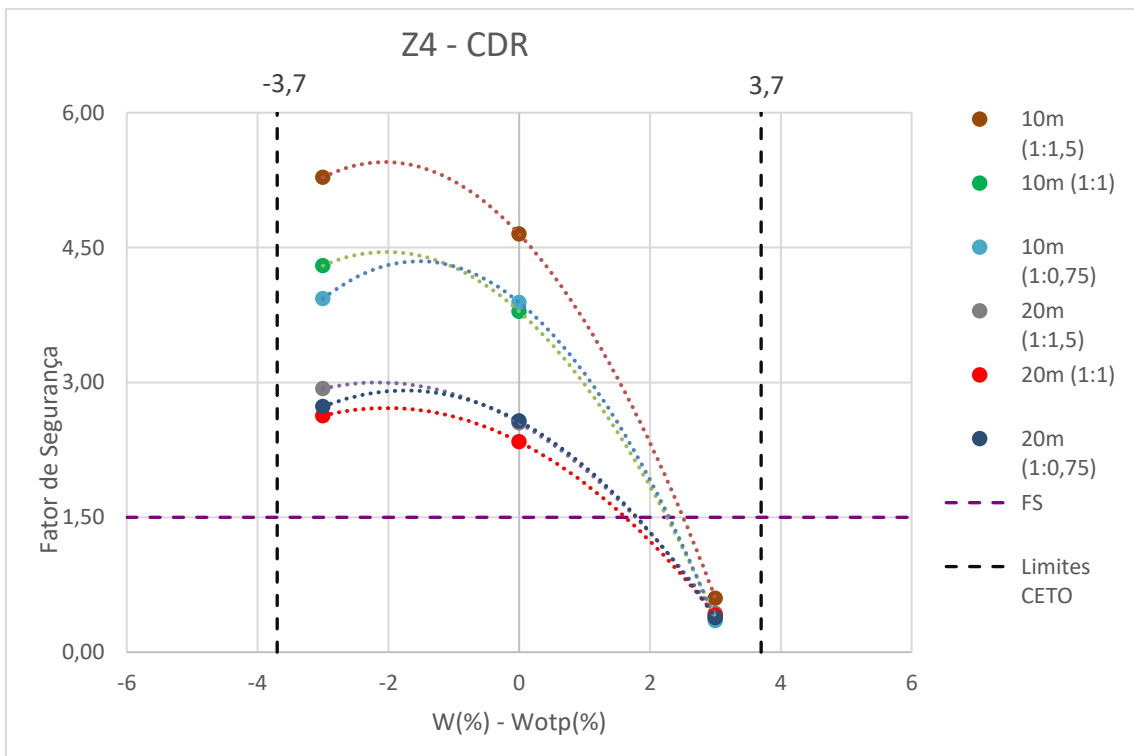


Figura 59 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z4 CDR.

Pela observação das figuras 58 e 59, podemos concluir que são aceitáveis apenas as geometrias assinaladas abaixo:

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CD, para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.

Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 3%.

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CDR para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 2,6%.
- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 2,4%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 2,4%.

Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 1,7%.

- Inclinação 1:1 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 1,5%.
- Inclinação 1:0,75 – FS $\geq 1,5$ apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 1,7%.

Nas tabelas 51 e 52, apresentam-se os resultados relativos aos cálculos de estabilidade efetuados para o solo Z5, considerando o solo compactado com os três teores em água.

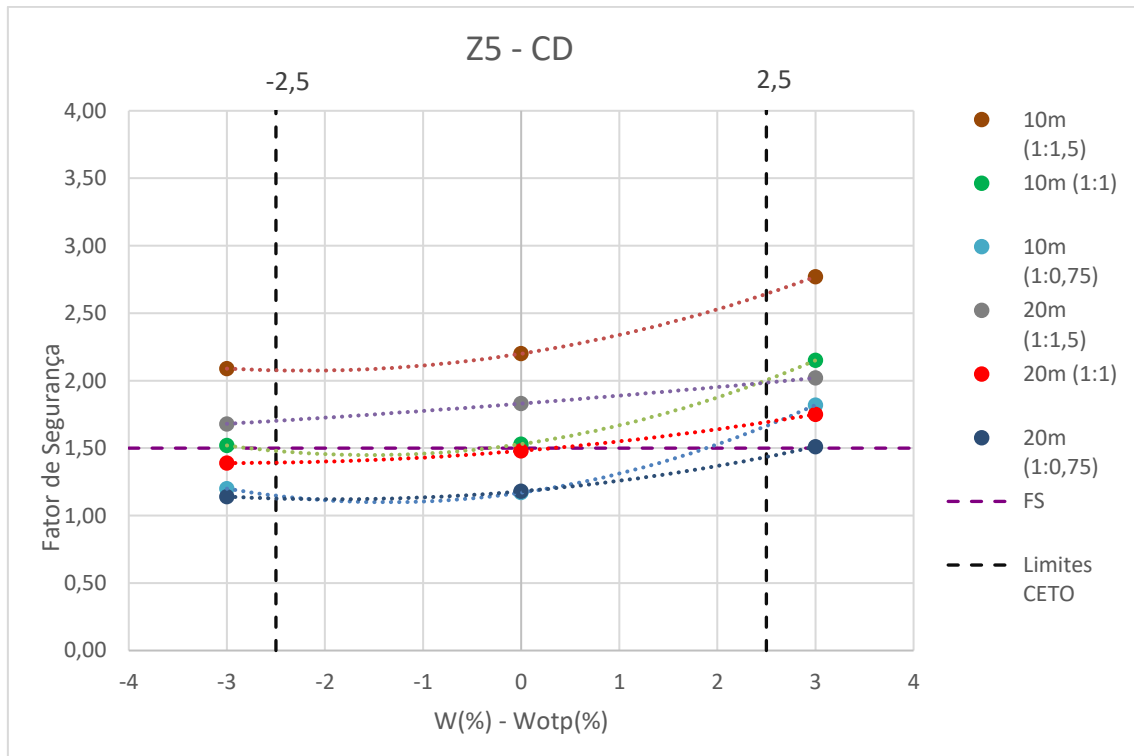


Figura 60 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z5 CD.

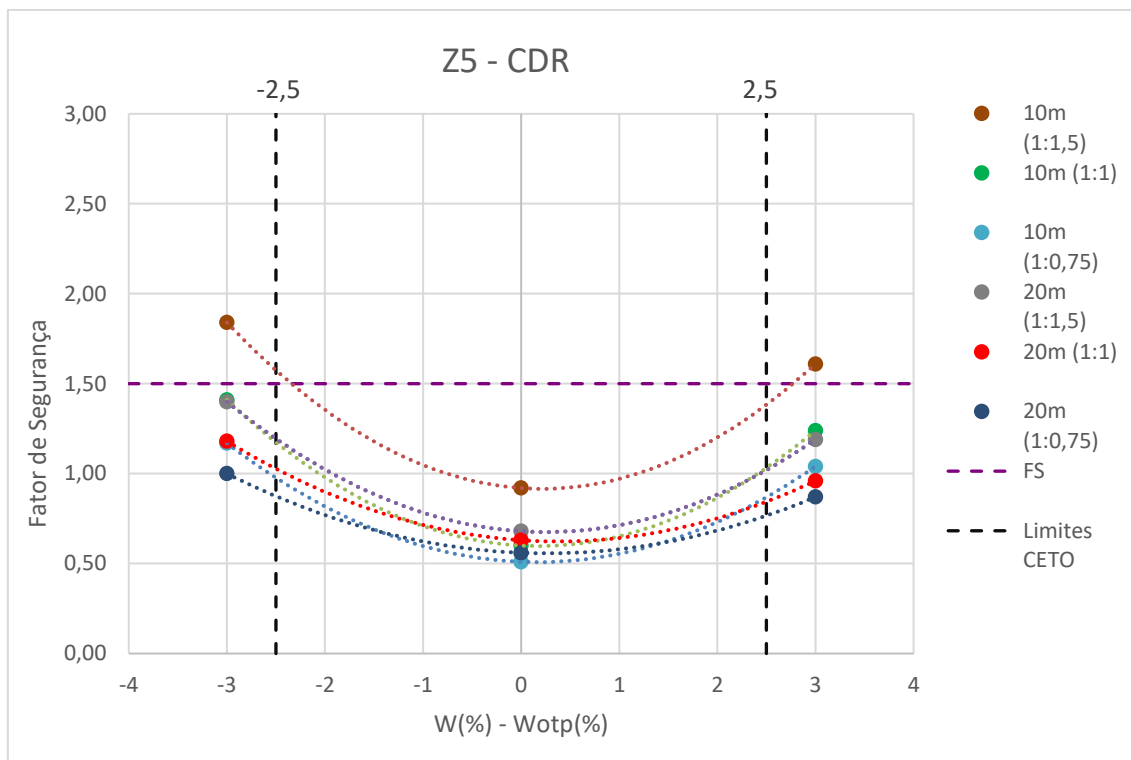


Figura 61 - Gráfico de Fatores de segurança e a variação do teor em água para o solo Z5 CDR.

Pela observação das figuras 60 e 61, podemos concluir que são aceitáveis apenas as geometrias assinaladas abaixo:

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CD, para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS \geq 1,5 em todas as situações.
- Inclinação 1:1 – FS \geq 1,5 em todas as situações.
- Inclinação 1:0,75 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade até cerca do ótimo + 1,7%.

- Aterros com altura de 20 m:

- Inclinação 1:1,5 – FS \geq 1,5 em todas as situações.
- Inclinação 1:1 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade acima do ótimo.
- Inclinação 1:0,75 – FS \geq 1,5 apenas para valores de humidade acima do limite do CETO.

- Cálculos de estabilidade com base nos parâmetros de CDR para a gama de teores em água considerados:

Aterros com altura de 10 m:

- Inclinação 1:1,5 – $FS \geq 1,5$ apenas para valores de humidade superiores ao limite superior do CETO e inferiores ao limite inferior do CETO.

Tabela 42 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z1.

Solo Z1										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-W _{opt} (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,94	1,96	1,83	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	2,23	2,27	2,10	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	3,83	3,88	3,59	
		3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,50	1,52	1,41	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,79	1,66	1,10	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	3,01	3,00	2,86	
	1:1	1:0,75	3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,25	1,08	1,20
			6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,55	1,47	1,51
			9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,58	2,10	2,49
		1:1,5	3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,45	1,45	1,36
			6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,50	1,49	1,38
			9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,71	2,71	2,53
20 m	1:1	3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,23	1,24	1,17	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,31	1,21	1,22	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,36	2,24	2,21	
		3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,05	1,07	1,00	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,15	1,15	1,07	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,05	2,08	1,94	
	1:0,75	3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,05	1,07	1,00	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,15	1,15	1,07	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,05	2,08	1,94	
		3,5	-3	11,99	36,41	17,4	1,05	1,07	1,00	
		6,5	0	31,08	27,30	19,1	1,15	1,15	1,07	
		9,5	3	35,79	48,67	17,0	2,05	2,08	1,94	

Tabela 43 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z1.

Solo Z1										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	1,67	1,69	1,58	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	1,67	1,69	1,57	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,92	1,94	1,80	
		3,5	-3	9,43	33,45	17,4	1,28	1,26	1,21	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	1,30	1,32	1,23	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,50	0,82	1,43	
	1:1	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	1,07	1,03	1,03	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	1,10	0,96	1,03	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,28	1,09	1,24	
		3,5	-3	9,43	33,45	17,4	1,26	1,26	1,19	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	1,22	1,22	1,15	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,38	1,38	1,29	
20 m	1:1,5	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	1,07	1,08	1,01	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	1,06	1,06	0,99	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,20	1,20	1,12	
		3,5	-3	9,43	33,45	17,4	0,91	0,92	0,86	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	0,91	0,91	0,91	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,04	1,04	0,98	
	1:1	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	0,91	0,92	0,86	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	0,91	0,91	0,91	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,04	1,04	0,98	
		3,5	-3	9,43	33,45	17,4	0,91	0,92	0,86	
		6,5	0	13,35	30,27	19,1	0,91	0,91	0,91	
		9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,04	1,04	0,98	
1:0,75	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	0,91	0,92	0,86		
	6,5	0	13,35	30,27	19,1	0,91	0,91	0,91		
	9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,04	1,04	0,98		
	3,5	-3	9,43	33,45	17,4	0,91	0,92	0,86		
	6,5	0	13,35	30,27	19,1	0,91	0,91	0,91		
	9,5	3	16,13	31,51	17,0	1,04	1,04	0,98		

Tabela 44 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z2.

Solo Z2										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	10	-3	24,91	32,87	16,5	2,41	2,44	2,26	
		13	0	11,34	38,92	16,9	2,05	2,07	1,94	
		16	3	-10,57	47,72	16,4	1,38	1,47	1,34	
		10	-3	24,91	32,87	16,5	1,91	1,76	1,81	
		13	0	11,34	38,92	16,9	1,57	1,58	1,49	
		16	3	-10,57	47,72	16,4	0,89	0,96	0,83	
	1:1	1:0,75	10	-3	24,91	32,87	16,5	1,64	1,52	1,59
			13	0	11,34	38,92	16,9	1,31	1,24	1,26
			16	3	-10,57	47,72	16,4	0,79	0,81	0,71
		1:1,5	10	-3	24,91	32,87	16,5	1,67	1,67	1,55
			13	0	11,34	38,92	16,9	1,54	1,54	1,45
			16	3	-10,57	47,72	16,4	0,99	1,12	0,95
20 m	1:1	10	-3	24,91	32,87	16,5	1,46	1,46	1,35	
		13	0	11,34	38,92	16,9	1,31	1,32	1,24	
		16	3	-10,57	47,72	16,4	0,93	1,02	0,93	
	1:0,75	10	-3	24,91	32,87	16,5	1,27	1,24	1,19	
		13	0	11,34	38,92	16,9	1,12	1,13	1,06	
		16	3	-10,57	47,72	16,4	0,87	0,87	0,86	

Tabela 45 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z2.

Solo Z2										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	10	-3	11,45	29,90	16,5	1,64	1,67	1,55	
		13	0	5,79	31,43	16,9	1,40	1,41	1,33	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,85	0,91	0,83	
		10	-3	11,45	29,90	16,5	1,28	1,30	1,21	
		13	0	5,79	31,43	16,9	1,06	1,07	1,00	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,65	0,60	0,51	
	1:0,75	10	-3	11,45	29,90	16,5	1,08	0,94	1,04	
		13	0	5,79	31,43	16,9	0,87	0,84	0,83	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,49	0,50	0,44	
		10	-3	11,45	29,90	16,5	1,20	1,21	1,13	
		13	0	5,79	31,43	16,9	1,08	1,07	1,02	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,61	0,69	0,59	
20 m	1:1,5	10	-3	11,45	29,90	16,5	1,04	1,04	0,97	
		13	0	5,79	31,43	16,9	0,91	0,91	0,86	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,58	0,63	0,57	
		10	-3	11,45	29,90	16,5	0,90	0,90	0,84	
		13	0	5,79	31,43	16,9	0,77	0,77	0,73	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,54	0,53	0,53	
	1:1	10	-3	11,45	29,90	16,5	1,04	1,04	0,97	
		13	0	5,79	31,43	16,9	0,91	0,91	0,86	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,58	0,63	0,57	
		10	-3	11,45	29,90	16,5	0,90	0,90	0,84	
		13	0	5,79	31,43	16,9	0,77	0,77	0,73	
		16	3	-4,28	34,19	16,4	0,54	0,53	0,53	
1:0,75	10	-3	11,45	29,90	16,5	1,04	1,04	0,97		
	13	0	5,79	31,43	16,9	0,91	0,91	0,86		
	16	3	-4,28	34,19	16,4	0,58	0,63	0,57		
	10	-3	11,45	29,90	16,5	0,90	0,90	0,84		
	13	0	5,79	31,43	16,9	0,77	0,77	0,73		
	16	3	-4,28	34,19	16,4	0,54	0,53	0,53		

Tabela 46 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z3.

Solo Z3										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	8,5	-3	30,03	33,95	16,9	2,66	2,69	2,49	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	2,17	2,20	2,05	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	1,29	1,38	1,24	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	2,11	1,99	2,01	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,68	1,71	1,59	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,83	0,91	0,78	
	1:0,75	8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,83	1,69	1,77	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,41	1,28	1,36	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,74	0,75	0,68	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,82	1,82	1,68	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,61	1,61	1,51	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,93	1,06	0,89	
20 m	1:1	14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,88	0,95	0,86	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,38	1,38	1,30	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,59	1,59	1,48	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,88	0,95	0,86	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,38	1,38	1,30	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,39	1,42	1,30	
	1:0,75	11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,18	1,19	1,12	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,81	0,81	0,80	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,39	1,42	1,30	
		11,5	0	14,39	38,53	17,3	1,18	1,19	1,12	
		14,5	3	-17,61	45,67	17,1	0,81	0,81	0,80	
		8,5	-3	30,03	33,95	16,9	1,39	1,42	1,30	

Tabela 47 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z3.

Solo Z3										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	8,5	-3	9,69	30,32	16,9	1,56	1,58	1,47	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	1,36	1,38	1,30	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,82	0,88	0,79	
		8,5	-3	9,69	30,32	16,9	1,20	1,22	1,14	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	1,03	1,04	0,97	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,53	0,58	0,49	
	1:0,75	8,5	-3	9,69	30,32	16,9	1,01	0,68	0,97	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	0,85	0,70	0,81	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,46	0,48	0,43	
		8,5	-3	9,69	30,32	16,9	1,16	1,16	1,09	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	1,06	1,05	1,00	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,59	0,67	0,57	
20 m	1:1	8,5	-3	9,69	30,32	16,9	0,99	1,00	0,94	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	0,89	0,89	0,84	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,56	0,60	0,54	
		8,5	-3	9,69	30,32	16,9	0,85	0,86	0,81	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	0,75	0,75	0,71	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,51	0,51	0,51	
	1:0,75	8,5	-3	9,69	30,32	16,9	0,85	0,86	0,81	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	0,75	0,75	0,71	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,51	0,51	0,51	
		8,5	-3	9,69	30,32	16,9	0,85	0,86	0,81	
		11,5	0	5,42	31,29	17,3	0,75	0,75	0,71	
		14,5	3	-1,69	33,04	17,1	0,51	0,51	0,51	

Tabela 48 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z4.

Solo Z4										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	10,91	10,92	10,08	
		18,5	0	258,70	15,77	16,9	10,28	10,33	9,57	
		21,5	3	17,05	39,24	16,4	2,38	2,41	2,23	
		15,5	-3	253,71	26,26	16,4	8,93	8,52	8,77	
		18,5	0	258,70	15,77	16,9	8,52	8,67	8,20	
		21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,81	1,85	1,71	
	1:1	1:0,75	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	8,28	11,55	8,14
			18,5	0	258,70	15,77	16,9	9,79	11,42	8,17
			21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,53	1,35	1,48
		1:1,5	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	5,91	5,49	5,52
			18,5	0	258,70	15,77	16,9	5,42	5,83	5,11
			21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,69	1,69	1,59
20 m	1:1	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	5,59	1,18	5,16	
		18,5	0	258,70	15,77	16,9	5,50	6,49	5,40	
		21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,50	1,50	1,41	
		15,5	-3	253,71	26,26	16,4	6,77	10,28	7,90	
		18,5	0	258,70	15,77	16,9	8,03	9,49	9,30	
		21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,27	1,27	1,19	
	1:0,75	1:1,5	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	5,59	1,18	5,16
			18,5	0	258,70	15,77	16,9	5,50	6,49	5,40
			21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,50	1,50	1,41
		1:1	15,5	-3	253,71	26,26	16,4	6,77	10,28	7,90
			18,5	0	258,70	15,77	16,9	8,03	9,49	9,30
			21,5	3	17,05	39,24	16,4	1,27	1,27	1,19

Tabela 49 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z4.

Solo Z4										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-W _{opt} (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	15,5	-3	117,68	17,36	16,4	5,28	5,28	4,88	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	4,65	4,65	4,32	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,60	0,64	0,90	
		15,5	-3	117,68	17,36	16,4	4,30	3,91	4,19	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	3,79	3,58	3,74	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,39	0,42	0,36	
	1:1	1:0,75	15,5	-3	117,68	17,36	16,4	3,93	5,16	3,80
			18,5	0	109,69	13,20	16,9	3,89	4,73	3,53
			21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,35	0,35	0,31
		1:1,5	15,5	-3	117,68	17,36	16,4	2,93	2,96	2,71
			18,5	0	109,69	13,20	16,9	2,55	2,11	2,38
			21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,43	0,49	0,41
20 m	1:1	15,5	-3	117,68	17,36	16,4	2,63	2,94	2,47	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	2,34	2,62	2,15	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,41	0,45	0,41	
		15,5	-3	117,68	17,36	16,4	2,73	4,45	3,20	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	2,57	4,12	3,01	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,38	0,38	0,38	
	1:0,75	15,5	-3	117,68	17,36	16,4	2,73	4,45	3,20	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	2,57	4,12	3,01	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,38	0,38	0,38	
		15,5	-3	117,68	17,36	16,4	2,73	4,45	3,20	
		18,5	0	109,69	13,20	16,9	2,57	4,12	3,01	
		21,5	3	-8,59	25,71	16,4	0,38	0,38	0,38	

Tabela 50 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CD do solo Z5.

Solo Z5										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
10 m	1:1,5	9,7	-3	3,53	48,26	18,4	2,09	2,08	2,01	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	2,20	2,18	2,14	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	2,77	2,81	2,61	
		9,7	-3	3,53	48,26	18,4	1,52	1,50	1,43	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,53	1,51	1,47	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	2,15	2,20	2,04	
	1:1	9,7	-3	3,53	48,26	18,4	1,20	1,21	1,15	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,17	1,16	1,12	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	1,82	1,56	1,76	
		9,7	-3	3,53	48,26	18,4	1,68	1,66	1,61	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,83	1,82	1,77	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	2,02	2,02	1,90	
20 m	1:1,5	9,7	-3	3,53	48,26	18,4	1,39	1,37	1,32	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,48	1,47	1,43	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	1,75	1,75	1,64	
	1:1	9,7	-3	3,53	48,26	18,4	1,14	1,13	1,08	
		12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,18	1,16	1,14	
		15,7	3	22,24	43,57	18,5	1,51	1,52	1,42	
1:0,75	12,7	0	0,92	53,30	19,4	1,18	1,16	1,14		
	15,7	3	22,24	43,57	18,5	1,51	1,52	1,42		

Tabela 51 - Resultados dos cálculos de estabilidade e fatores de segurança para os valores de resistência do CDR do solo Z5.

Solo Z5										
Atura do Aterro	Inc. do Talude (v:h)	W (%)	W-Wopt (%)	C (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Fator de segurança crítico			
							Bishop	Spencer	Jambu	
20 m	1:1,5	9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,84	1,86	1,74	
		12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,92	0,98	0,90	
		15,7	3	11,21	30,64	18,5	1,61	1,63	1,52	
		9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,41	1,43	1,33	
		12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,60	0,65	0,56	
		15,7	3	11,21	30,64	18,5	1,24	1,27	1,18	
	1:1	9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,17	1,05	1,12	
		12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,51	0,53	0,48	
		15,7	3	11,21	30,64	18,5	1,04	0,90	1,00	
		9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,40	1,39	1,31	
		12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,68	0,76	0,66	
		15,7	3	11,21	30,64	18,5	1,19	1,19	1,12	
1:0,75	9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,18	1,19	1,12		
	12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,63	0,67	0,63		
	15,7	3	11,21	30,64	18,5	0,96	1,02	0,96		
	9,7	-3	10,13	36,83	18,4	1,00	1,01	0,95		
	12,7	0	-1,28	35,58	19,4	0,56	0,56	0,56		
	15,7	3	11,21	30,64	18,5	0,87	0,88	0,83		

Como referido anteriormente, uma vez que foi disponibilizado a licença do software Geoslope por tempo limitado, importava rentabilizar a sua utilização nesta investigação.

No capítulo acima apresentado, é feita uma análise para o cálculo de estabilidade segundo o método Bishop. Como o programa oferecia a possibilidade de utilizar outros métodos de cálculo, optou-se ainda por realizar também os cálculos de estabilidade para as mesmas condições dos taludes, com outros dois métodos, nomeadamente Spencer e Janbu. Deste modo tornava-se possível comparar os resultados obtidos e verificar se existem diferenças significativas nos resultados obtidos pela aplicação dos três métodos adotados.

À primeira vista, constata-se logo a semelhança entre os valores obtidos pelos métodos de Bishop e Spencer. Para os solos arenosos, estes dois revelaram dar resultados de FS muito próximos.

No entanto, para solos argilosos, designadamente para o solo Z4, as diferenças detetadas nos valores de FS devidos à aplicação destes dois métodos são mais significativas, variando em certos casos até 3 valores. Uma das justificações pode-se dever dos parâmetros de resistência para estes solos (Z4), onde a coesão possui valores extremamente altos.

No solo Z5 os cálculos pelos métodos Bishop e Spencer são também muito próximos.

Relativamente ao método de Janbu, este é dos três o que apresenta mais diferenças, exibindo geralmente os valores mais baixos de FS.

De uma forma geral analisando os resultados dos três métodos de cálculo de estabilidade, observa-se que os métodos Bishop e Spencer são os mais semelhantes, sendo o Janbu o mais diferente entre os três.

Nas imagens abaixo ilustra-se o cálculo efetuado para os três métodos, com a mesmo material e geometria (10m de altura e inclinação de 1:1), com o intuito de exemplificar as diferenças entre os ditos métodos.

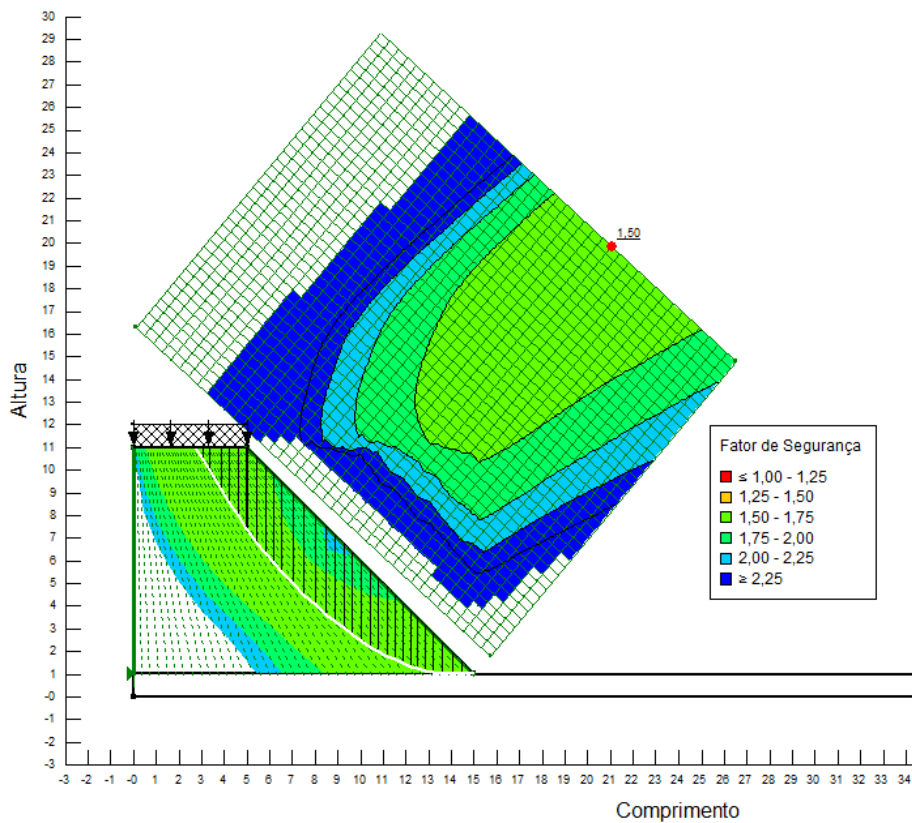


Figura 62 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Bishop, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.

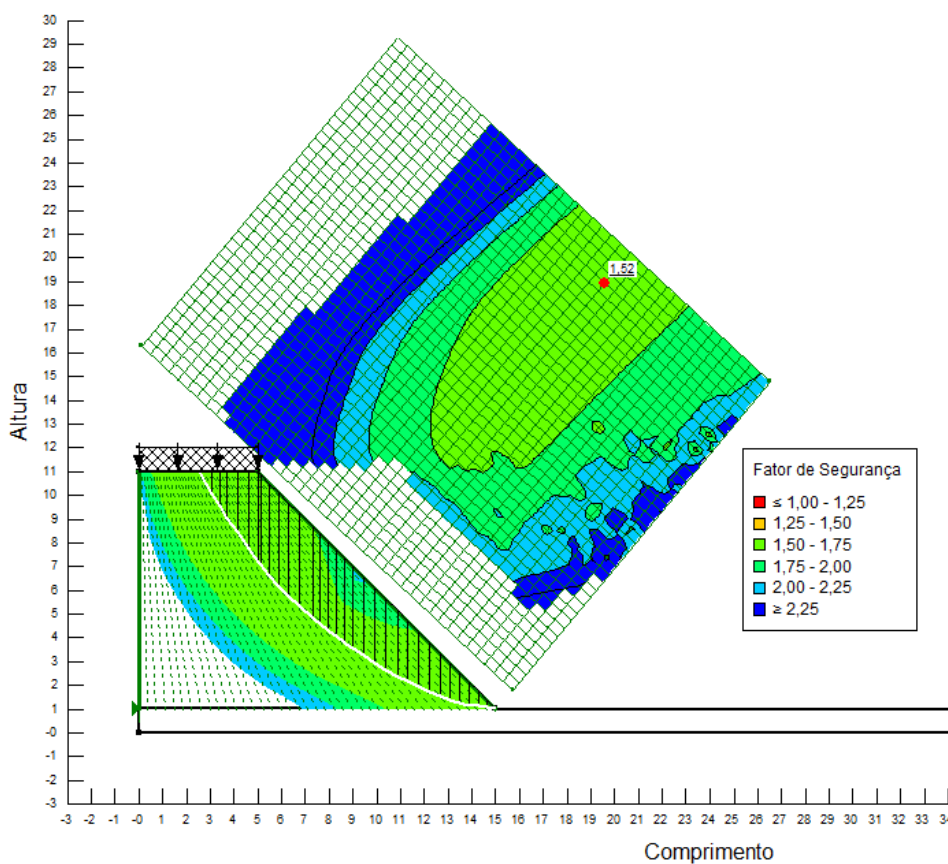


Figura 63 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Spencer, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.

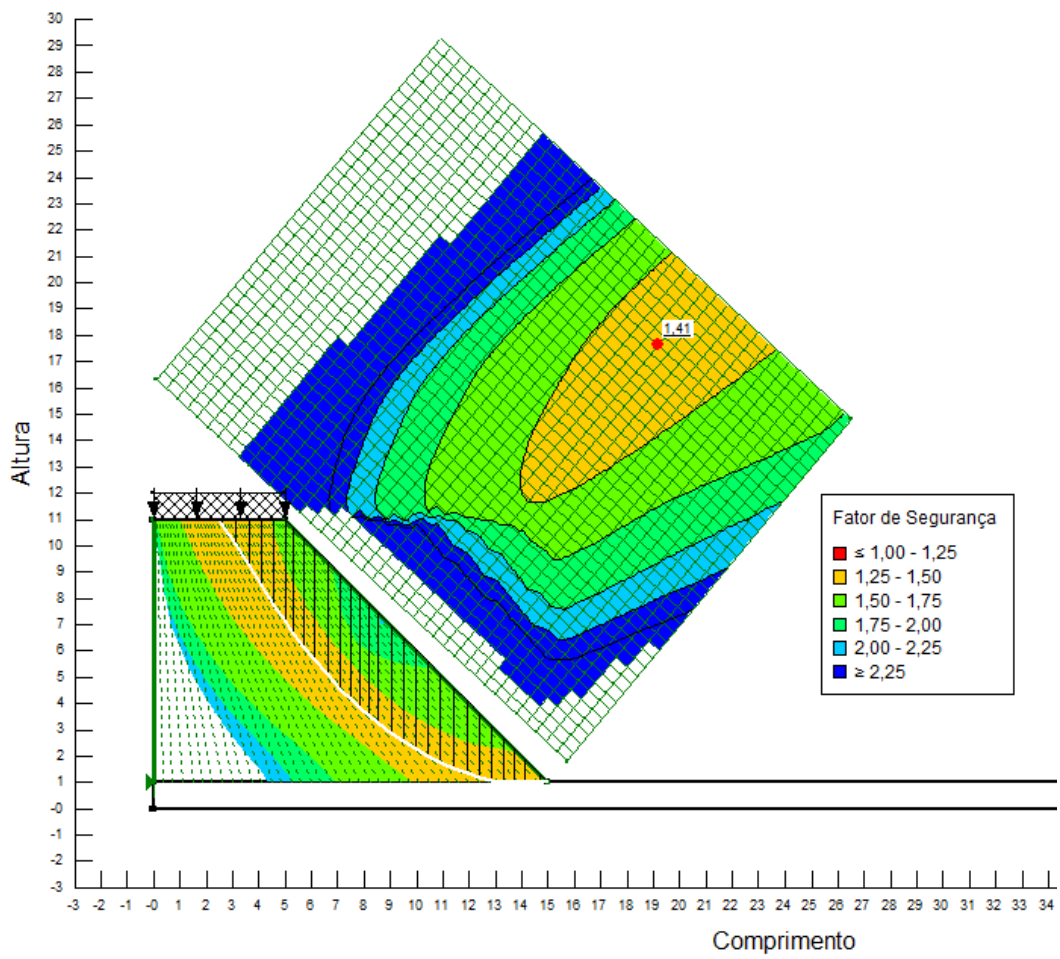


Figura 64 - Resultado do cálculo de estabilidade de talude pelo método Janbu, com o FS crítico, para os parâmetros de resistência do solo Z1 com -3% de teor em água em relação ao ótimo.

6. Conclusão e considerações finais

Os solos possuem várias aplicabilidades entre as diferentes obras de engenharia. Quando se fala em obras viárias a sua principal utilização é na construção de aterros. A escolha dos materiais que são passíveis de utilização está sujeita a uma série de critérios que têm de cumprir para a sua aplicação. Como referido em capítulos anteriores, a realização de obras viárias contempla vários critérios, inseridos num documento normativo (CETO), que visa estabelecer regras e limites a impor na execução de trabalhos em obra.

A aplicação dos solos em aterros é feita com a implementação de um tratamento mecânico dos mesmos, que se denomina de compactação. Este tratamento visa melhorar as suas características potenciando a resistência e capacidade de carga.

Como parte integrante deste processo há um parâmetro que influencia a compactação e, consequentemente, a resistência dos materiais compactados. Trata-se do teor em água que os solos detêm.

Um dos objetivos principais desta investigação era analisar a influência do teor em água na resistência dos materiais compactados, através de ensaios laboratoriais.

Os gráficos constantes das figuras 65 a 69 abaixo, ilustram parte das conclusões que podemos retirar através deste trabalho.

Nos referidos gráficos é exibido o resultado do cálculo de resistência ao corte em função da variação do teor em água. São também assinalados nos mesmos, os limites de teor em água definidos pelo CETO para cada um dos solos estudados.

Importa referir que os parâmetros de resistência utilizados em grande parte das obras viárias são provenientes do CD, sendo o resultado do CDR e CR assinalados nos gráficos apenas para comparar as suas diferenças.

É importante notar que esta investigação teve como base os solos compactados mas, em fase de projeto das obras viárias, os parâmetros de resistência ao corte usados nos cálculos de estabilidade, são obtidos em solos não compactados de amostras indeformadas ou mesmo remexidas.

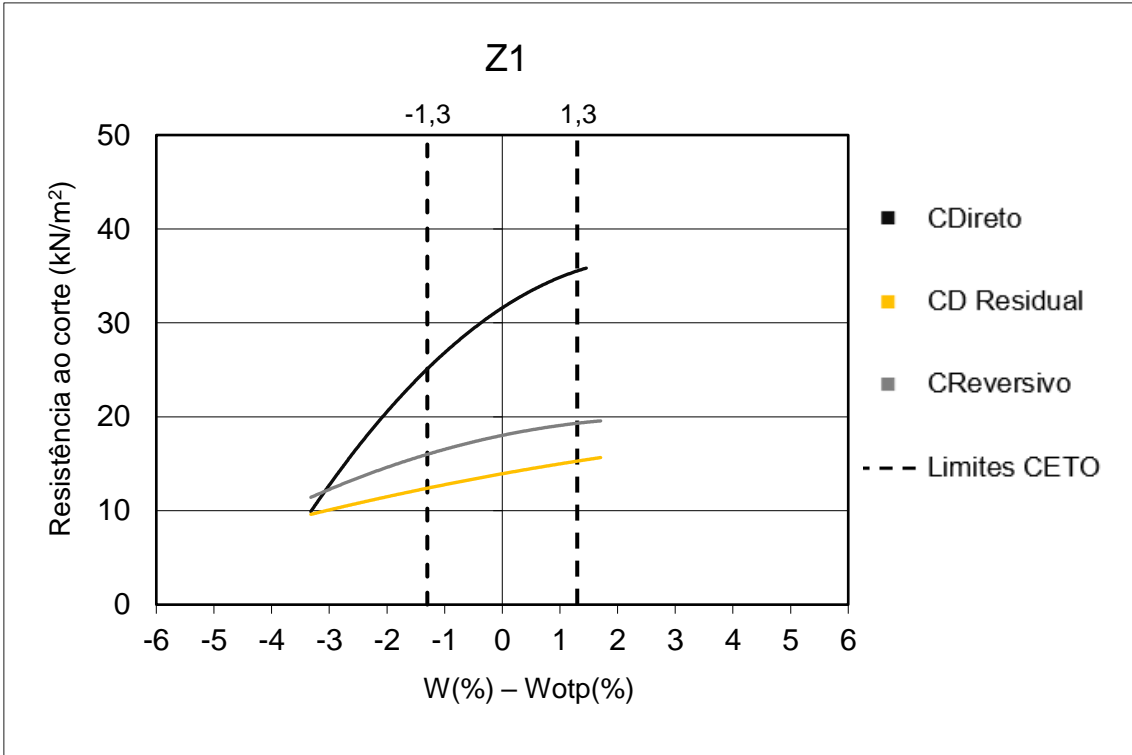


Figura 65 - Gráfico da Resistência ao corte em função do W(%) – Wotp(%) para o solo Z1.

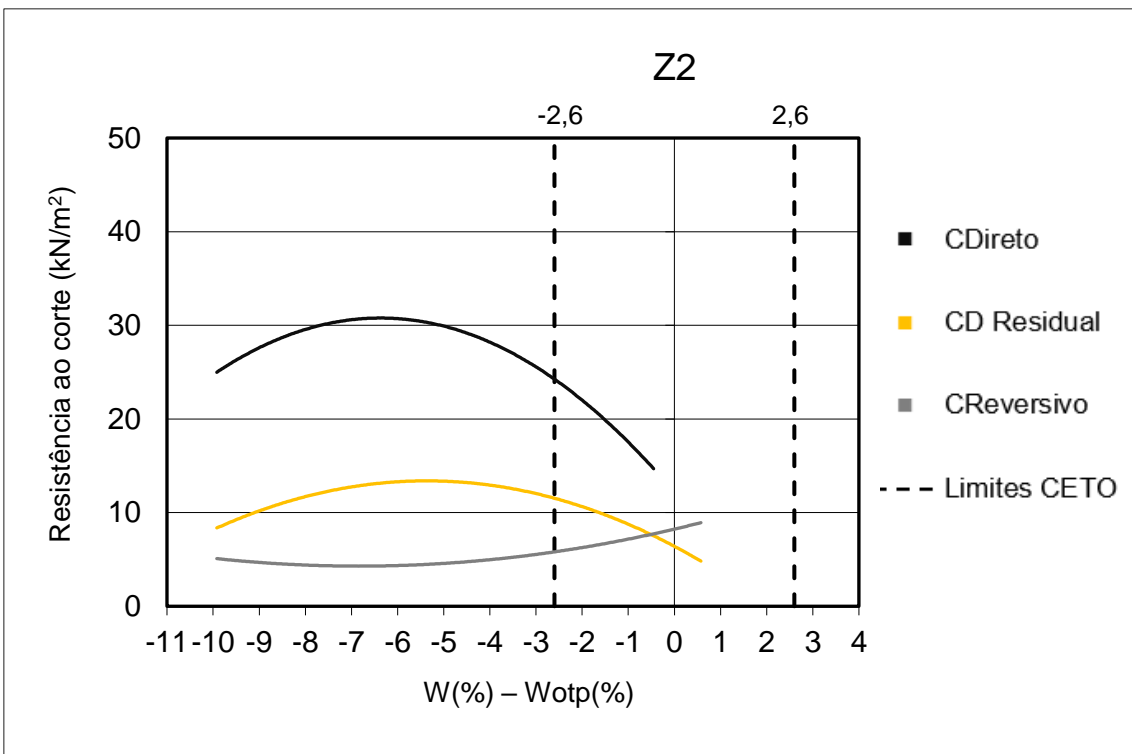


Figura 66 - Gráfico da Resistência ao corte em função do W(%) – Wotp(%) para o solo Z2.

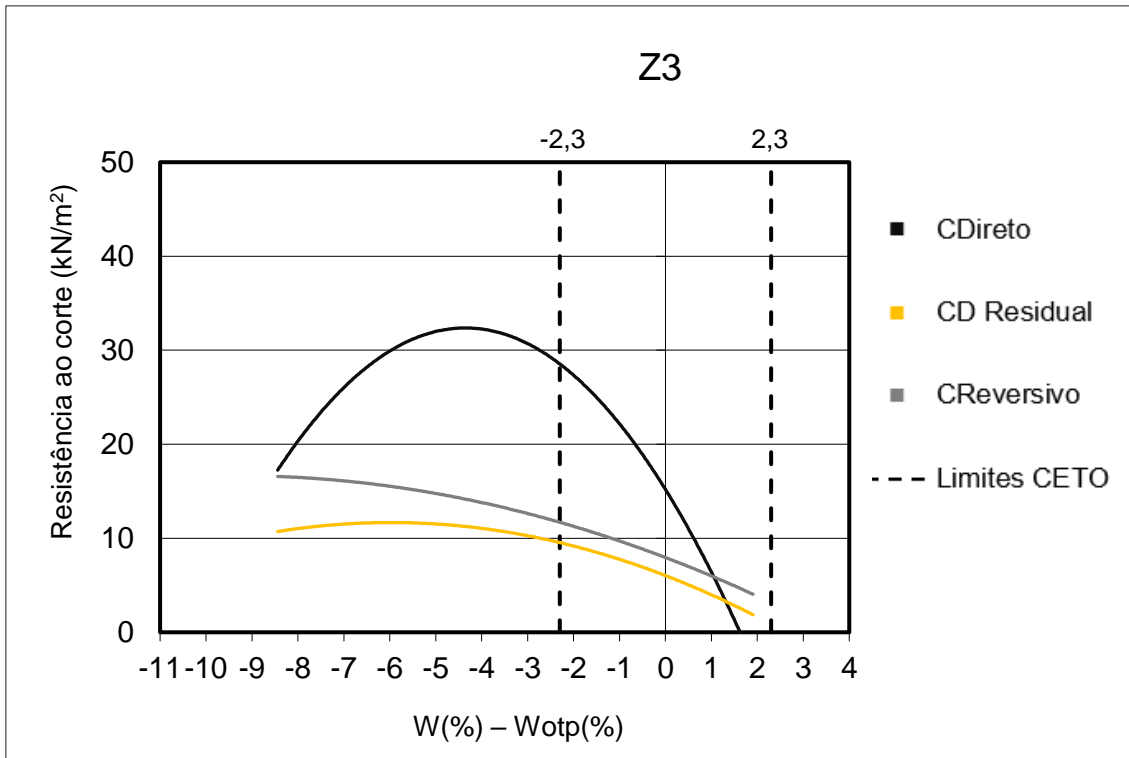


Figura 67 - Gráfico da Resistência ao corte em função do W(%) – Wotp(%) para o solo Z3.

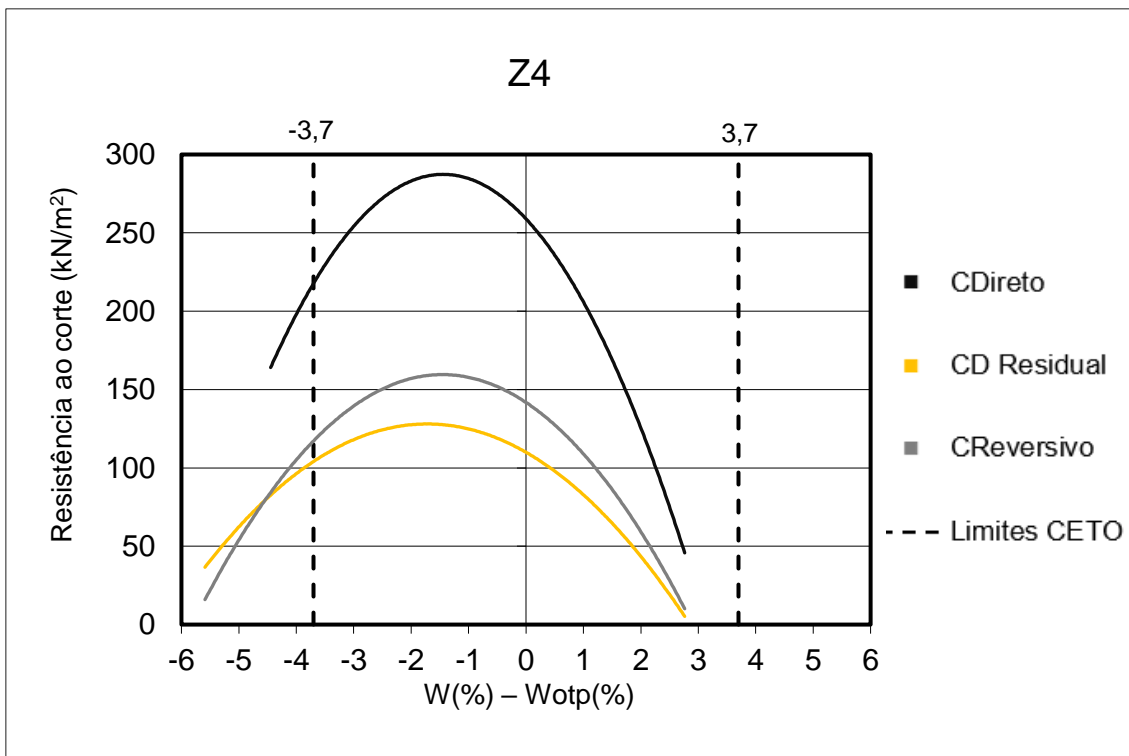


Figura 68 - Gráfico da Resistência ao corte em função do W(%) – Wotp(%) para o solo Z4.

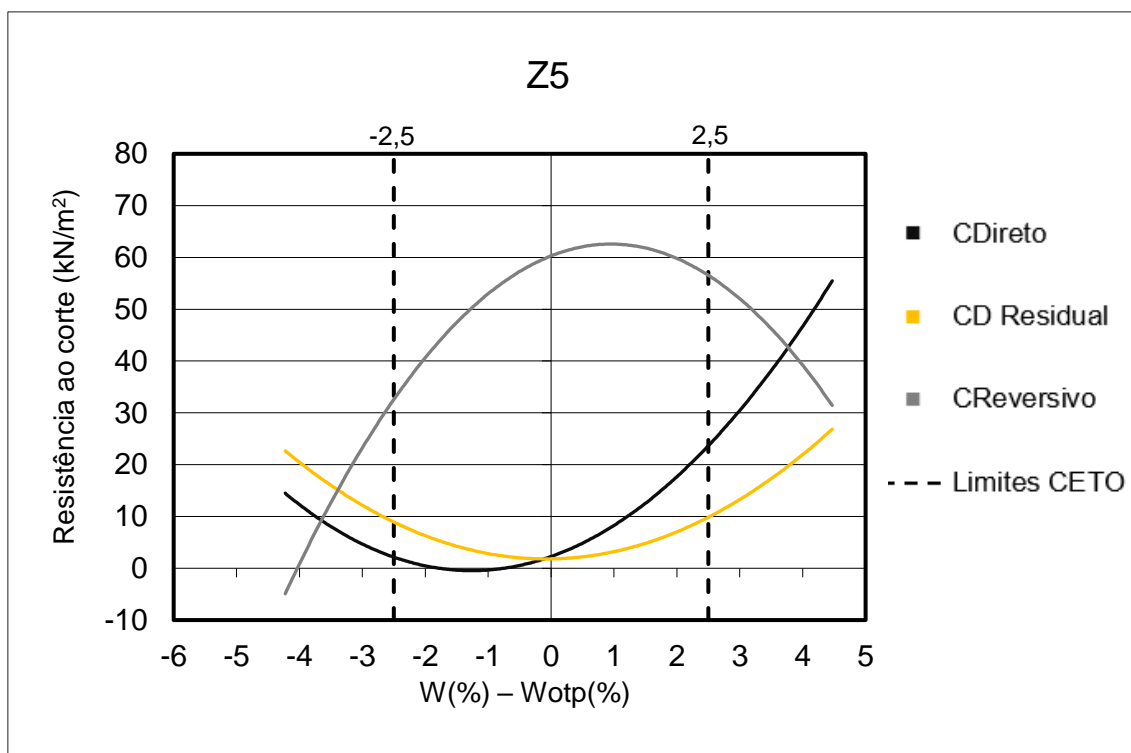


Figura 69 - Gráfico da Resistência ao corte em função do $W(\%) - W_{opt}(\%)$ para o solo Z5.

As conclusões obtidas através desta investigação foram as seguintes:

- A compactação de solos favorece a sua resistência;
- Maiores valores de Baridade seca máxima (peso volúmico) correspondentes ao teor ótimo, não configuram (nestes casos) os valores mais elevados de resistência do solo;
- Os ensaios de CD, CDR e CR apresentam parâmetros de resistência muito diferentes;
- Na maioria dos solos é o CD que corresponde a valores de resistência mais elevados;
- Entre o CDR e o CR, o CR exibe valores mais elevados de resistência;
- De entre os solos arenosos é o Z1 que apresenta maiores valores de resistência;
- De entre os solos argilosos é o Z4 que apresenta maiores valores de resistência;
- Dentro dos solos arenosos (Z1, Z2 e Z3), dois deles apresentam um comportamento semelhante, sendo o Z1 mais divergente em relação à resistência;

- Nota-se diferença de comportamento entre os solos argilosos (Z4 e Z5);
- Problema associado à máquina de corte, por impor a superfície de cisalhamento, a qual pode não corresponder ao menor valor de rotura possível;
- Entre a coesão e o ângulo de atrito, observou-se que a coesão influencia mais a resistência. Este aspeto é visível pela semelhança entre a forma dos gráficos de resistência ao corte e os gráficos de coesão;
- Uma das explicações para a diferença do comportamento dos solos arenosos compactados que possuem uma granulometria semelhante, estará relacionada com a presença ou ausência dos minerais argilosos. A forma destes minerais, para além das suas outras propriedades, influencia o reajustamento da estrutura do solo quando compactado;
- O comportamento típico de solos argilosos quanto à resistência é visível no solo Z5 sendo diferente para o solo Z4;
- O teor em água influencia mais o CD do que o CDR e CR nos solos arenosos;
- Os solos Z1 e Z5 exibem melhores parâmetros de resistência na fase húmida, e os restantes (Z2, Z3 e Z4) na fase seca;
- Como, para a mesma energia de compactação, o teor ótimo dos solos arenosos é geralmente mais baixo do que o dos solos argilosos, os valores correspondentes aos limites definidos no CETO são igualmente menores;
- Para os solos Z1, Z4 e Z5, os valores de resistência mais elevados correspondem aos valores de teor em água inseridos no intervalo definido pelo CETO;
- Para os solos Z2 e Z3, os valores de resistência mais elevados correspondem aos valores de teor em água inseridos fora do intervalo definido pelo CETO;
- Os valores de FS estão inteiramente ligados aos parâmetros de resistência;
- Uma vez que na fase de projeto os valores utilizados para o cálculo de estabilidade resultam de ensaios de solos não compactados, estando assim do lado da segurança, é esperado que sejam igualmente diferentes os resultados do cálculo de estabilidade feitos com solos compactados;

- Desta diferença de ensaios é esperado que os valores de resistência resultantes dos ensaios com solos compactados sejam superiores aos dos solos não compactados;
- Se utilizarmos valores mais baixos de resistência os valores de FS também serão tendencialmente mais baixos. É com base nestes valores que se projeta a geometria do aterro e, caso os valores de FS resultantes do cálculo de estabilidade sejam baixos, é então feita uma readaptação da geometria do aterro de forma a garantir a segurança do mesmo. No entanto, se utilizarmos os valores de resistência obtidos nos ensaios efetuados com solos compactados certamente se otimizaria a geometria dos aterros, na medida em que se estaria a trabalhar num cenário mais próximo do real, situação essa que muito beneficiaria a economia do empreendimento;
- Com esta otimização o impacto na economia seria relevante, dado que se manifestaria a vários níveis:
 - Área de expropriação;
 - Tempo de trabalho;
 - Atividade de escavação, transporte e compactação.
- O mapeamento dos fatores de segurança obtidos é mais homogêneo segundo o método de cálculo Bishop em comparação com os métodos de Spencer e Janbu;
- Relativamente à geometria dos taludes:
 - Para os cinco solos, verifica-se que a geometria do aterro com 10m de altura e inclinação de 1:1,5 apresenta os valores mais elevados de FS em comparação às outras geometrias adotadas;
 - Tendo em conta que os taludes são normalmente projetados com inclinação de 1:1,5, certamente que seria possível em muitas situações adotar inclinações mais ousadas;
 - A compactação do solo na fase mais húmida favorece a resistência dos solos Z1 e Z5 enquanto se for realizado na fase mais seca favorece os solos Z2, Z3 e Z4;

6.1 Trabalhos futuros

Com o intuito de continuar e complementar esta investigação é feita uma sugestão de trabalhos futuros que visam a acrescentar conhecimento ao estudo realizado:

- Variar parâmetros da máquina de corte, nomeadamente a velocidade de execução de ensaio;
- Realizar os ensaios com os solos compactados e não compactados;
- Realização de ensaios de laboratório complementares que, tendo em conta o tempo previsto no plano de estudos para a concretização deste trabalho, já não foi possível executar:
 - CBR- *California Bearing Ratio* (Índice de suporte Califórnia);
 - Ensaio de corte rotativo de Bromhead;
 - Ensaio de corte triaxial;
 - Estudo da mineralogia e análises geoquímicas aos solos.
- Variar os tipos de compactação e a sua influência;
- Completar os dados com adição de mais solos com naturezas diferentes;
- Comparar os limites do teor em água permitido pelo CETO da I.P. S.A com outros cadernos de encargo em vigor noutros países.

Bibliografia

- Al-TAIE, A. J., & Al-SHAKARCHI, Y. (2017). Shear strength, collapsibility and compressibility characteristics of compacted Baiji dune soils: *Journal of engineering science and technology*, Vol. 12, No. 3, 767 - 779.
- Amsiejus, J., N, Dirglien., A, Norkus., & Skuodis, S. (2014). Skuodis Comparison of sandy soil shear strength parameters obtained by various construction direct shear apparatuses: *archives of civil and Mechanical engineering*, I 4, 327 – 334.
- Caderno de Encargos Tipo Obra, Terraplenagem, Características dos materiais, Estradas de Portugal, S.A. (2009).
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: LTC.
- Chowdhury, Md. R. H. (2013). *Shear strength properties of compacted expansive soils*. Master's Degree thesis, Faculty of graduate studies and research, University of Regina,
- Chumbinho, M. J. (2017). *Otimização de solos para a produção de blocos de terra compactada*. Dissertação de mestrado, Departamento de Geociências, Universidade de Évora.
- Corte, J.F. (1992). *Réalisation des remblais et des couchés de forme*, Guide technique. LCPC (Division Géotechnique Mécanique des Chaussées).
- Costa, G. F. (2012). *Análise dos critérios de aceitação/rejeição do caderno de encargos tipo obra da E.P. para pavimentação*. Dissertação de mestrado, Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade nova de lisboa.
- Craig, R. F. (2007). *Craig Mecânica de solos*, 7ª edição, Rio de Janeiro: LTC.
- Duarte, I. (2002). *Solos residuais de rochas granitóides a sul do Tejo: características geológicas e geotécnicas*. Tese de doutoramento, Departamento de Geociências, Universidade de Évora.
- Faria, P. (2005). *Propriedades composicionais e geotécnicas de solos argilosos em obras rodoviárias*. Tese de doutoramento, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.

- Fernandes, M. M. (2006). *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundamentais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol. 1.
- Fernandes, M. M. (2011). *Mecânica dos Solos, Introdução à Engenharia Geotécnica*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol. 2.
- Ferreira, J. (2012). *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Folques, J. (1987). *Introdução à mecânica dos solos*. LNEC, Lisboa.
- Gerscovich, D. (2010). *Resistência ao cisalhamento*. Dissertação de mestrado. Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia do Rio de Janeiro.
- HEAD, K.H. (1992). *Manual of soil laboratory testing*. Soil classification and compaction tests, (second edition) Pentech Press Limited. V2, p.p.388
- Ibrahim, K. (2015). Effect of percentage of low plastic fines on the unsaturated shear strength of compacted gravel soil: *Ain Shams Engineering Journal*, 6, 413–419.
- IDOM (2010). Projeto de execução, subconcessão baixo Alentejo, Lanço B: IP8 – Nó de Grândola Sul (IP1)/Figueira de cavaleiros. PE 1. Terraplenagem.
- Ismael, N., Behbehani, M. (2014). Influence of relative compaction on the shear strength of compacted surface sands: *International journal of environmental science and development*, vol 5, Nº 1.
- Kalhor, A. (2012). The shear strength analyses of soil with various compactions under vertical load in direct shear test: *International research journal of applied and basic sciences*, Vol., 3 (S), 2815-2821.
- Liu, S. H., Sun, D., & Matsuoka, H. (2005). On the interface friction in direct shear test: *Computers and Geotechnics*, 32, 317–325.
- Miguens, C. (2016). *Resistência ao Corte residual de solos*. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Mohammad, A. S., Ying, C., & Jude, L. (2011). Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions: *Journal of Terramechanics*, 48, 451–458.

- Najjar, S. S., Yaghi, K., Adwan, M., & Jaoude, A. (2015). Drained shear strength of compacted sand with clayey fines: *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9:5, 513-520.
- Pereira, O. (1971). *Pavimentos Rodoviários, Especialização e aperfeiçoamento Vias de comunicação*. LNEC, Lisboa, Vol. 1.
- Ribeiro, S. (2008). *Terraplenagem. Metodologia e técnicas de compactação*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Silva, B. (2014). *Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduos*. Dissertação de mestrado, Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, J. (2016). *Estudo comparativo de diversas técnicas de compactação laboratorial e suas implicações*. Dissertação de mestrado, Instituto superior de engenharia de Coimbra.
- Skuodis, S., Norkus, A., Neringa., N, Dirglien., & Šlečkuvienė, A. (2013). Sand Shearing Peculiarities Using Direct Shear Device: *Procedia Engineering*, 57, 1052 – 1059.
- Sousa, P. M. (2011). *Limite de liquidez – correlações e comparações entre os métodos de Fall cone e da concha de Casagrande*. Dissertação de mestrado, Departamento de ciências da terra, Universidade Nova de Lisboa.
- Stability Modeling with Geostudio, Geoslope, 2004-2018 copyright, GEO-SLOPE INTERNATIONAL, Canada.
- Vallejo, L., & Lobo-Guerrero, S. (2013). The shear strength of granular materials containing dispersed oversized particles: *DEM analysis: International Journal of Geotechnical Engineering*, 6:3, 371 – 379.
- Wijeyesekera¹, D. C., Siang, A. J., & Yahaya, A. (2013). Advanced Statistical Analysis for Relationships between Particle Morphology (Size and Shape) and Shear (Static and Dynamic) Characteristics of Sands: *International Journal of Geosciences*, 4, 27-36.

Zhou, W., Xu, X., & Garg, A. (2016). Measurement of unsaturated shear strength parameters of silty sand and its correlation with unconfined compressive strength: *Measurement*, 93, 351–358.

<https://www.geoslope.com/products/slopew/features> (Consultado em 2018)

<http://broadwaycomputers.us/diagrama-trilinear-solos.html> (Consultado em 2018)

Normas:

L.N.E.C. E 195 (1966) – Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 200 (1967) – Solos. Ensaio de expansibilidade. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 218 (1968) – Solos. Prospecção geotécnica de terrenos. Colheita de amostras.
LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 239 (1971) – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 240 (1970) – Classificação para fins rodoviários. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 197 (1966) – Solos. Ensaio de compactação. LNEC, Lisboa.

NP – 143 (1969) – Solos – Determinação dos limites de consistência.

NP – 84 (1965) - Solos – Determinação do teor em água.

BS 1377 Part 7 (1990) – “Soil testing”.

ISO/TS 17892-12:2004 (E) – “Determination of Atterberg limits”.

Contribuição para o estudo da influência do teor em água na resistência de solos compactados

ANEXOS

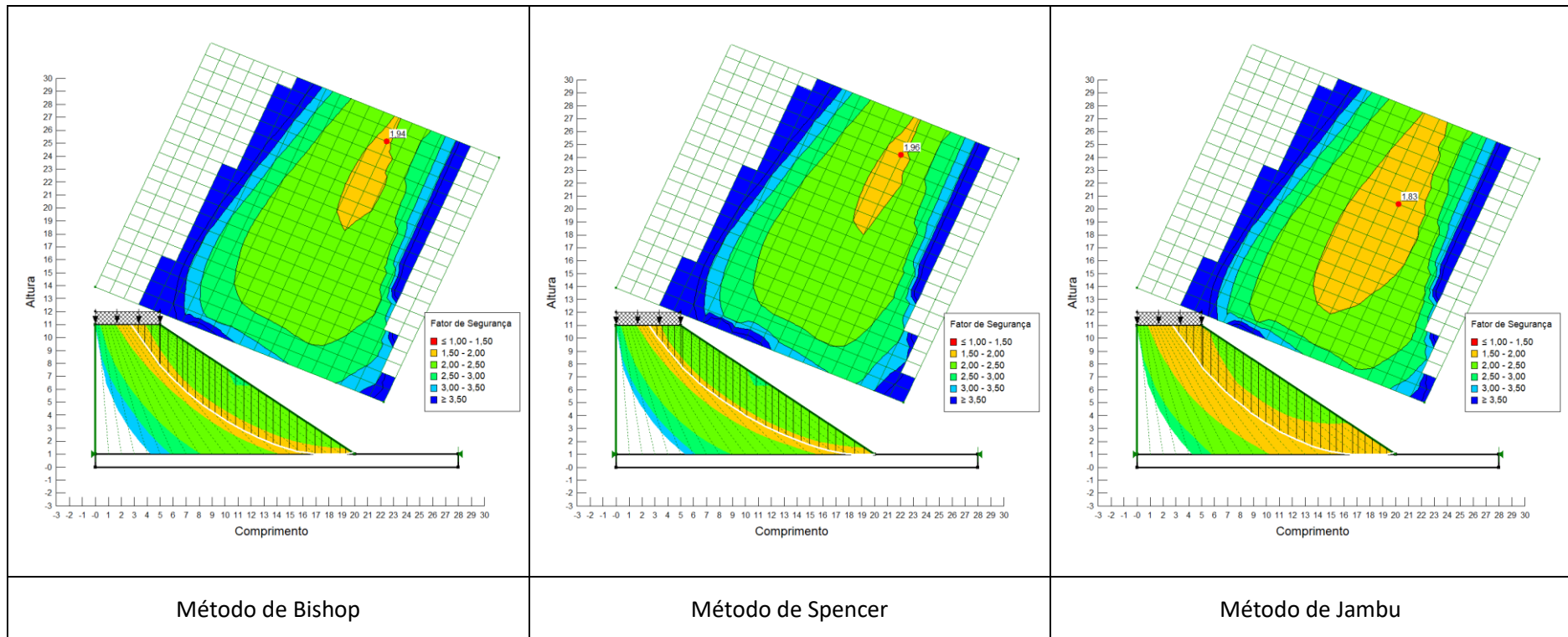
Resultado gráfico dos cálculos de estabilidade de taludes

SOLO Z1

SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

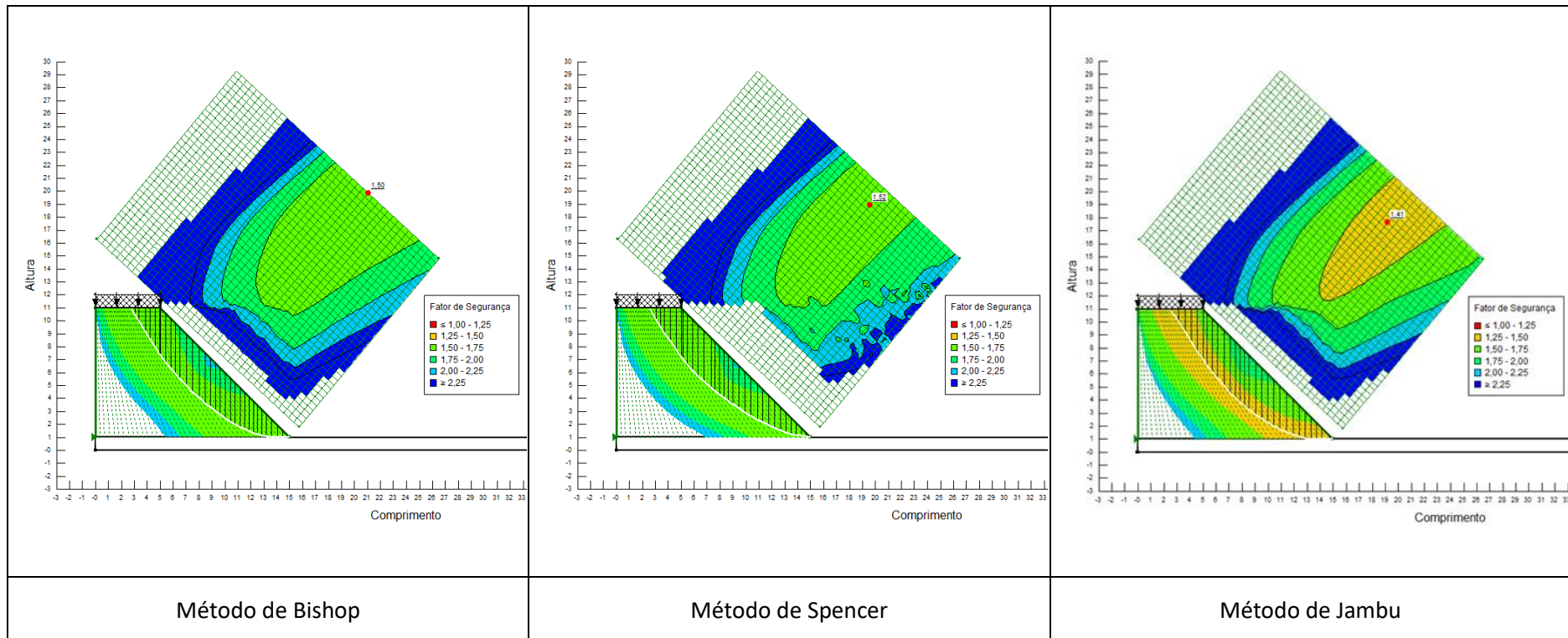
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

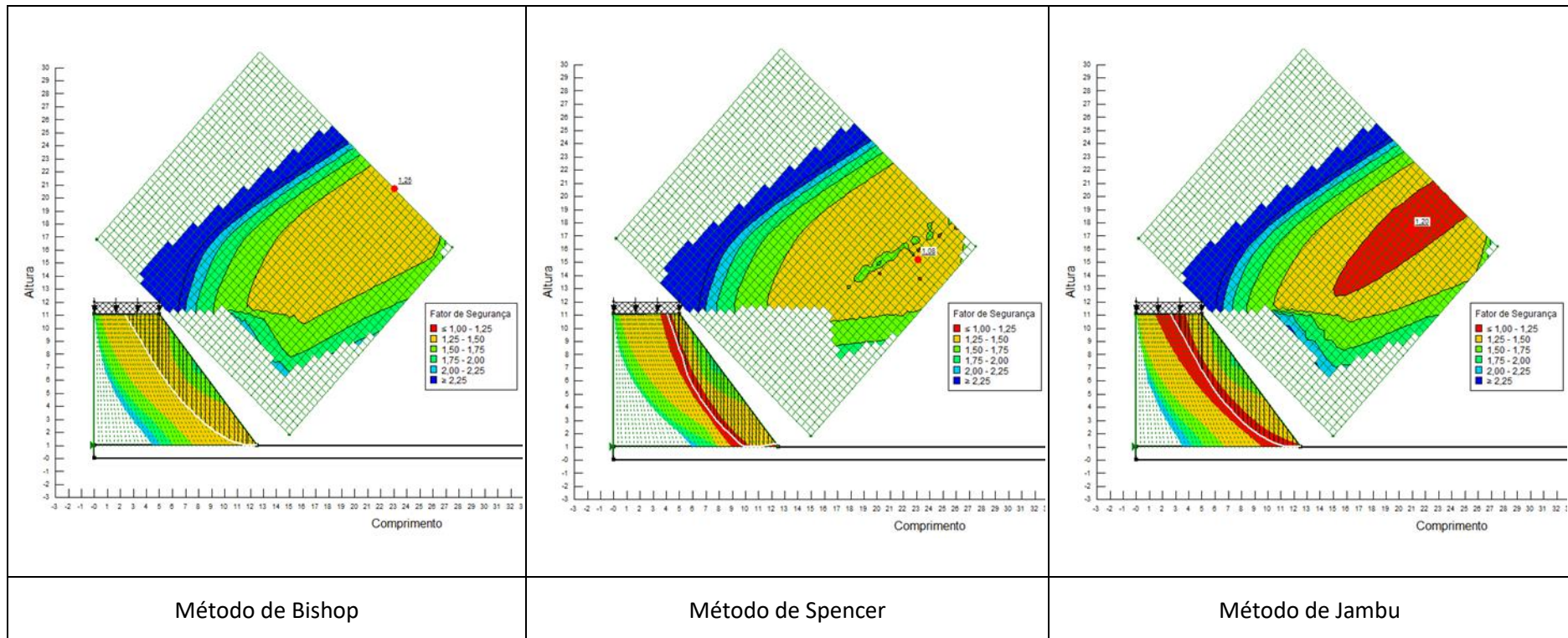
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

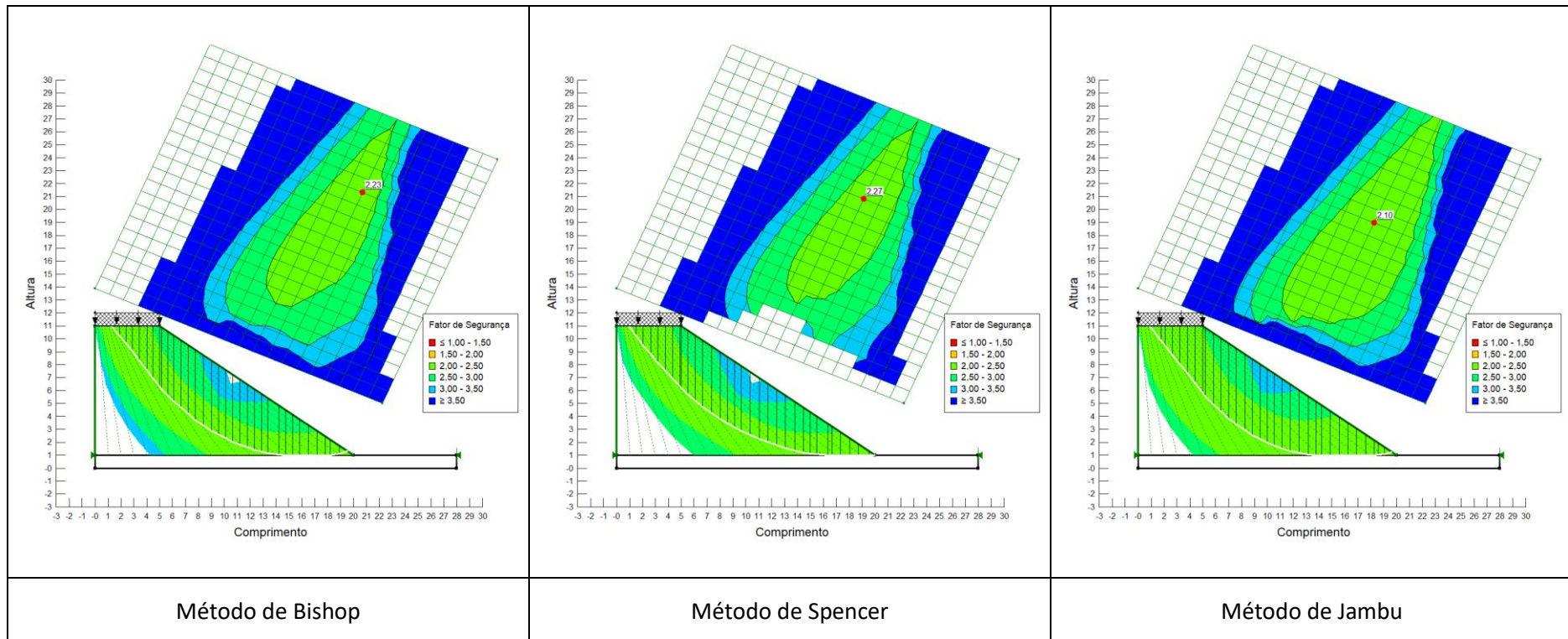
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

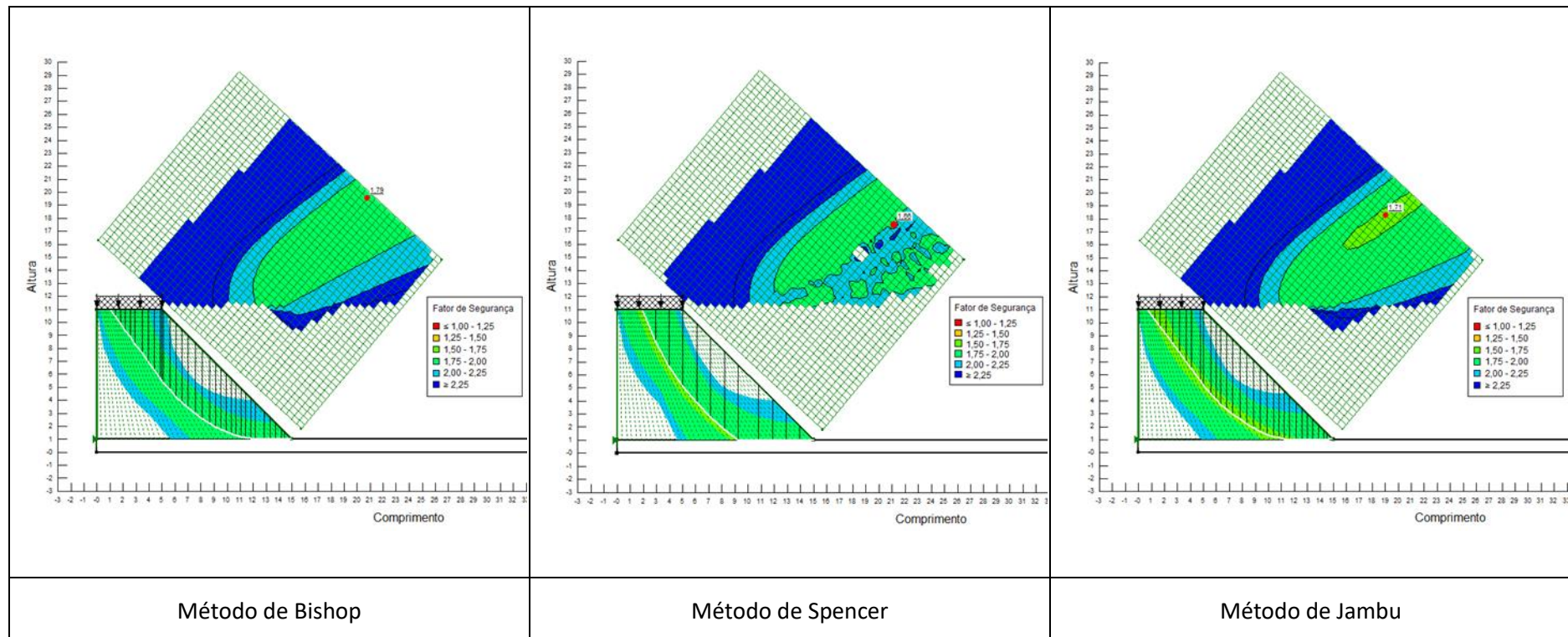
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

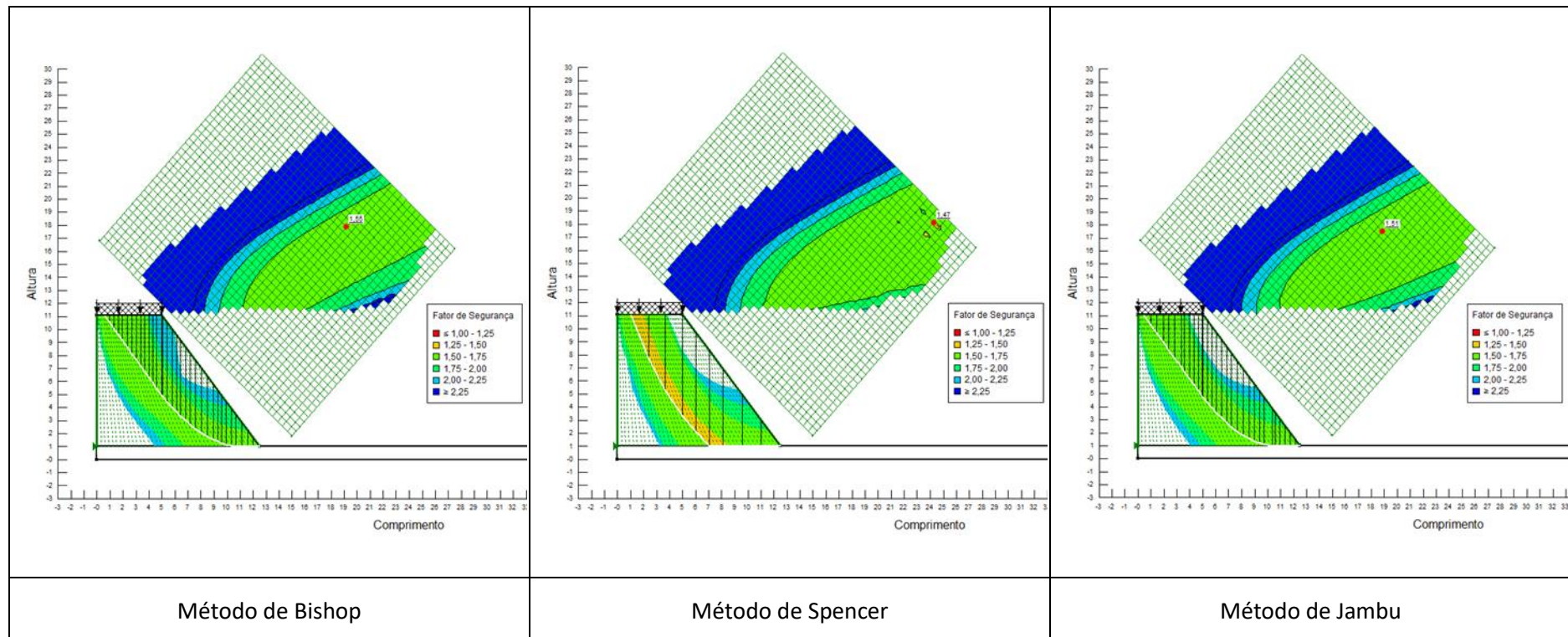
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

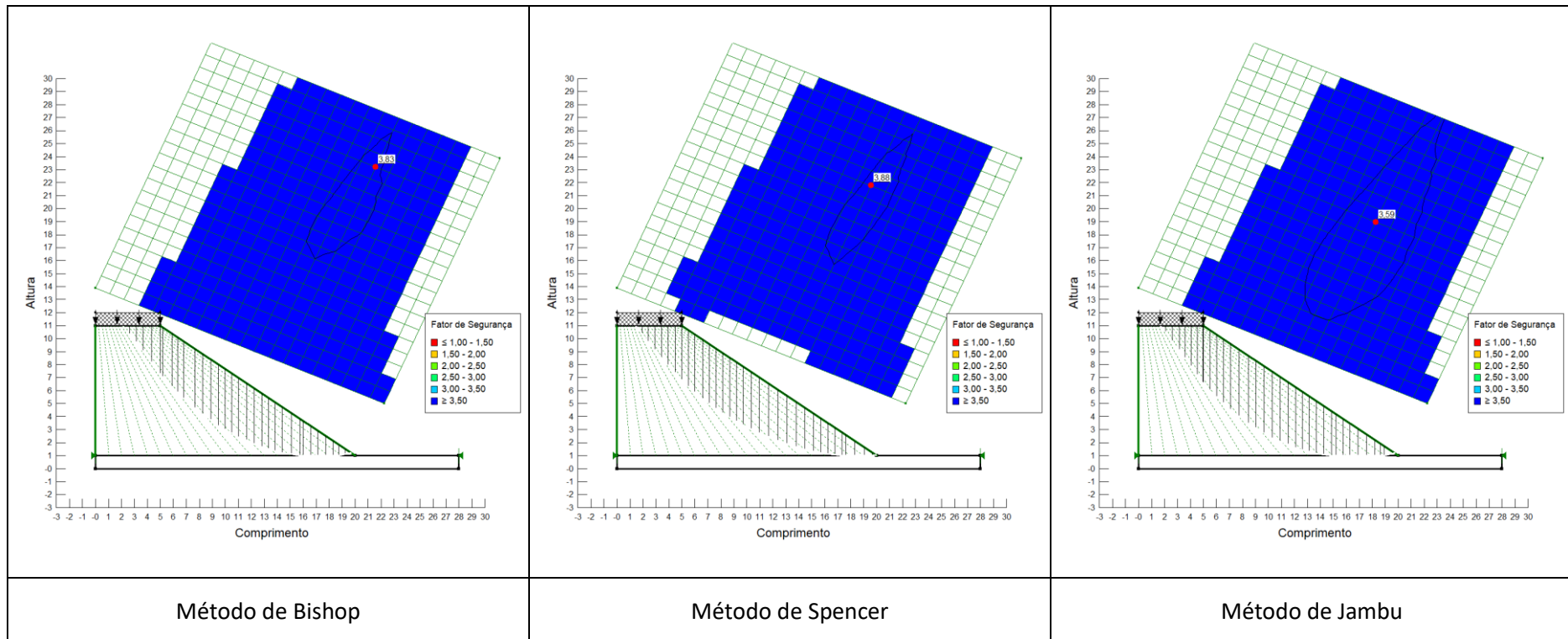
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

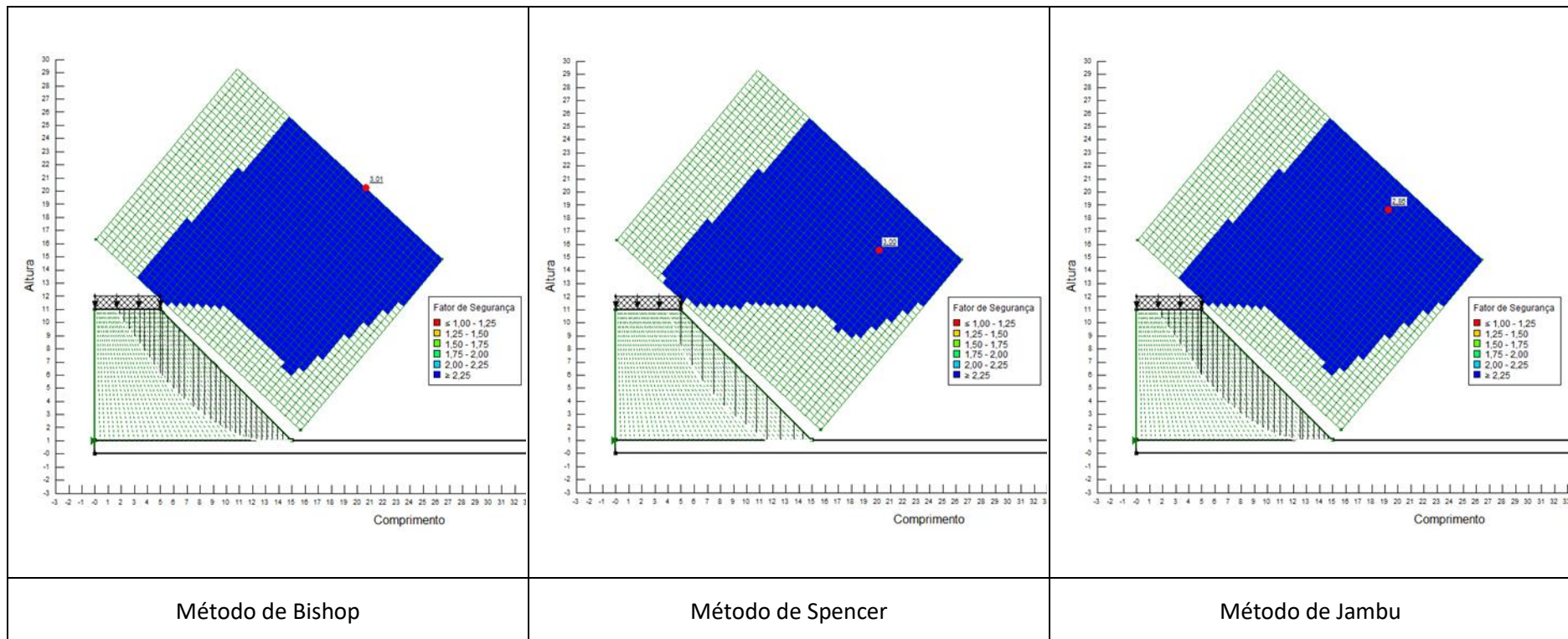
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

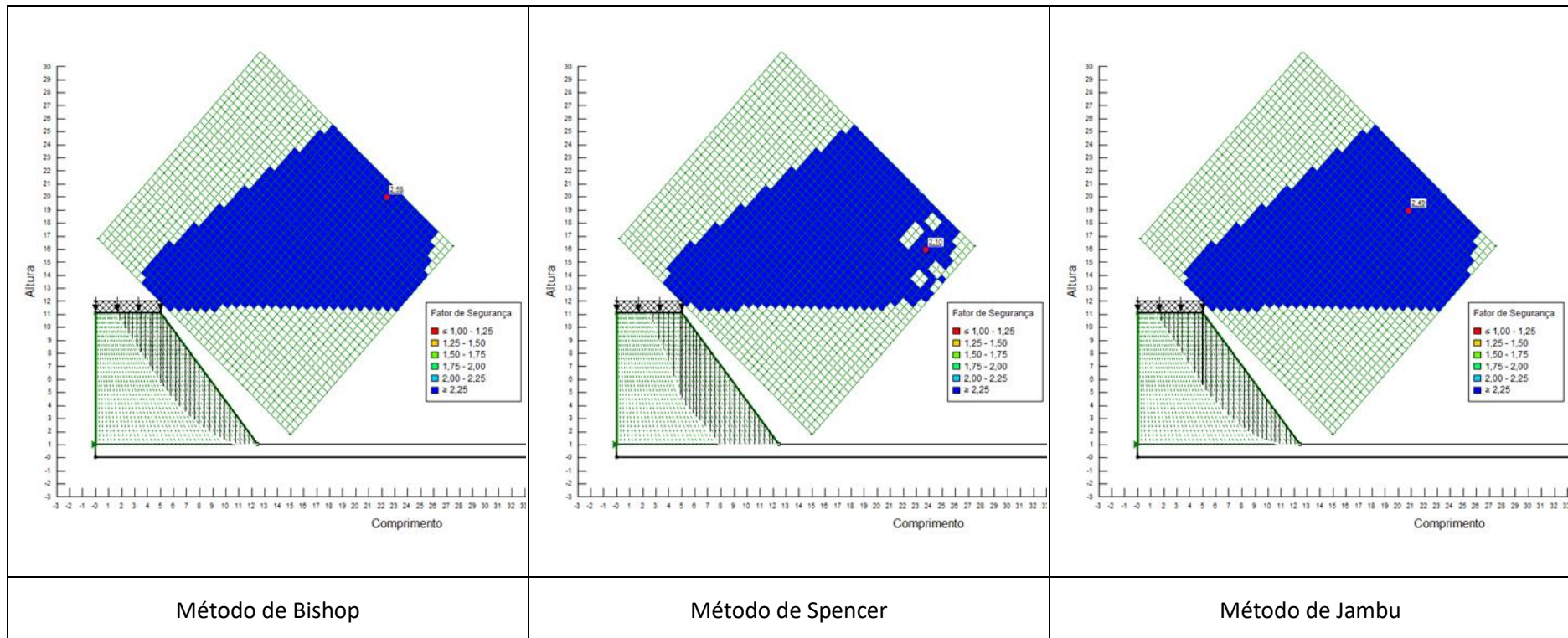
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

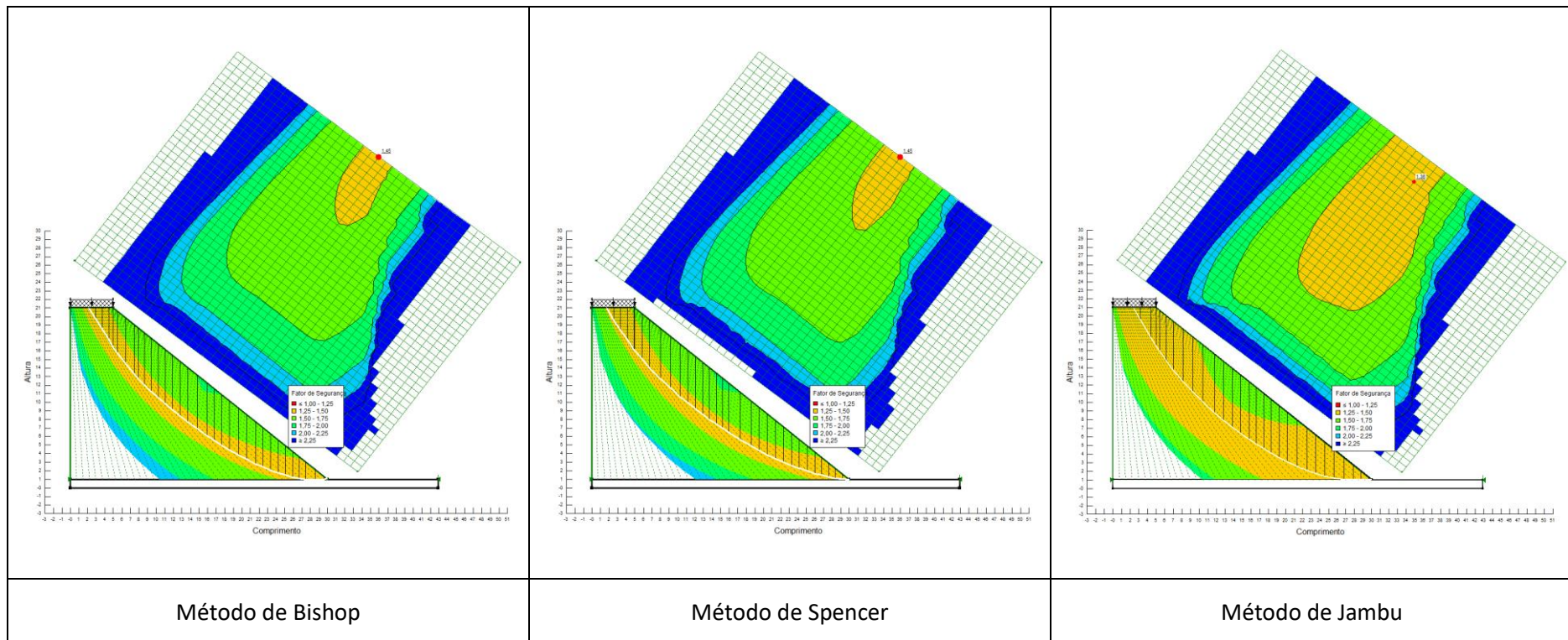
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

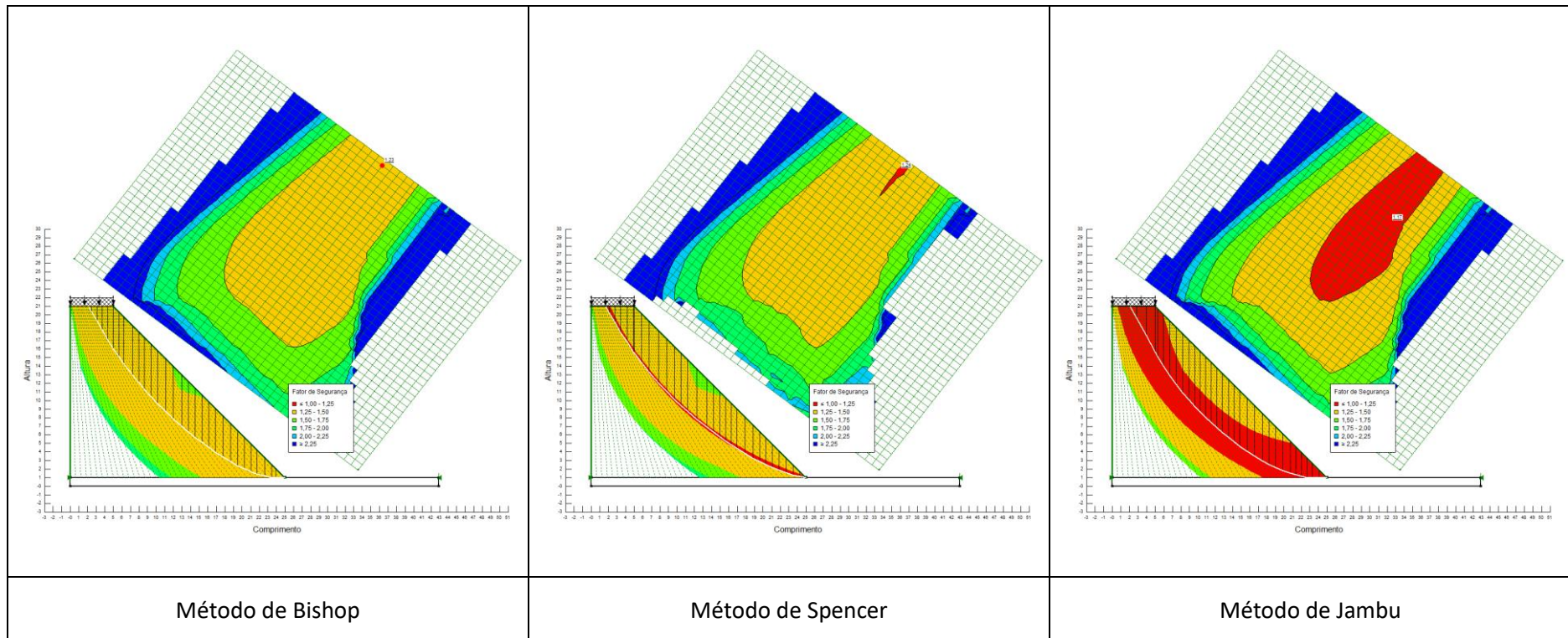
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

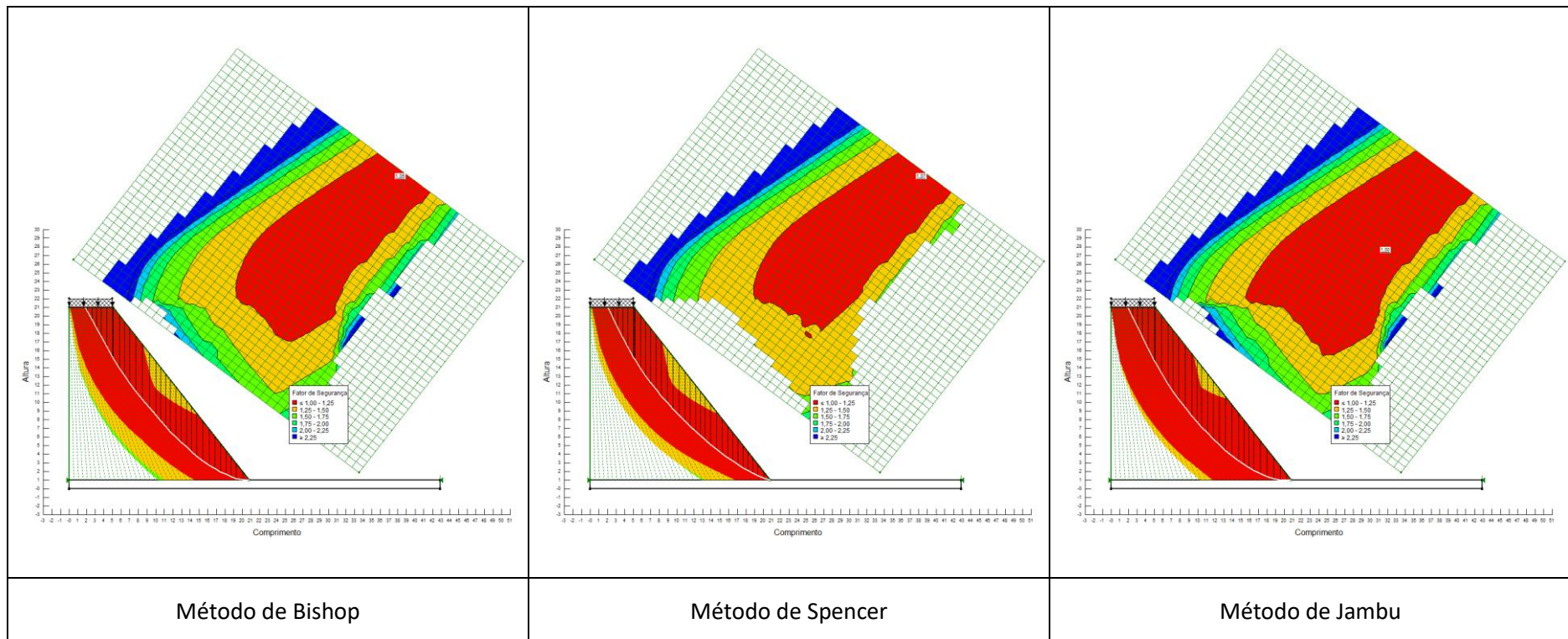
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

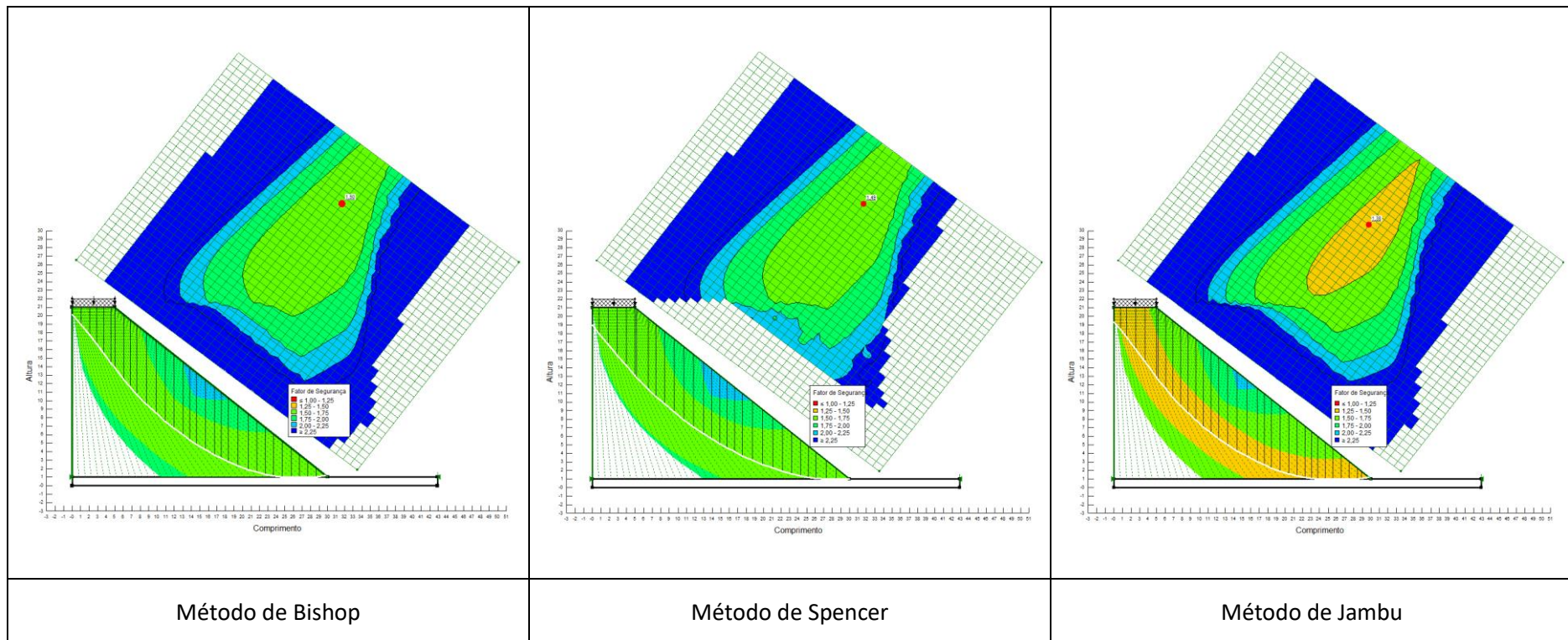
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

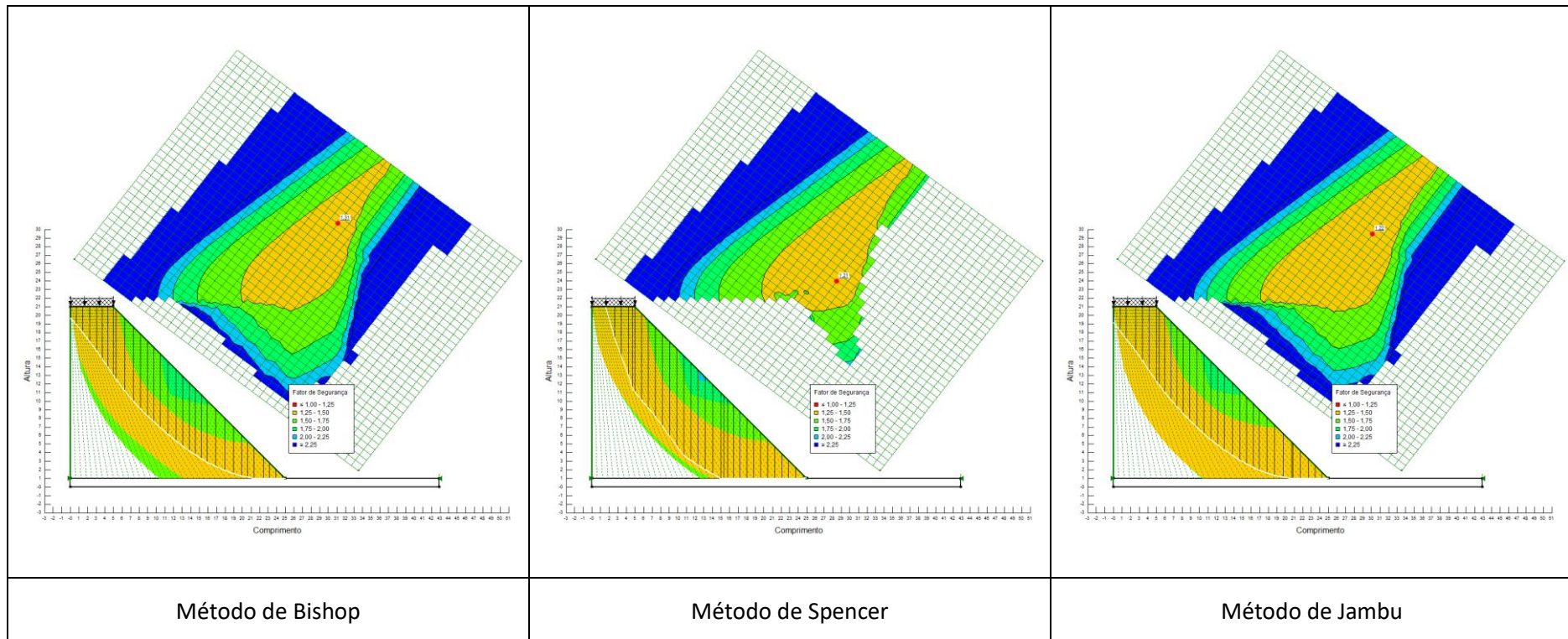
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

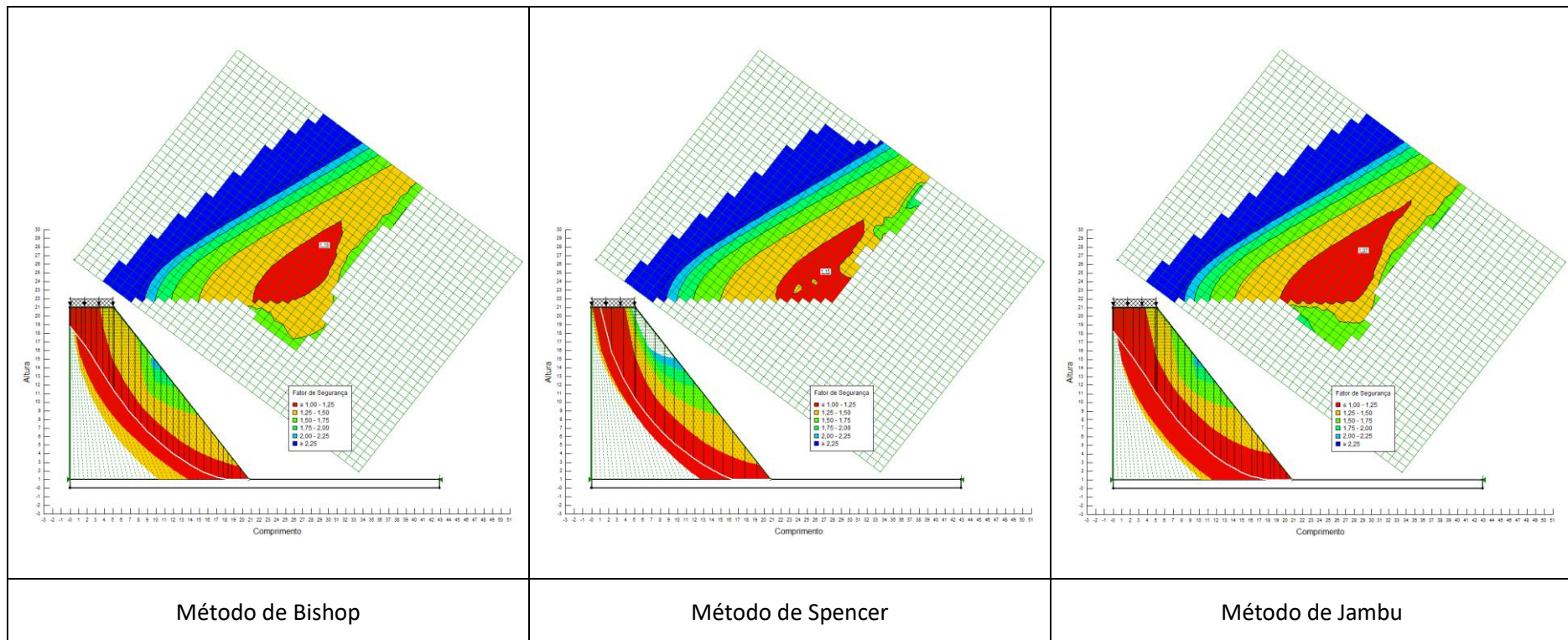
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

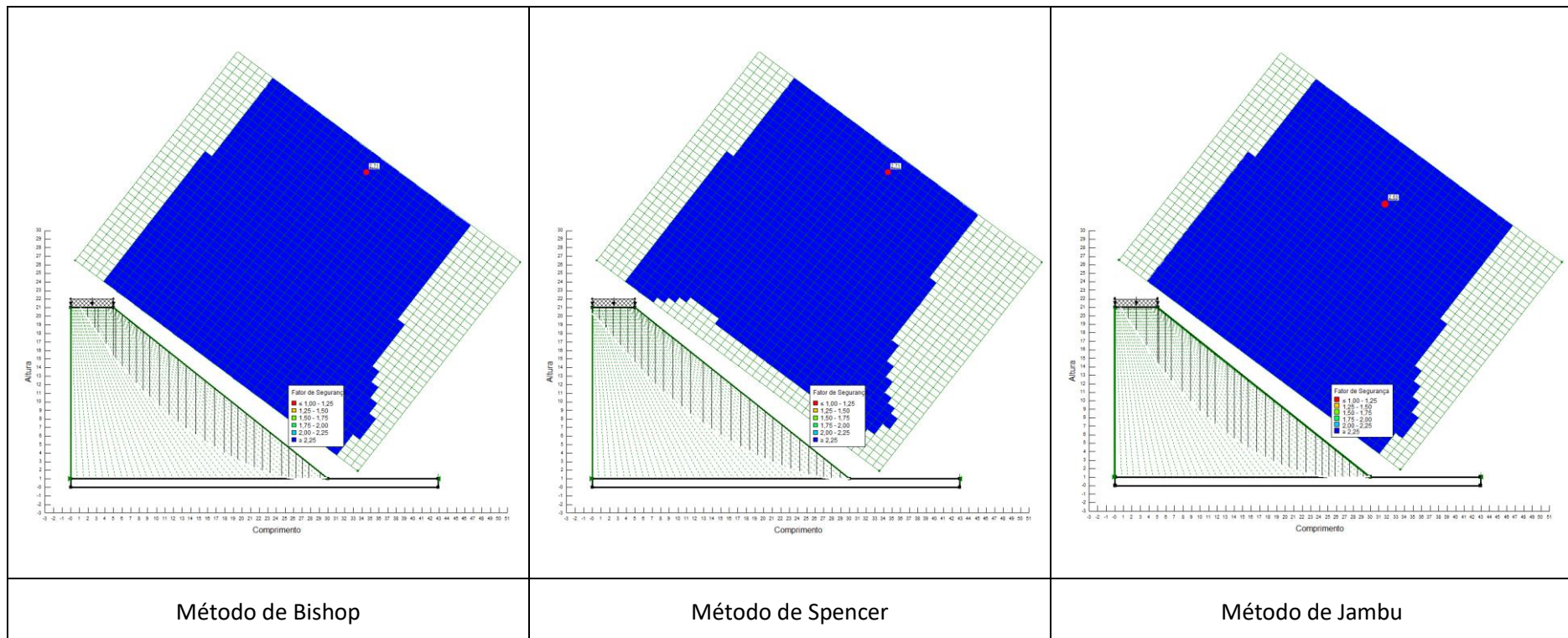
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

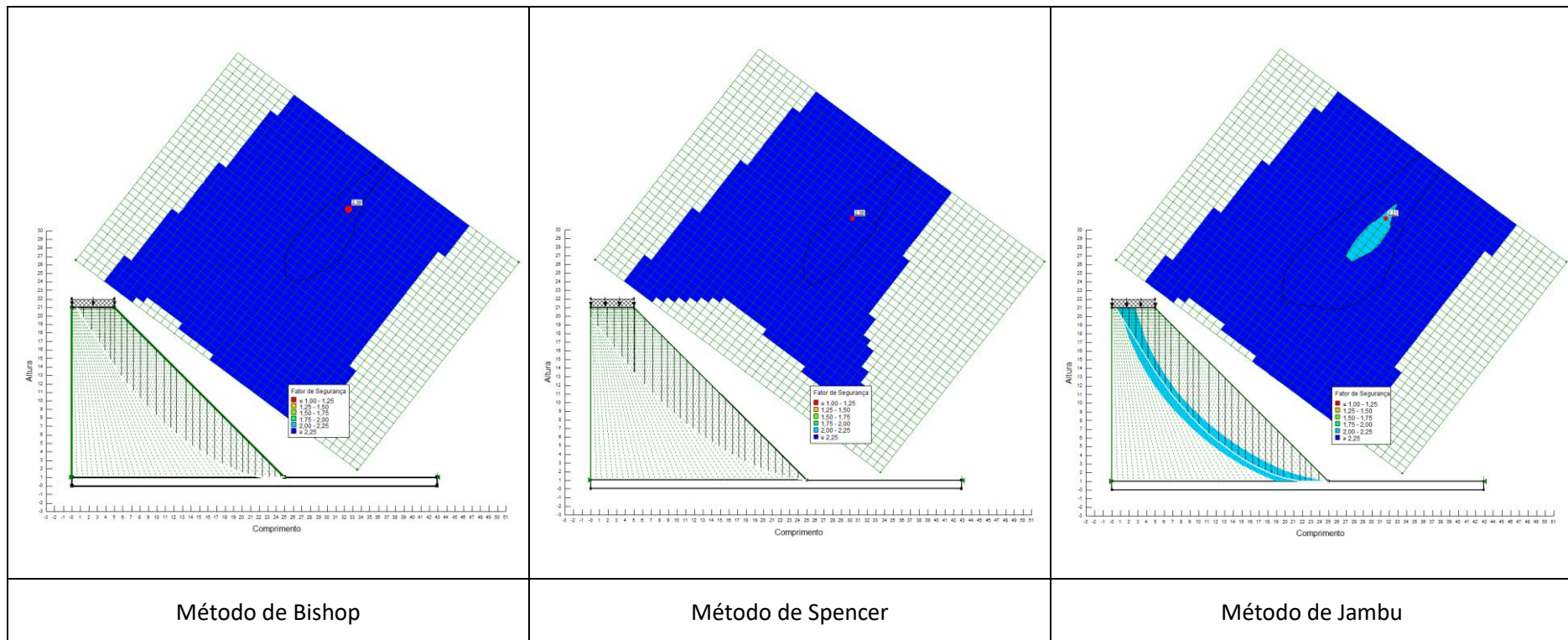
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

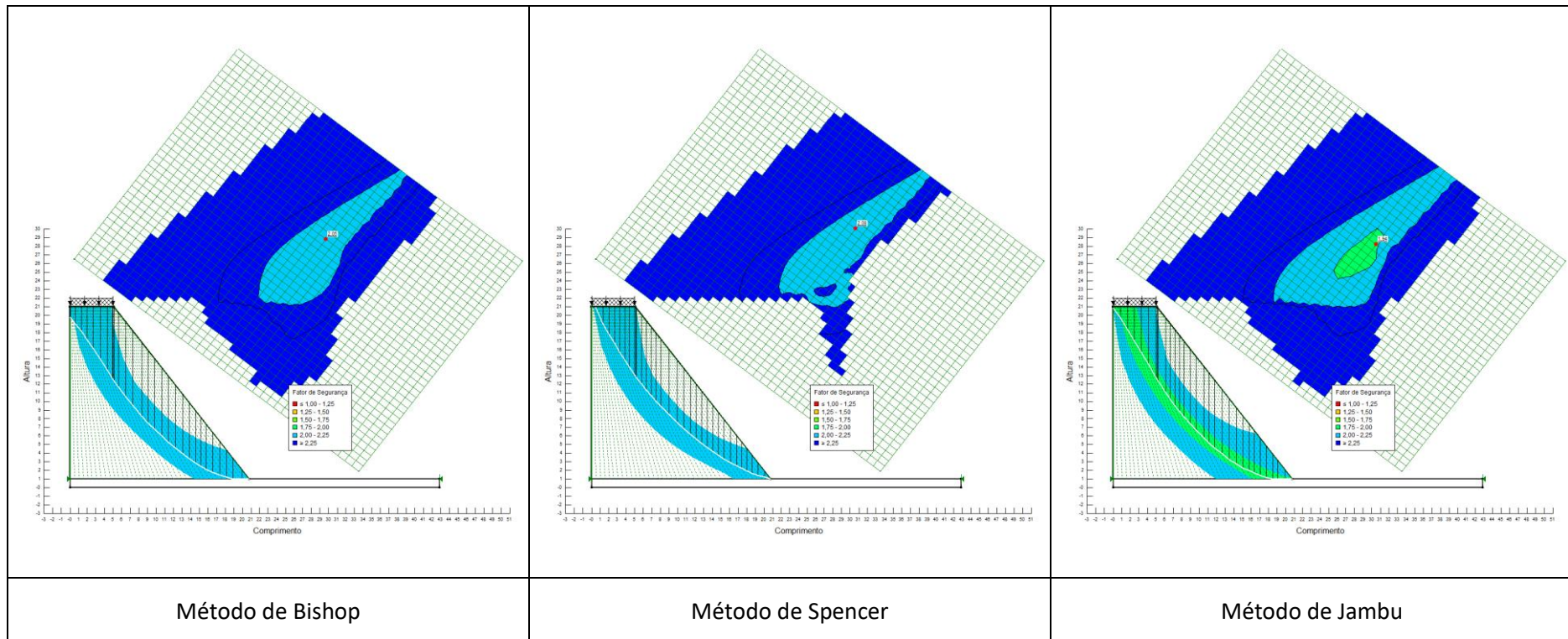
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

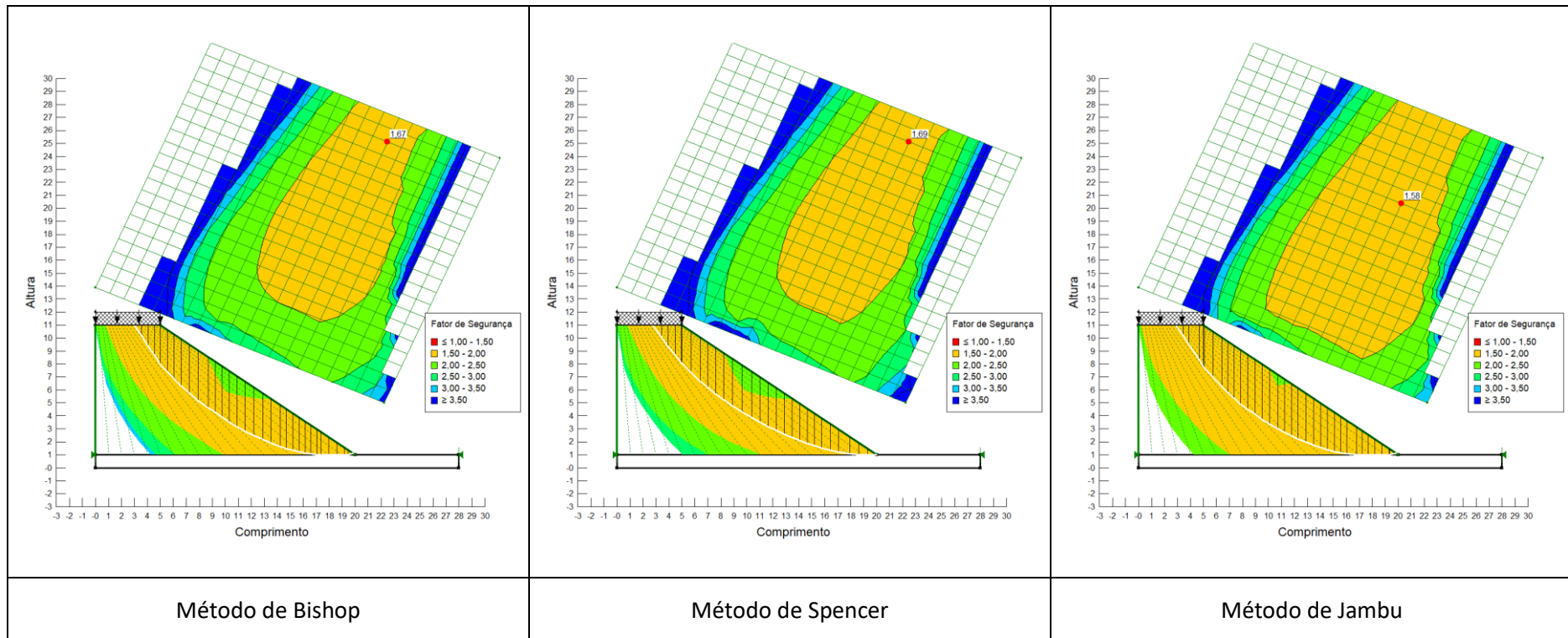
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

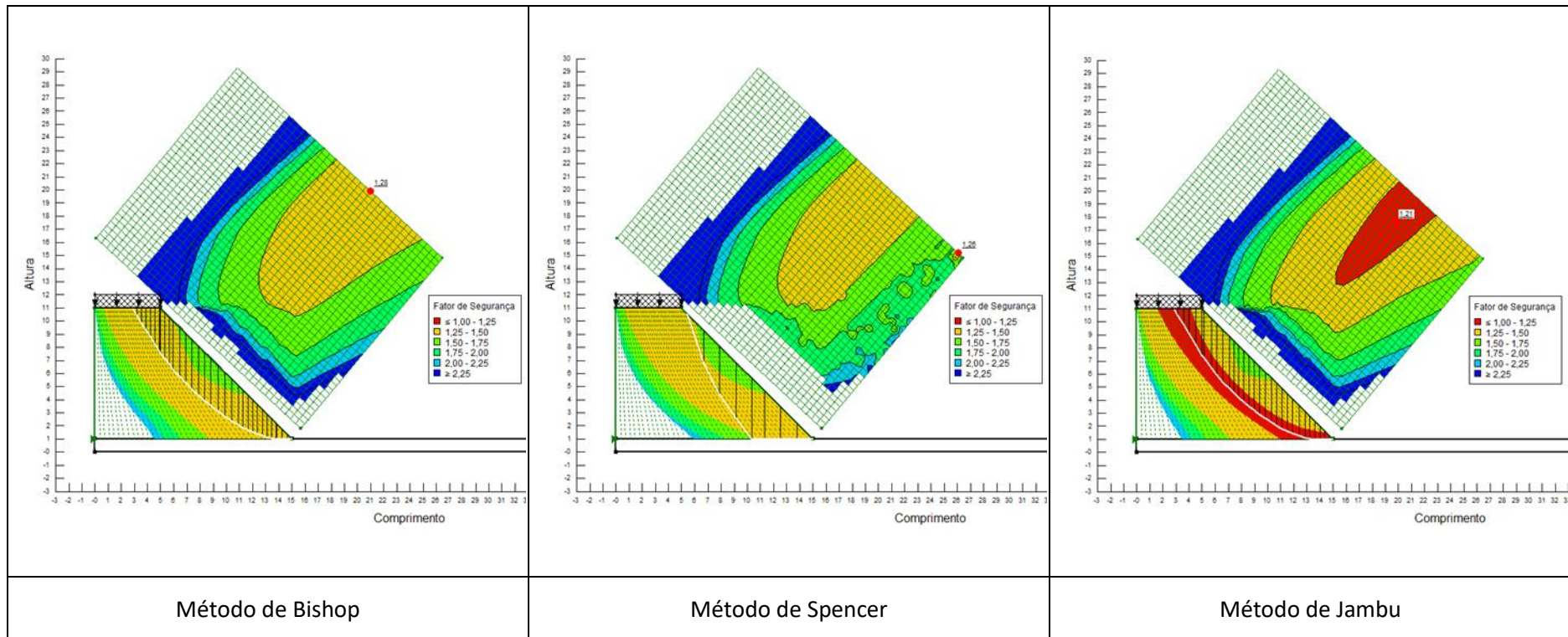
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

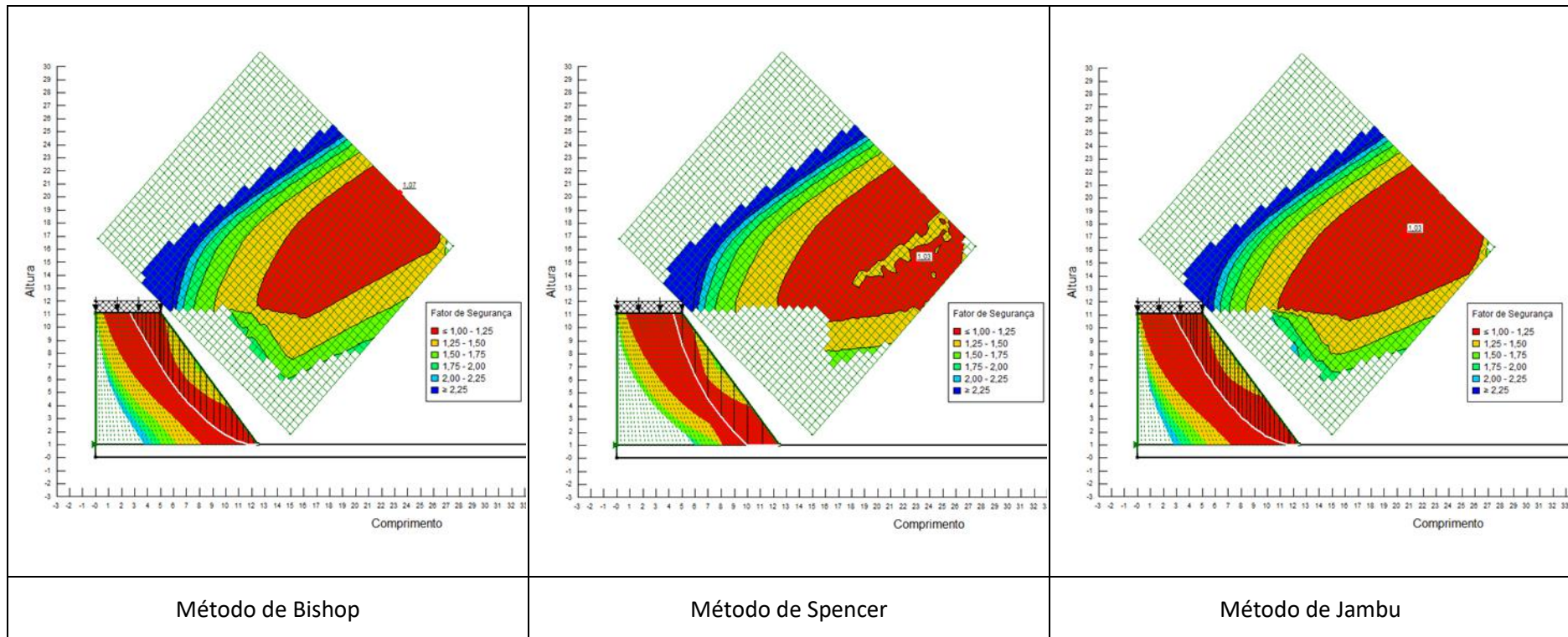
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

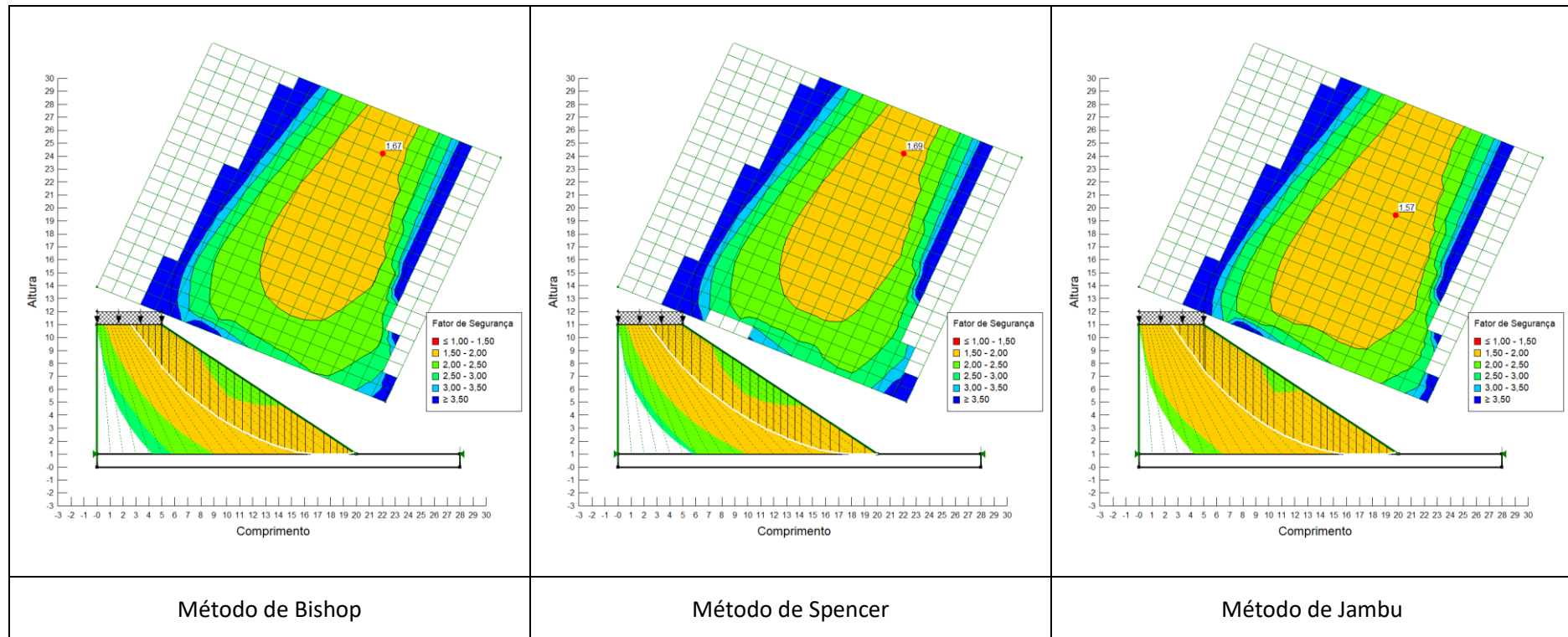
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

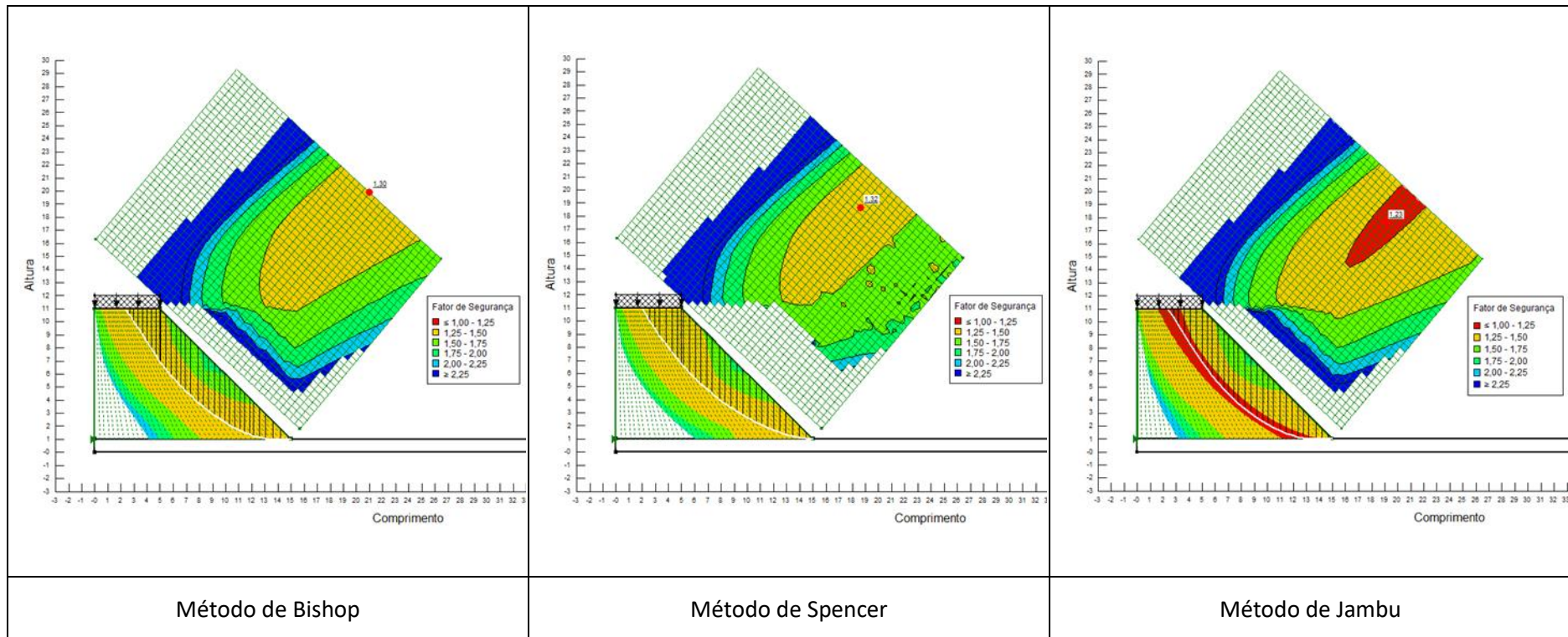
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

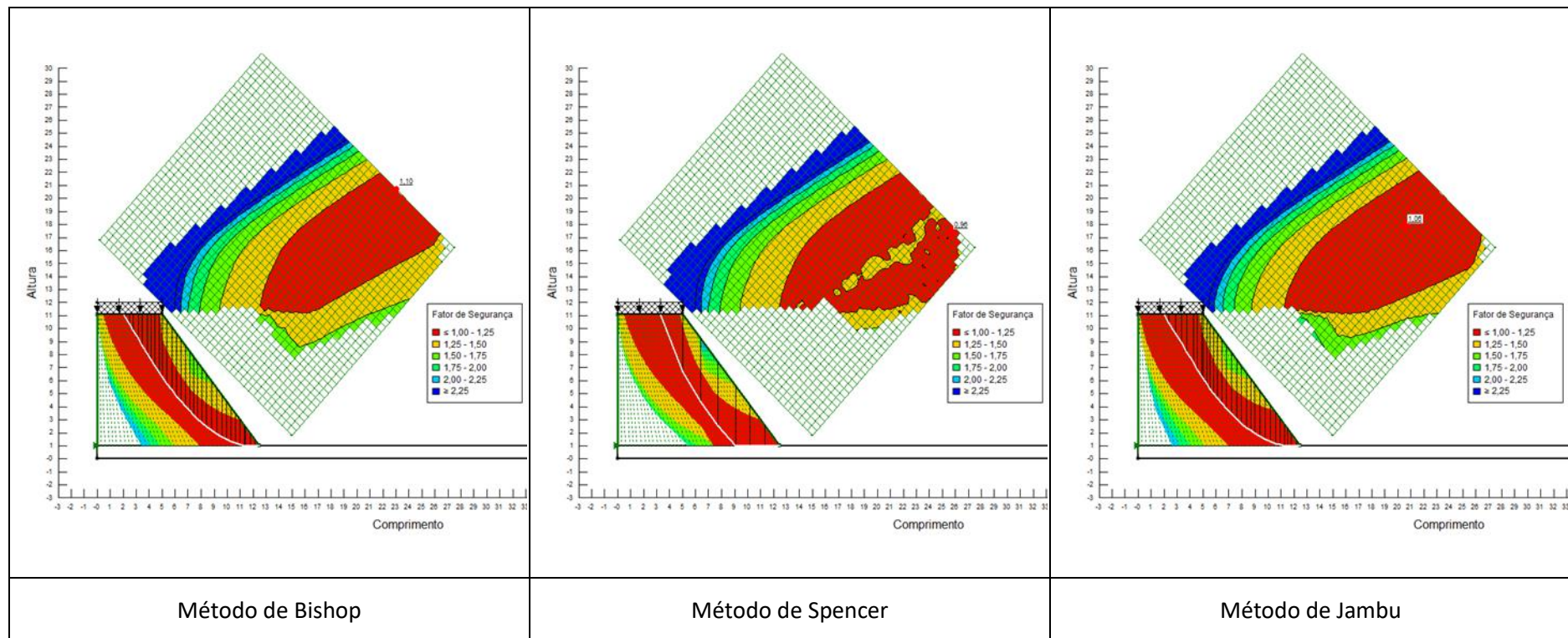
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

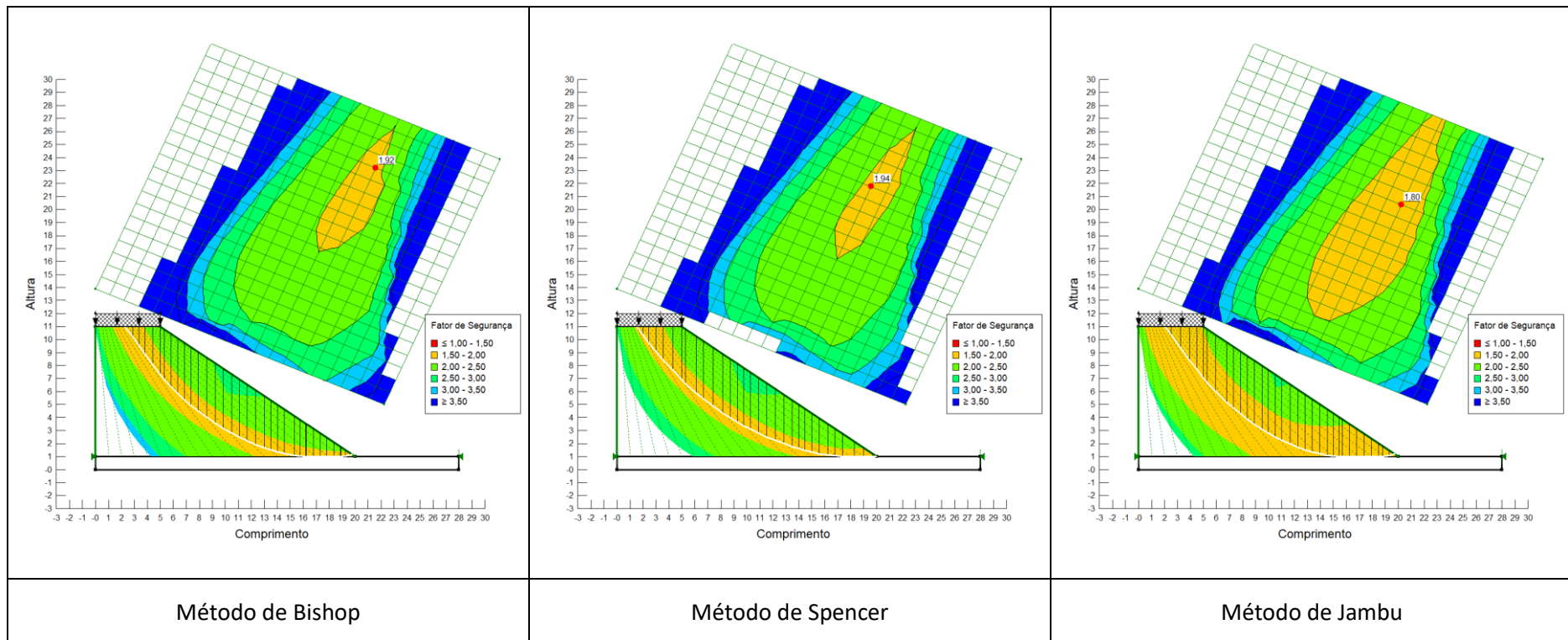
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

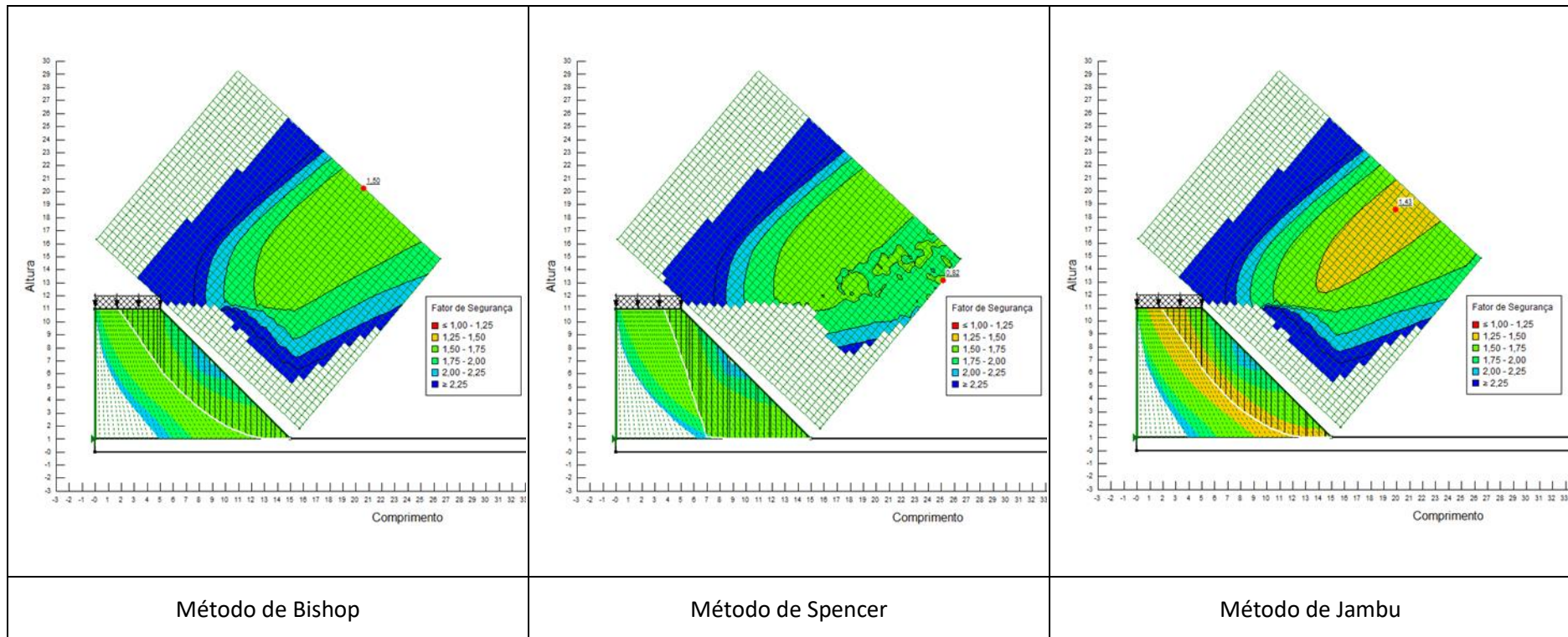
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

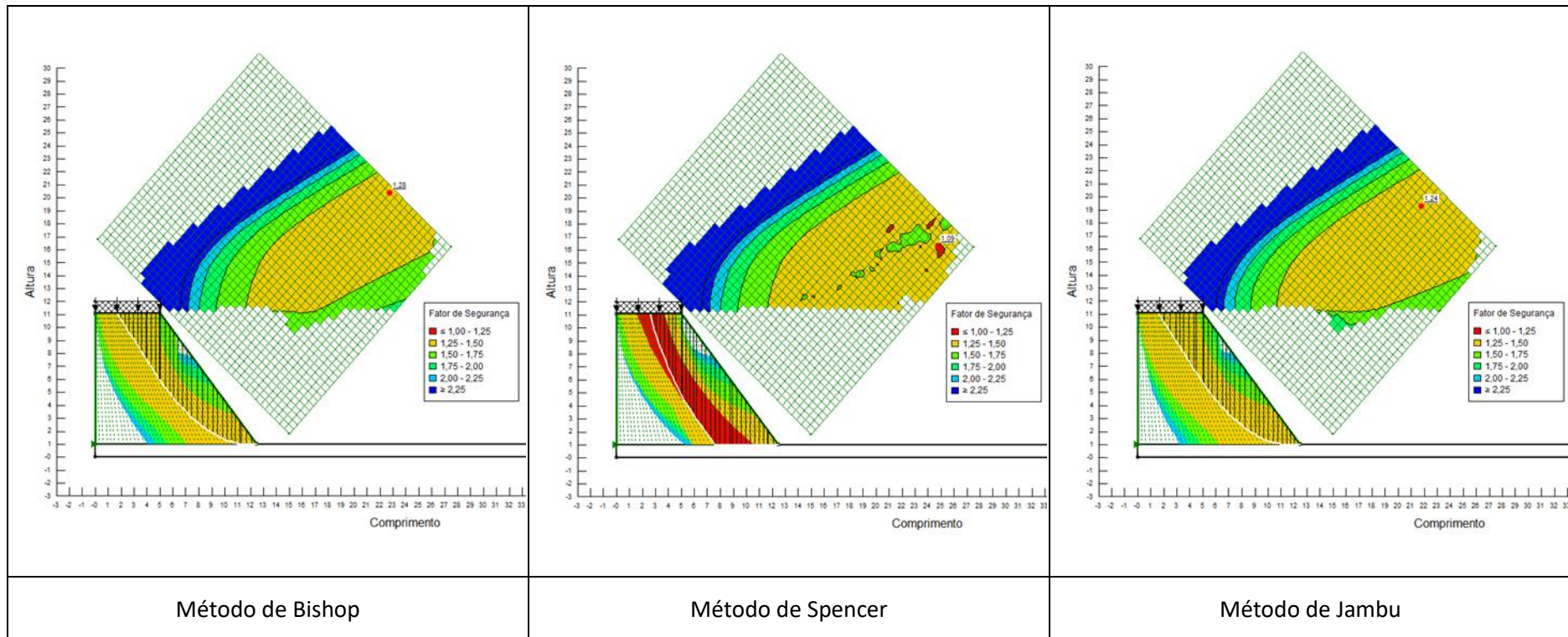
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

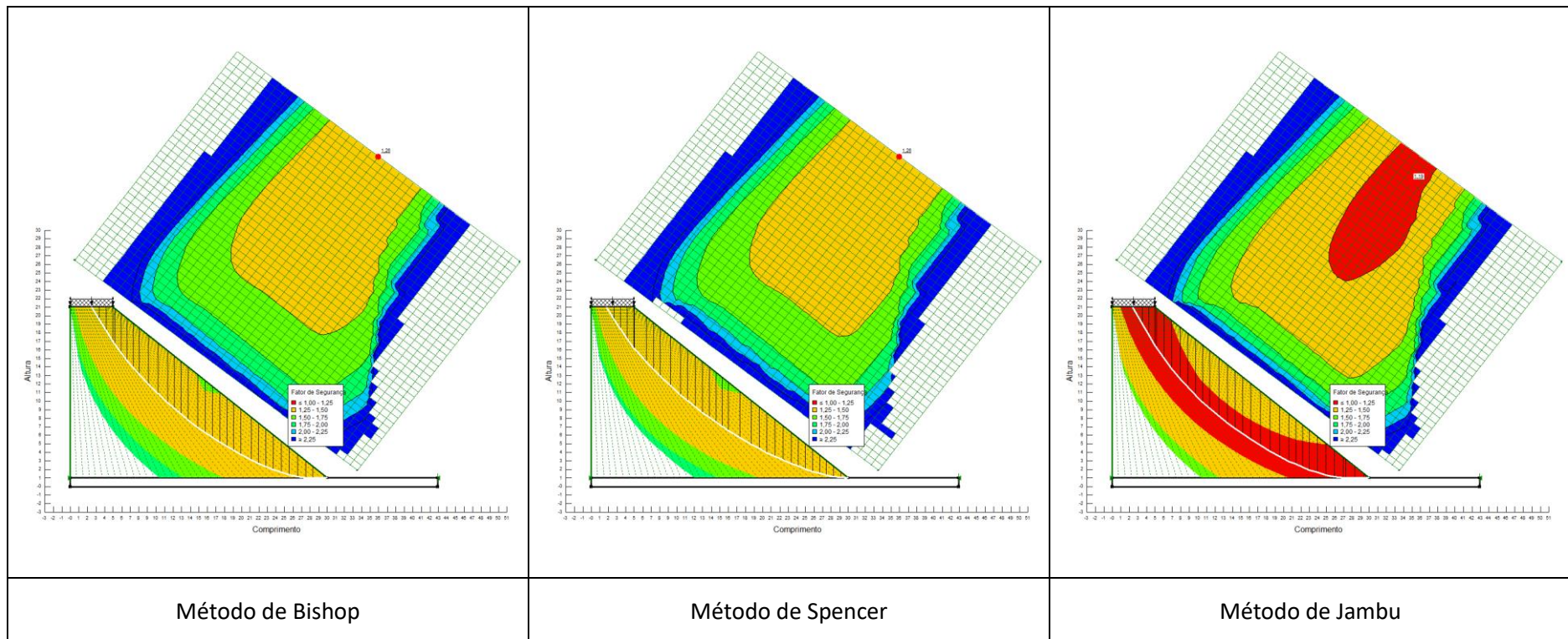
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

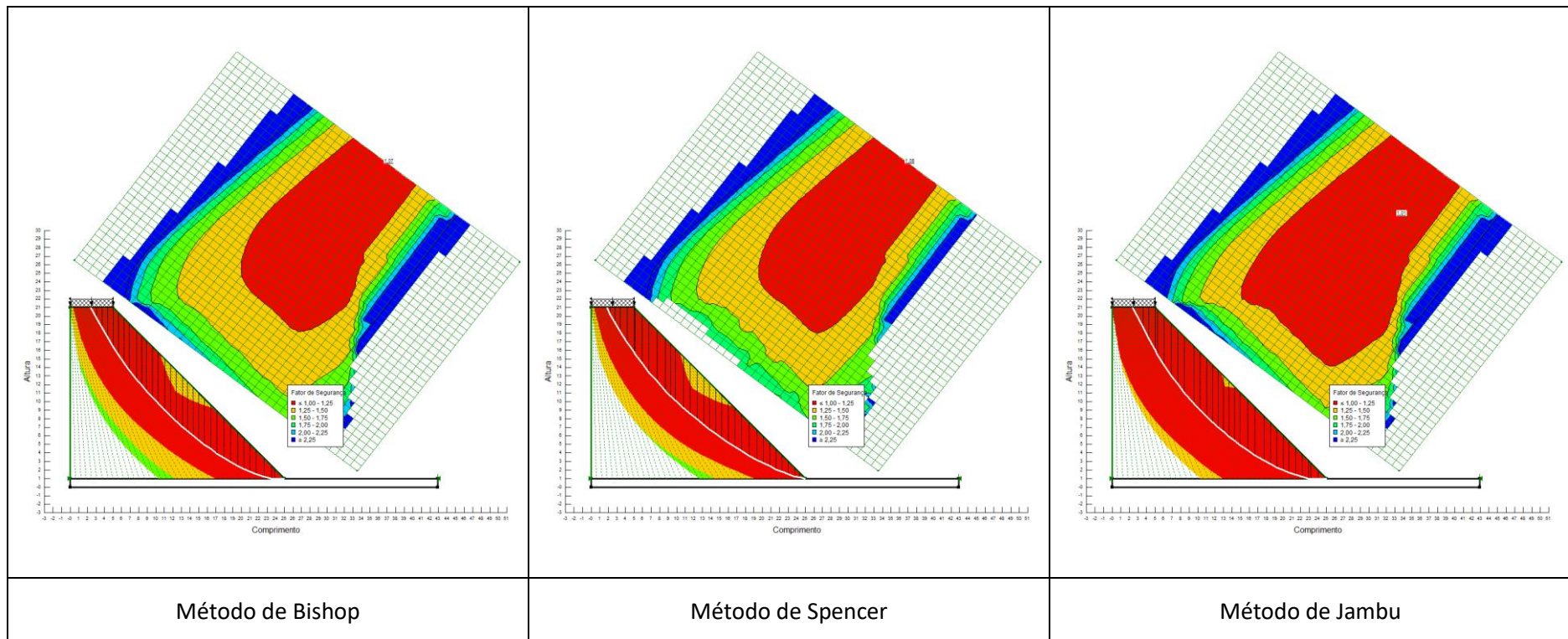
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

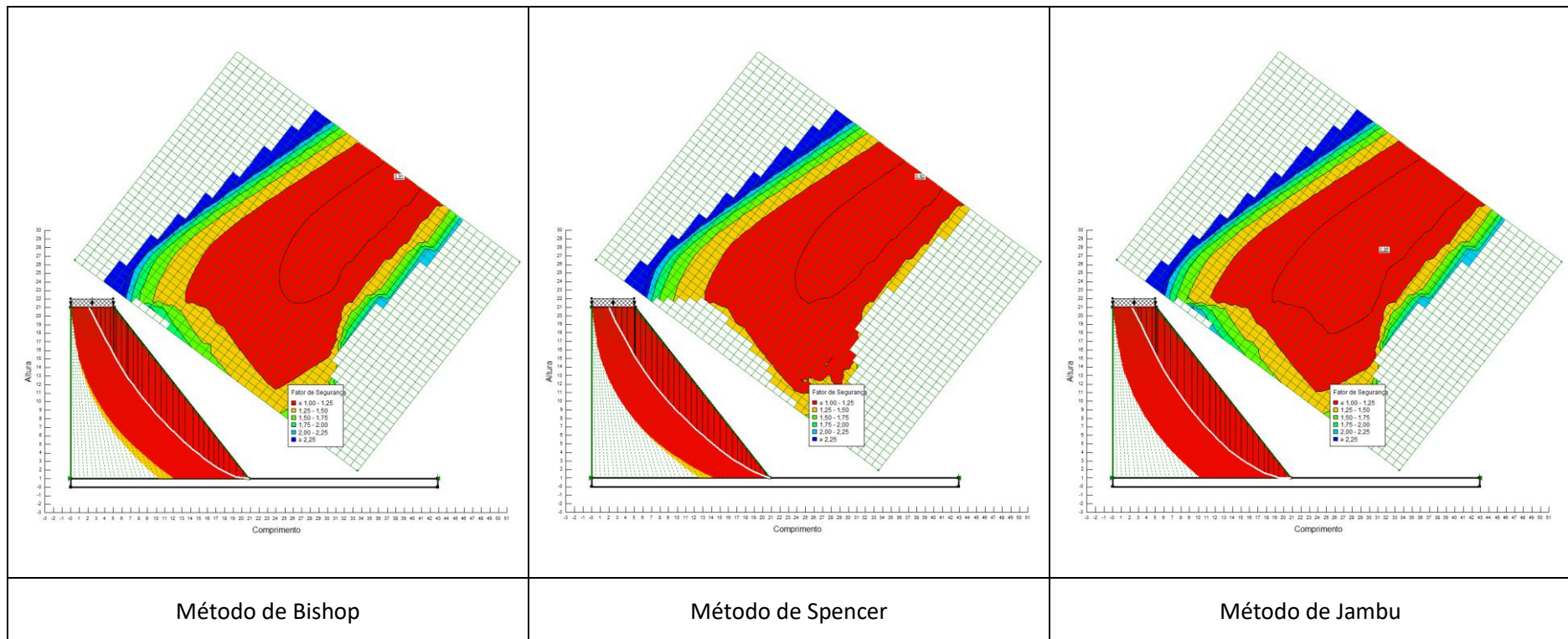
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

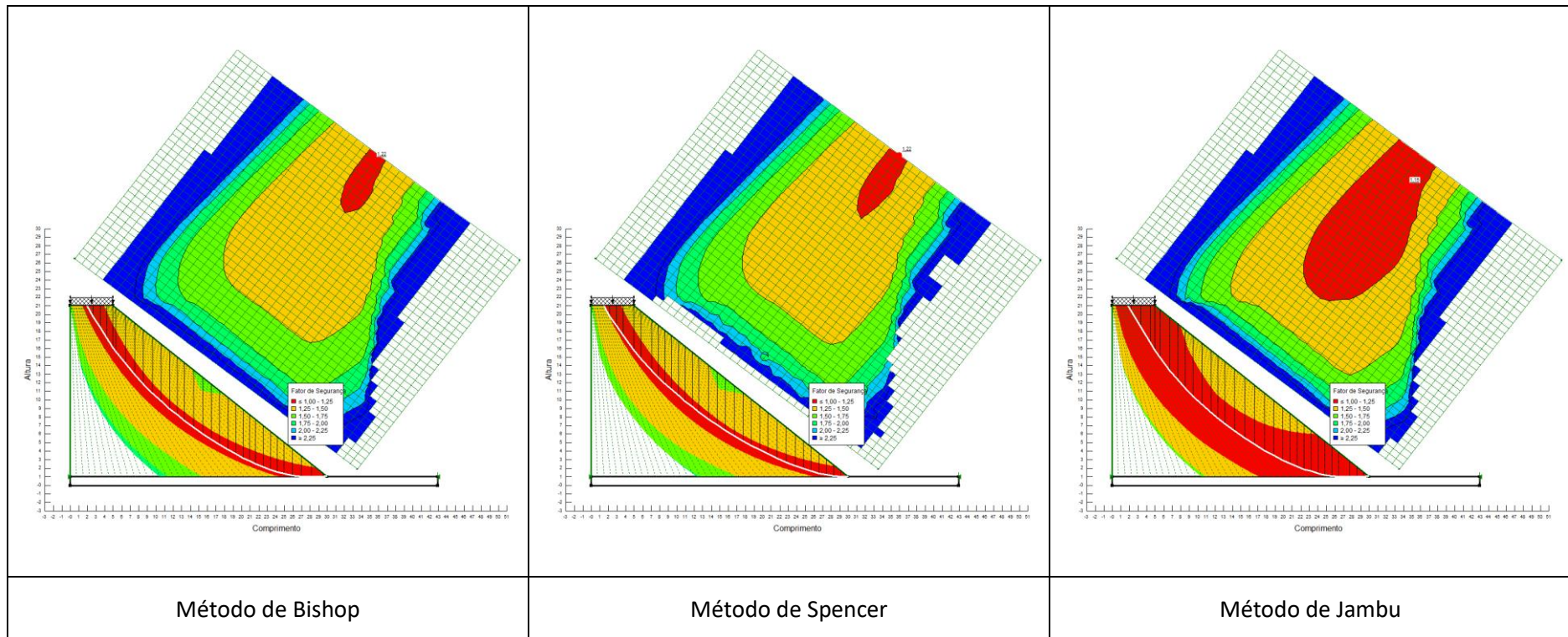
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

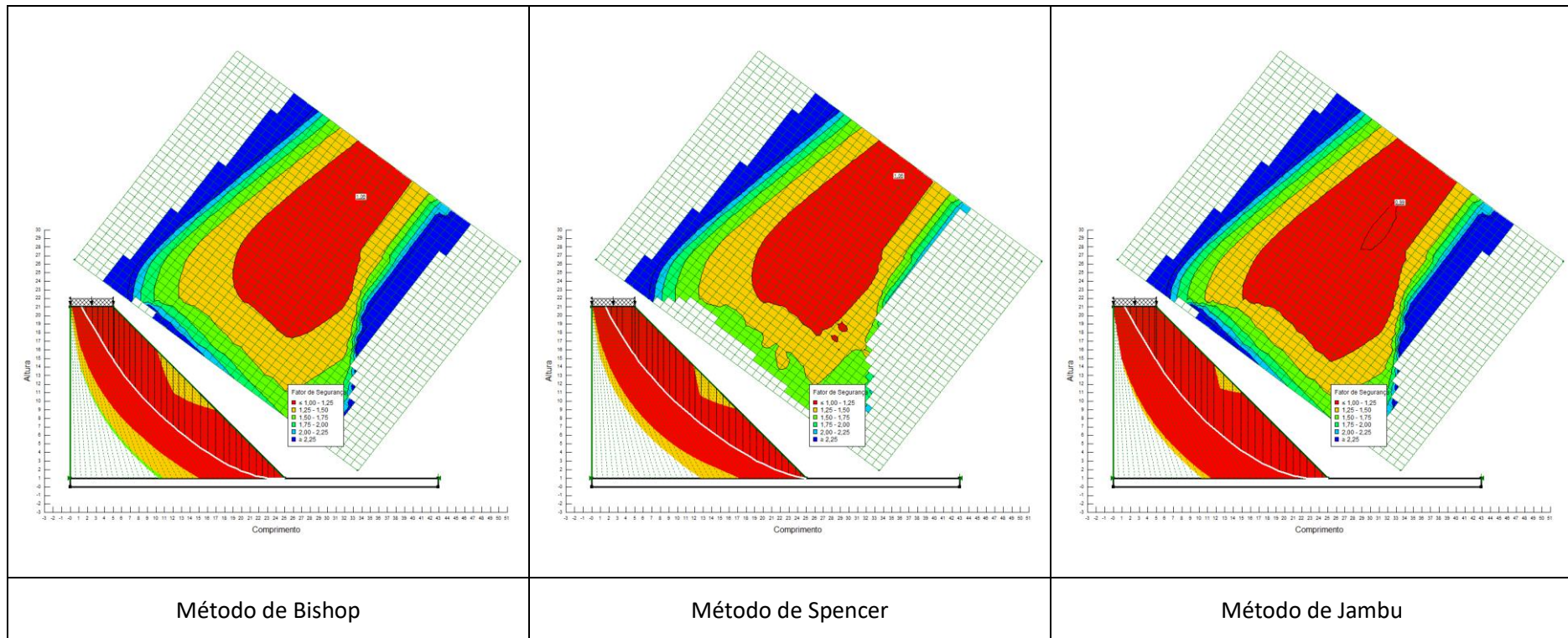
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

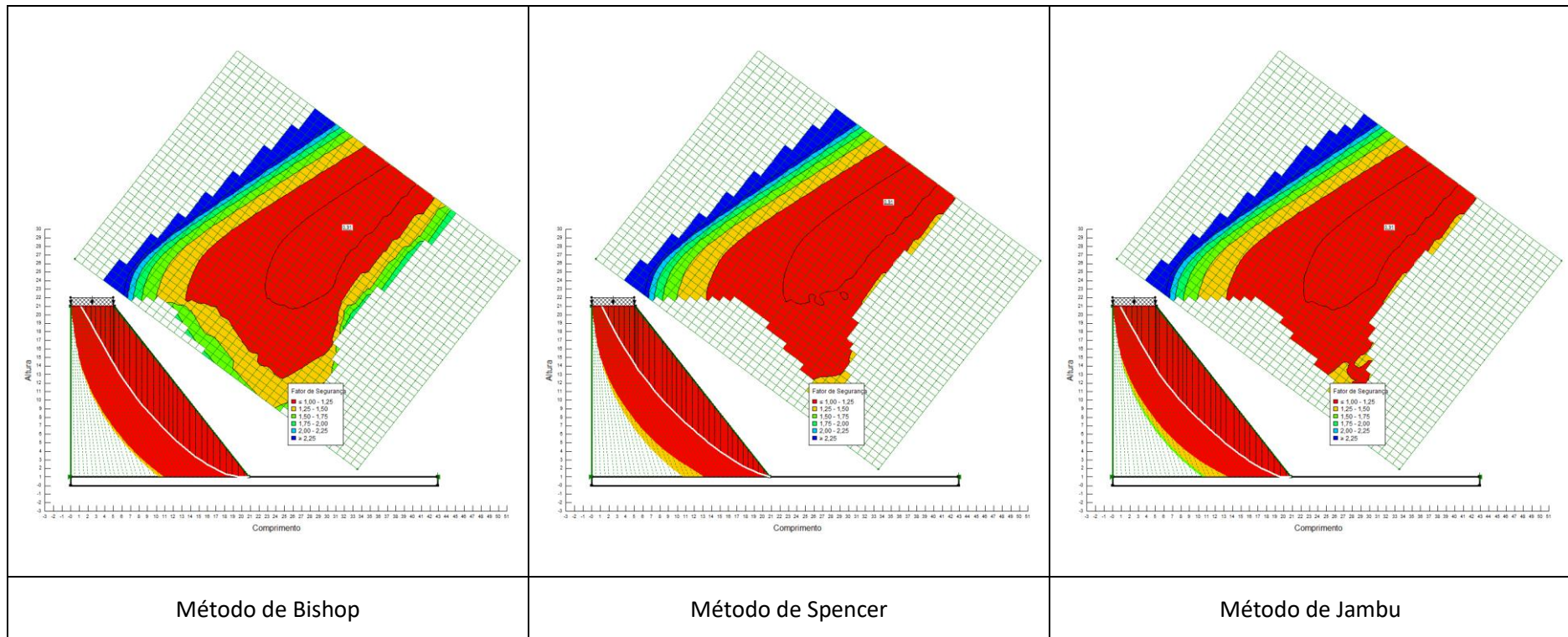
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

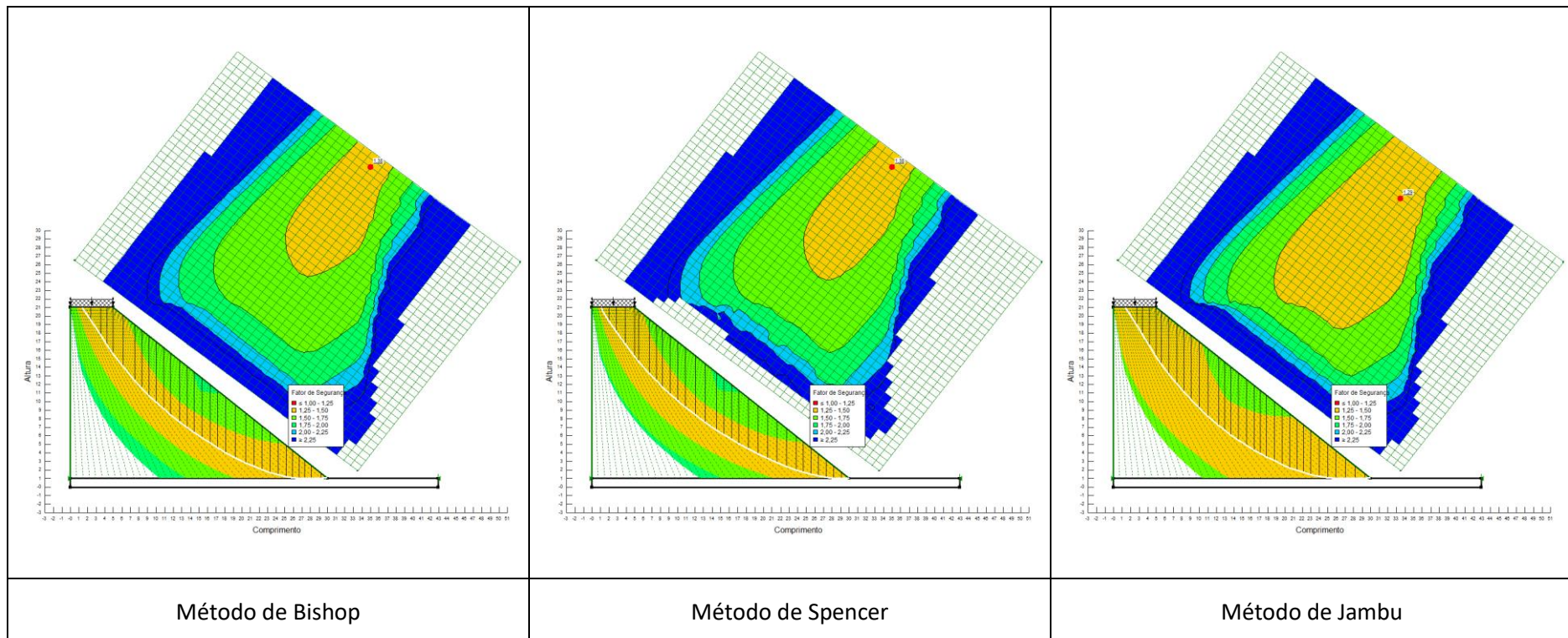
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

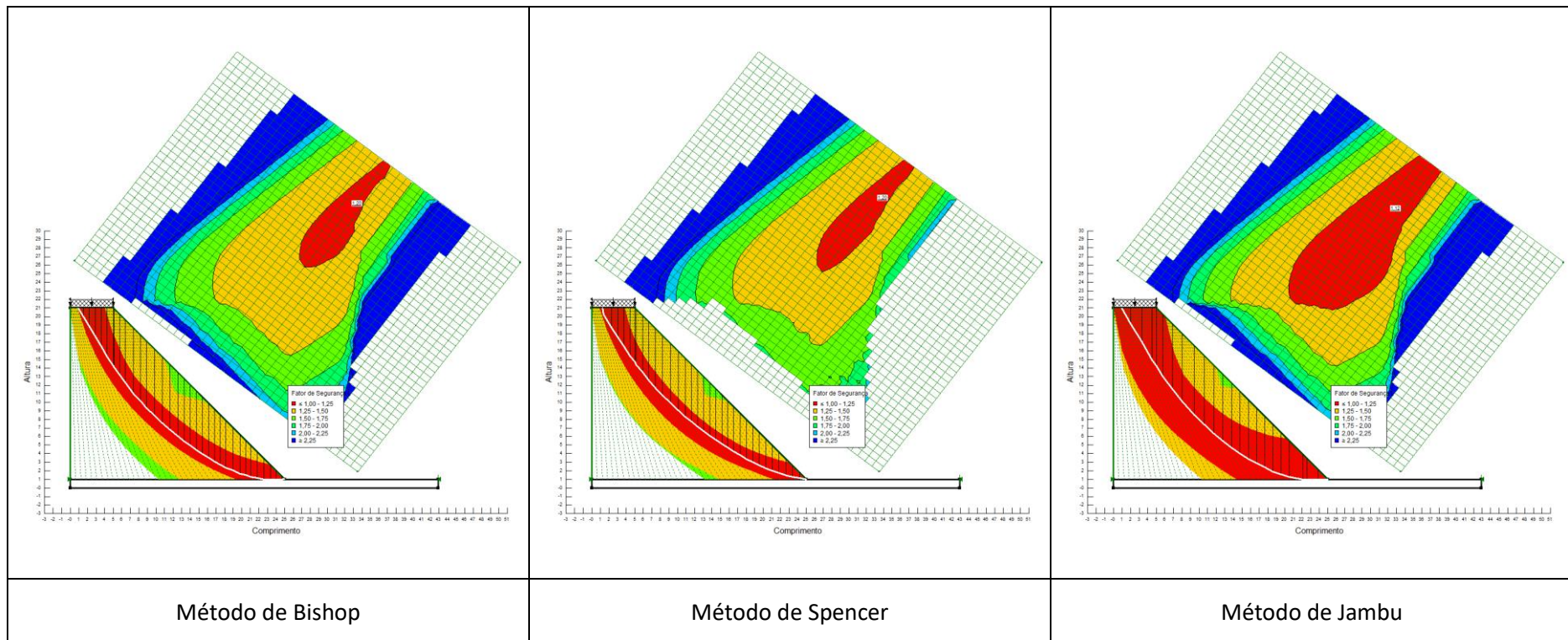
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

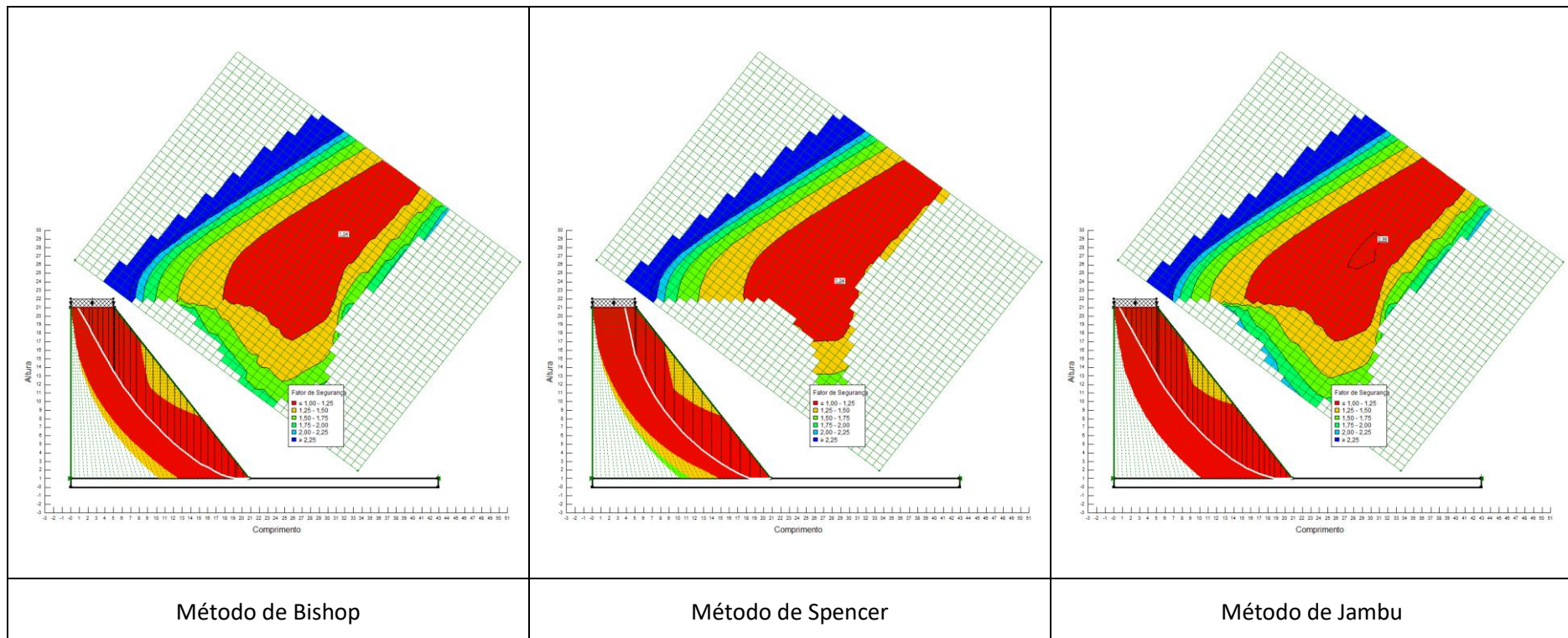
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z1 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75

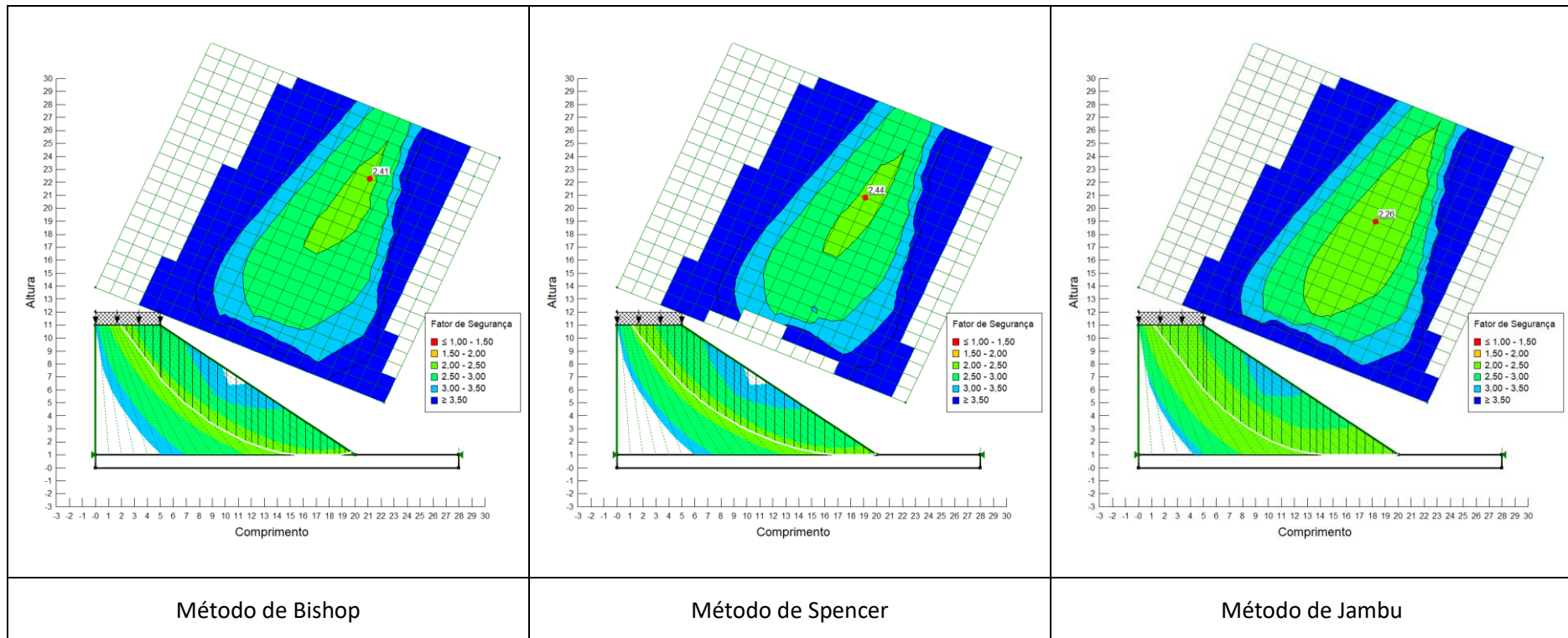


SOLO Z2

SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

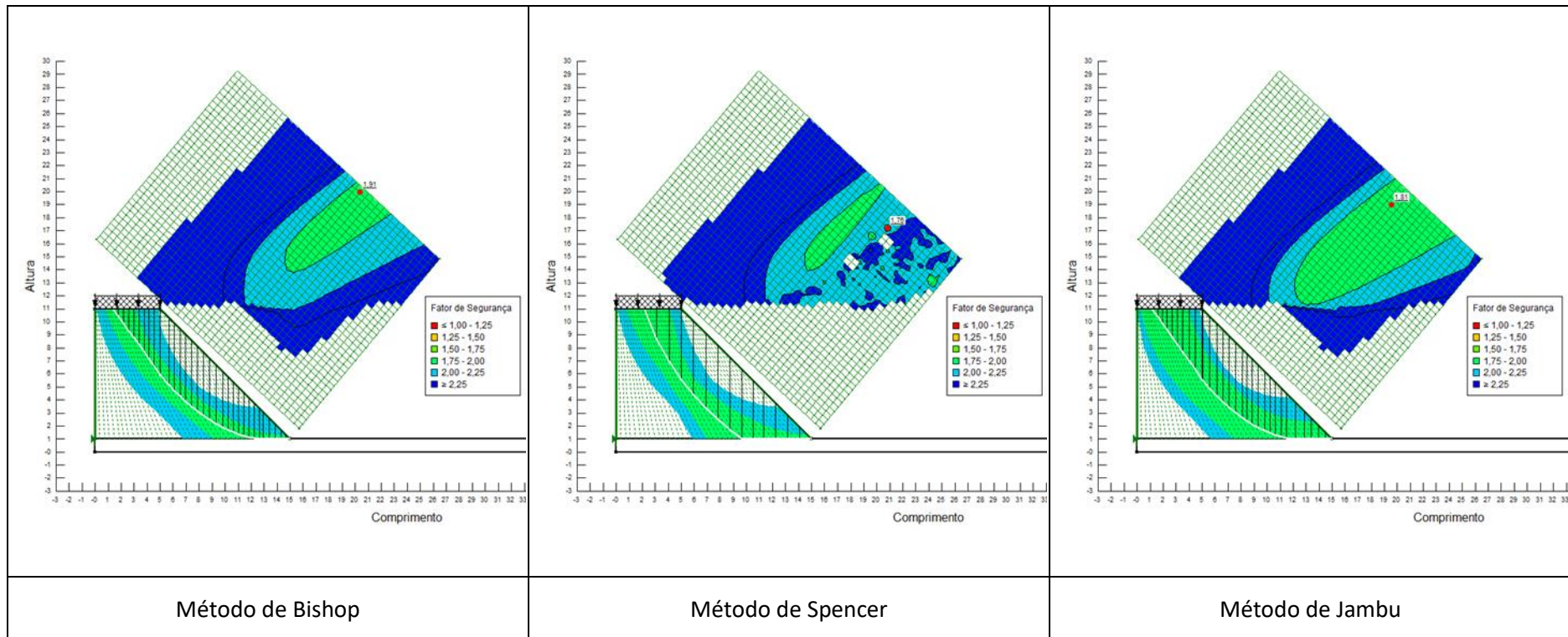
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

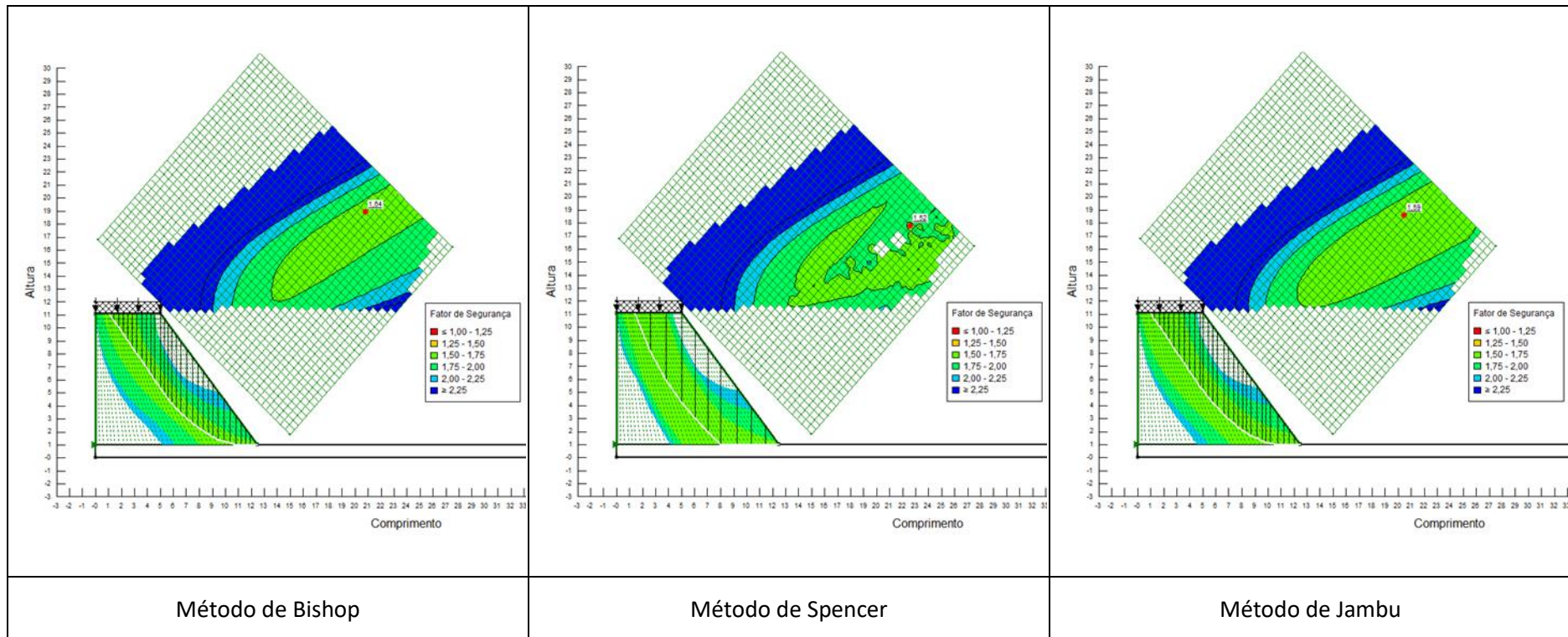
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

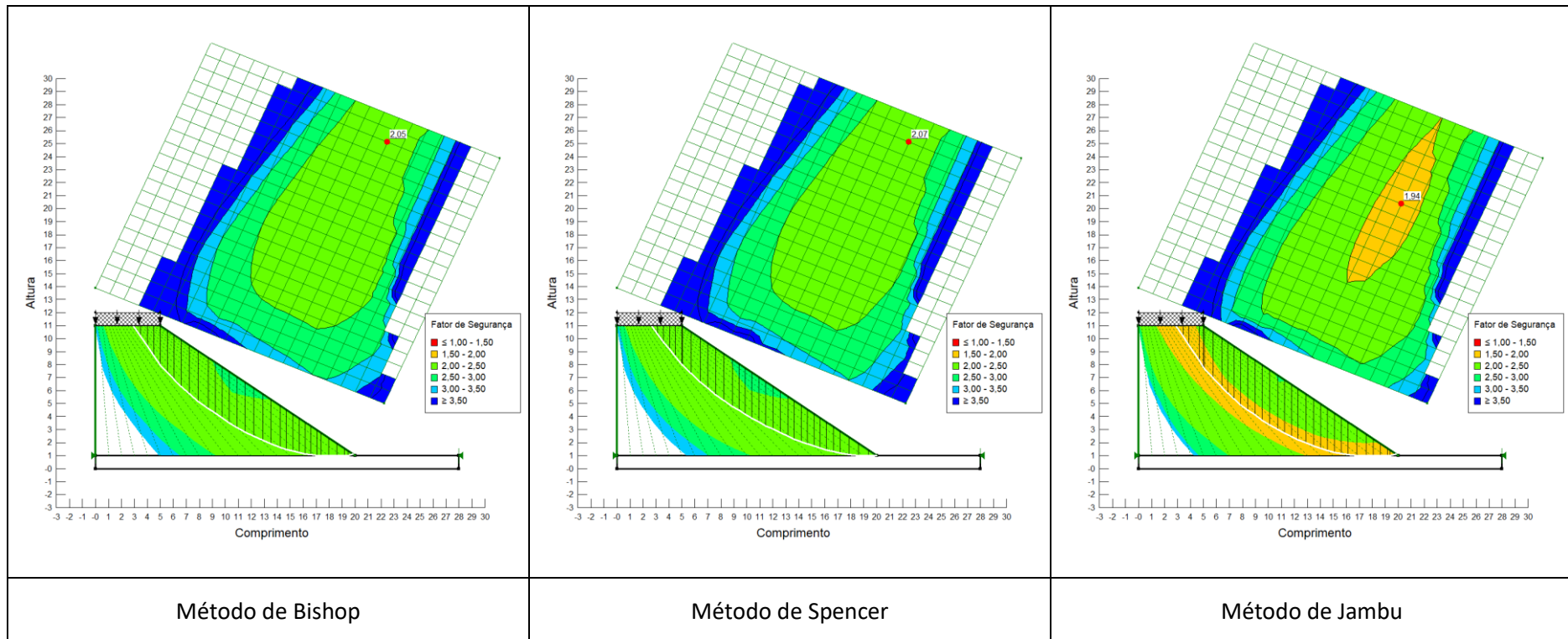
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

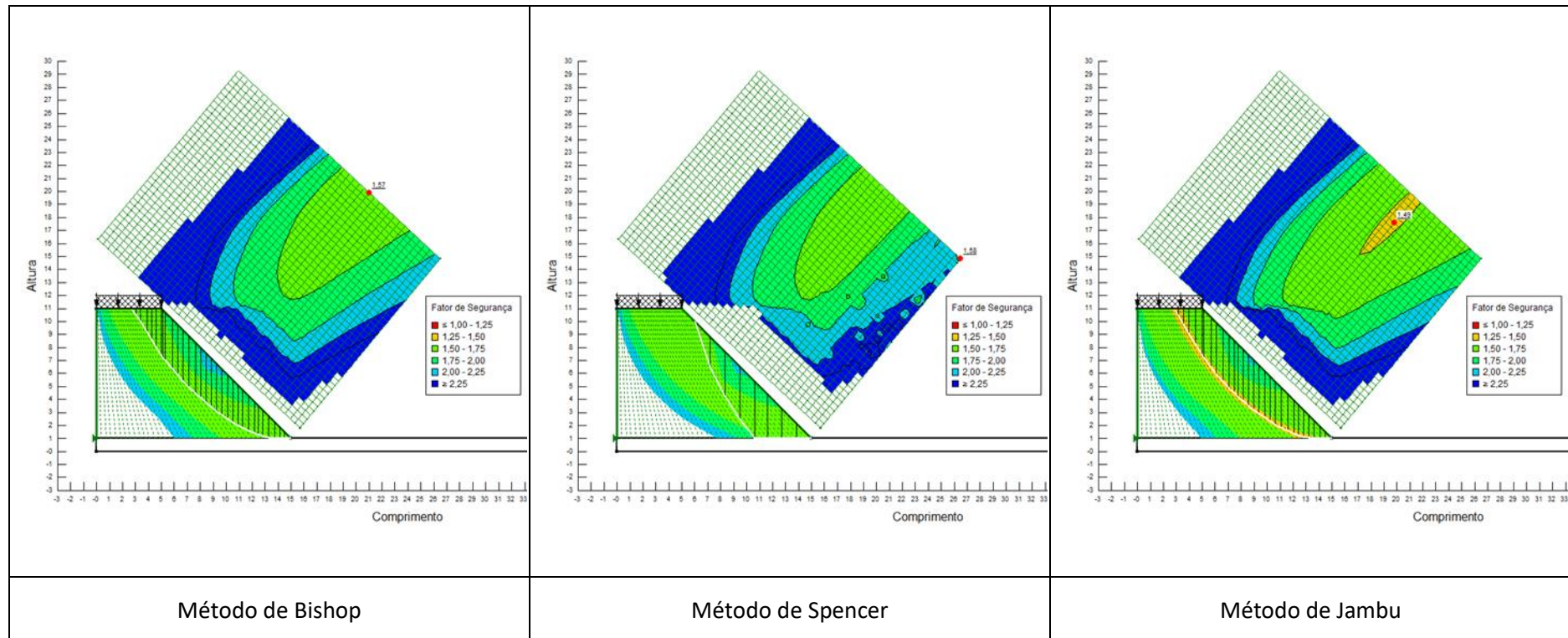
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

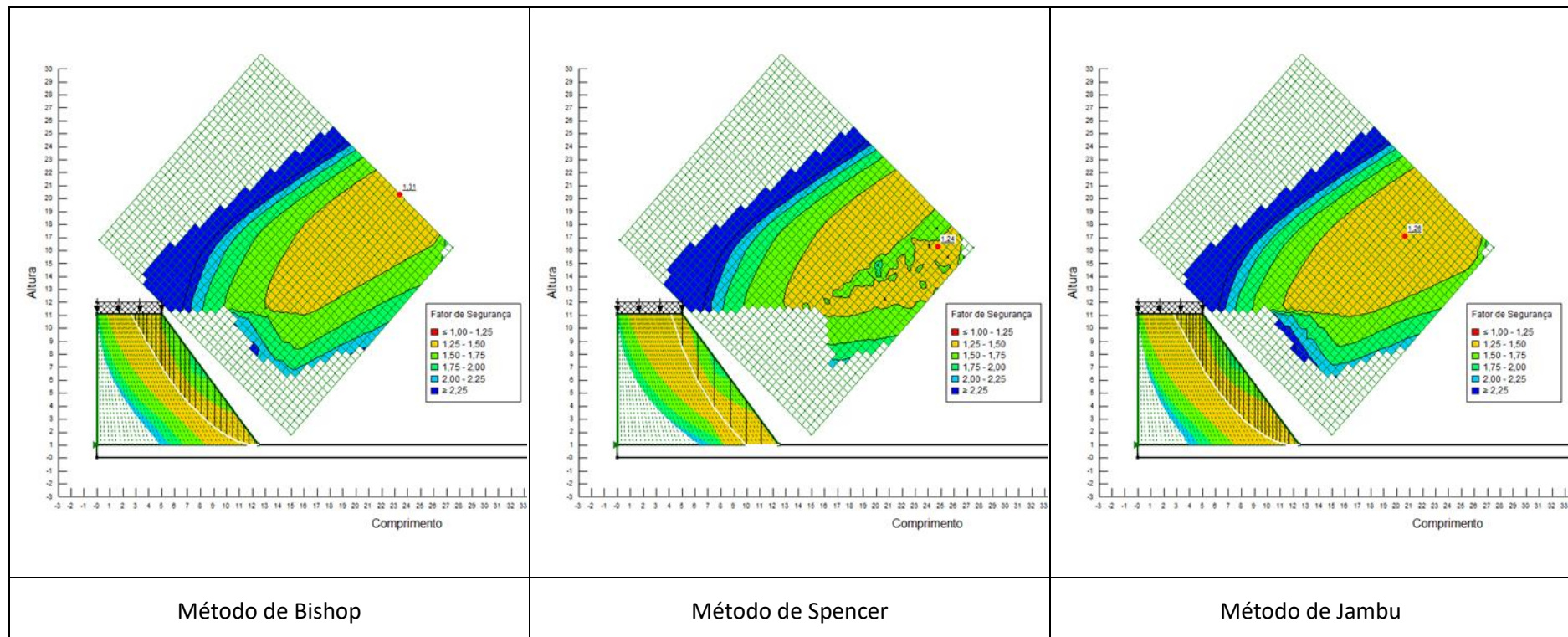
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

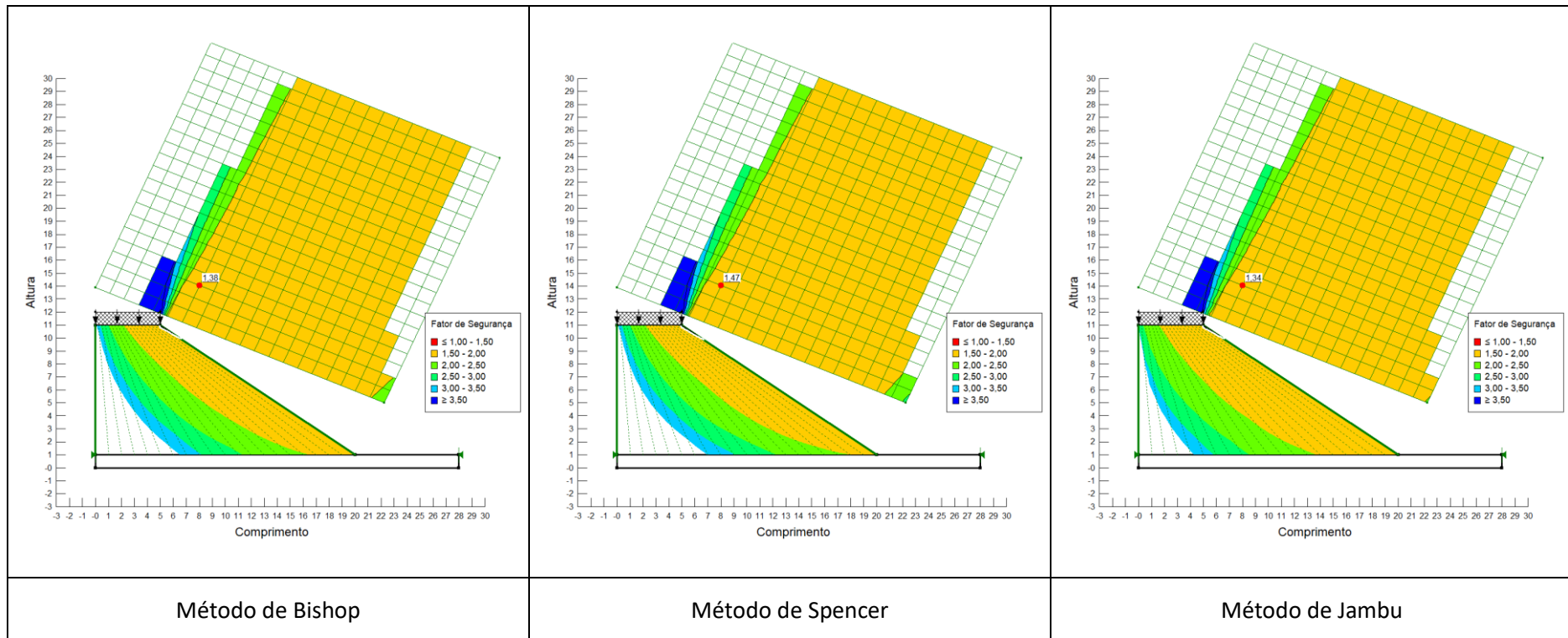
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

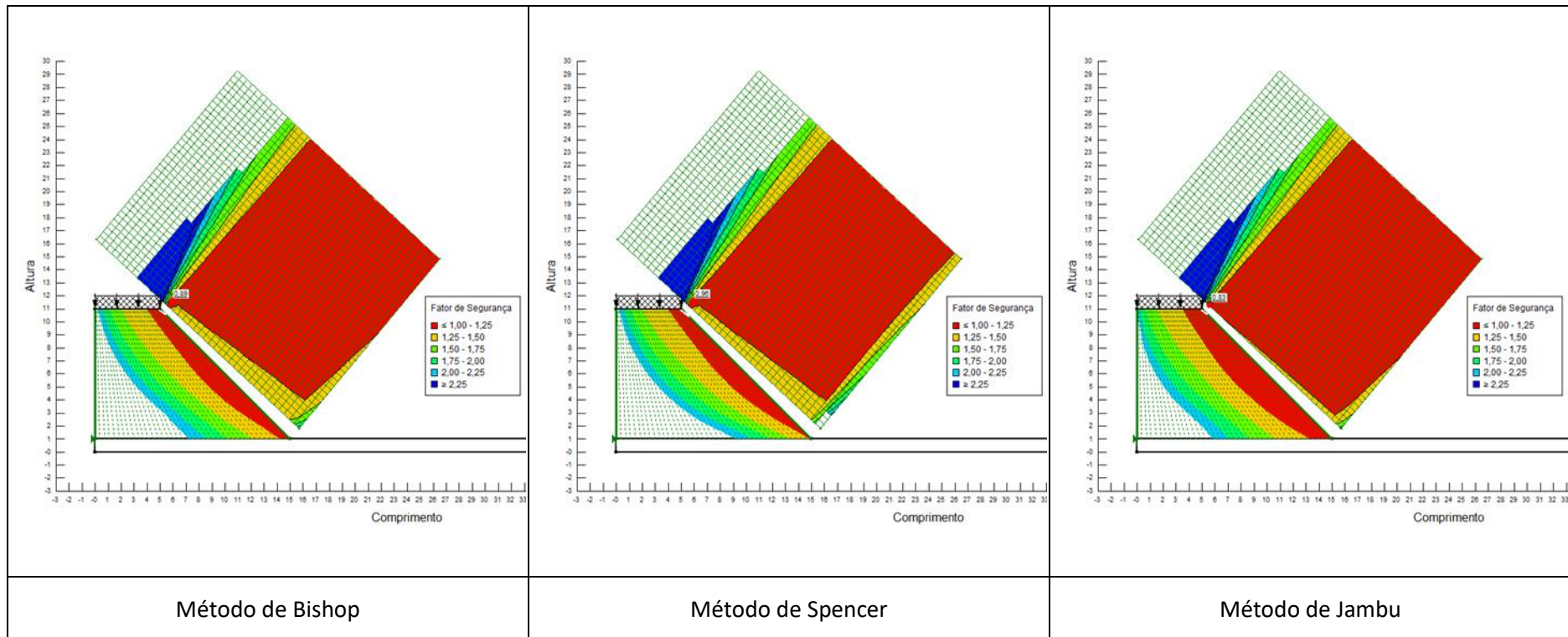
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

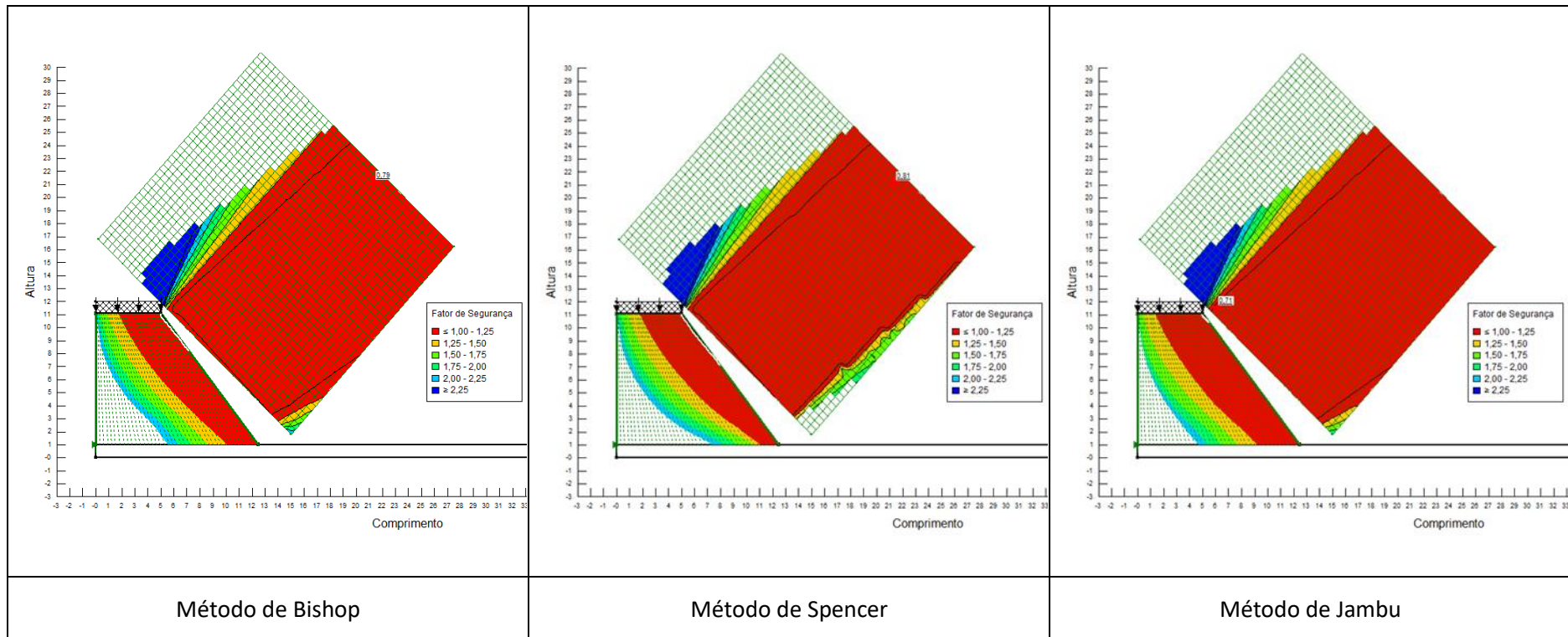
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

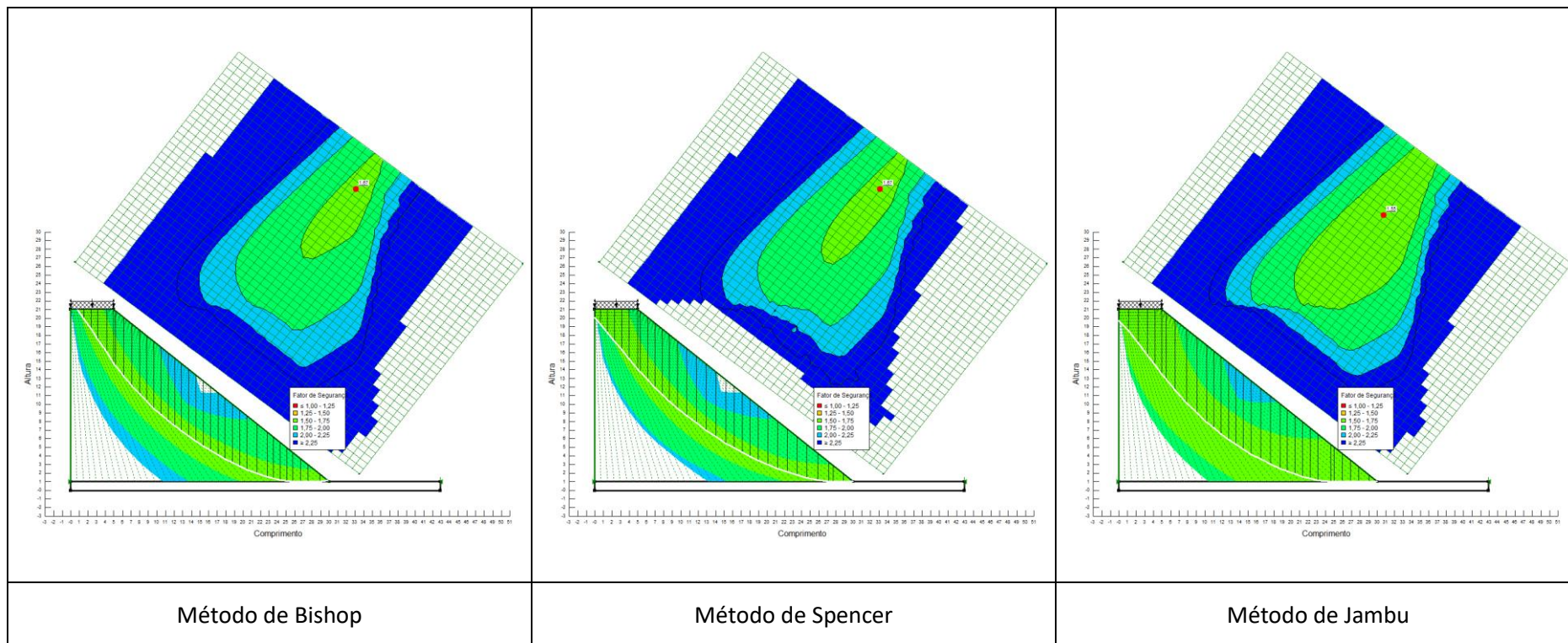
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

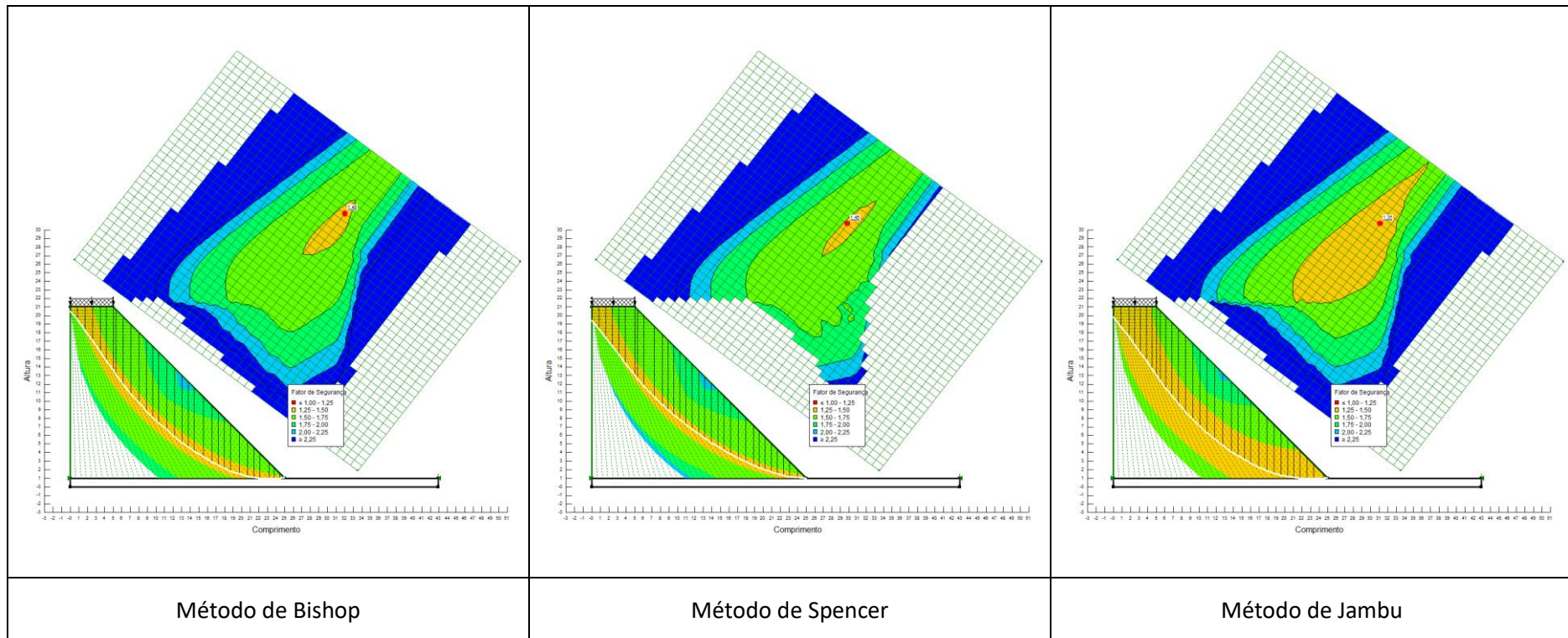
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

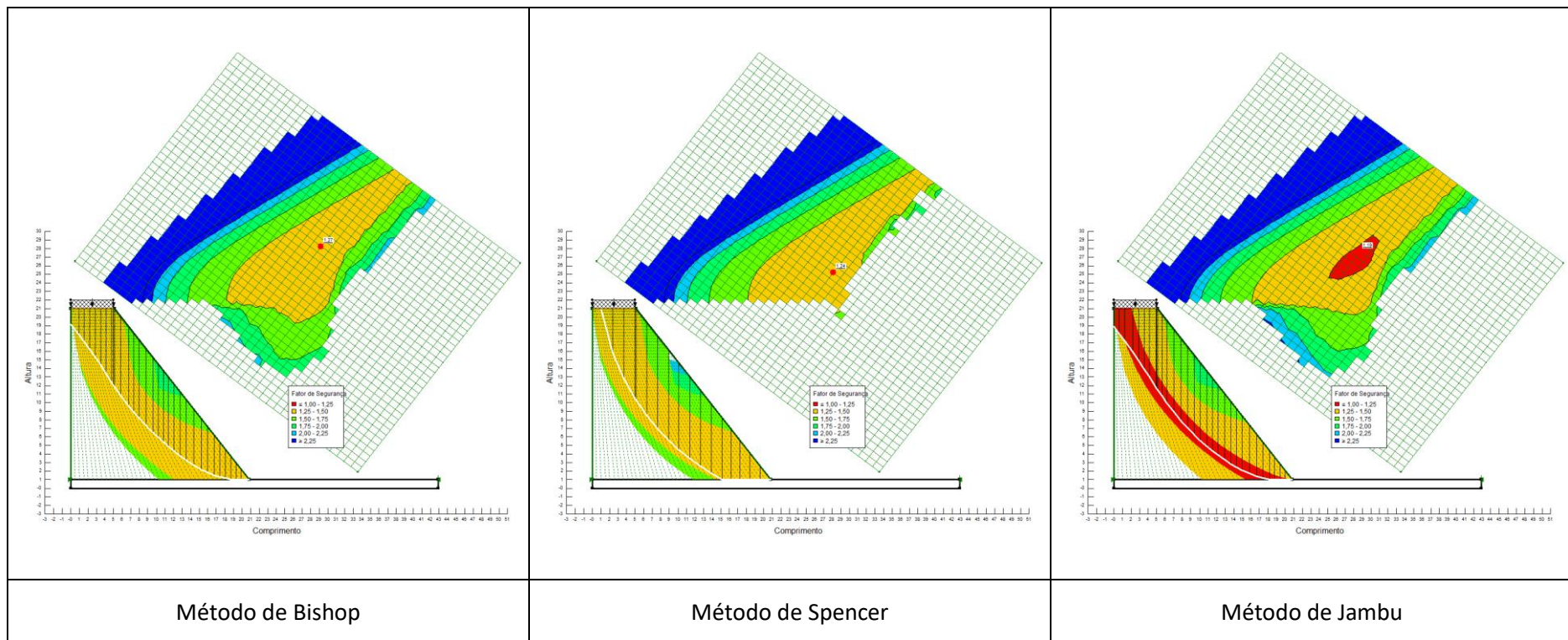
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

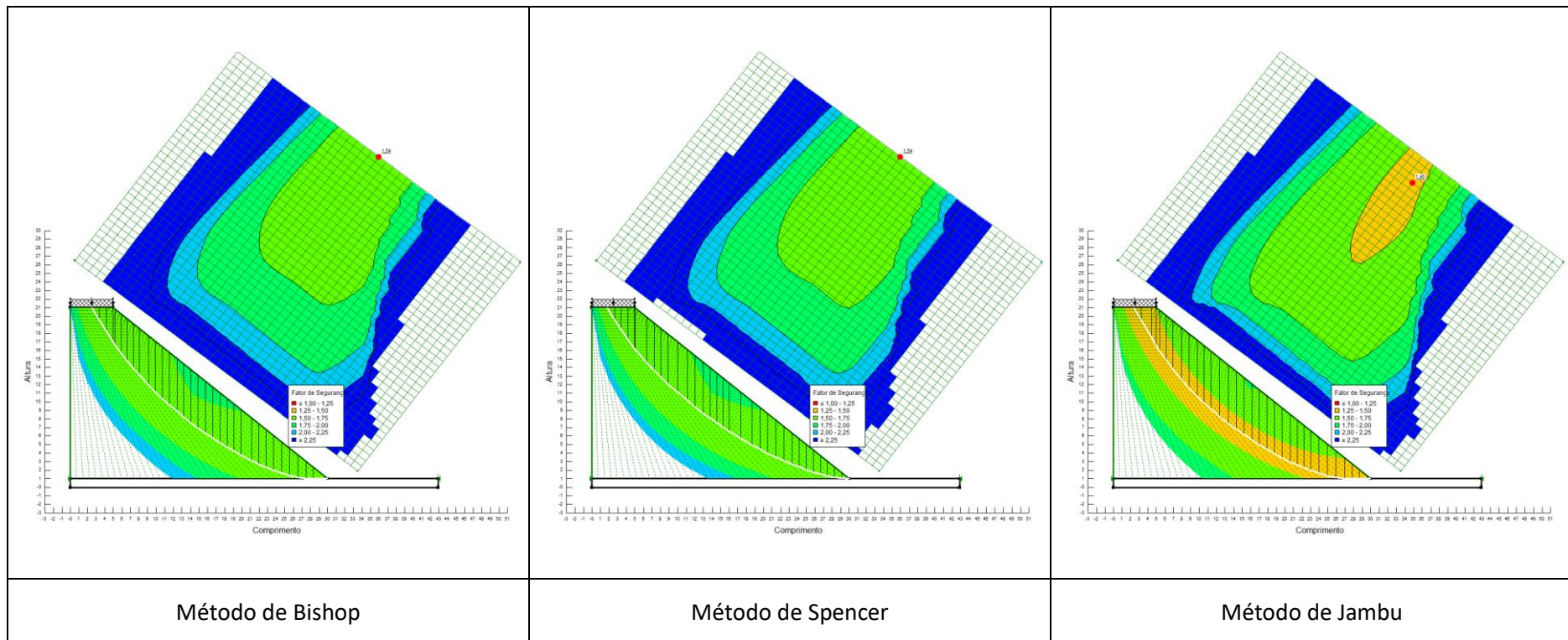
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

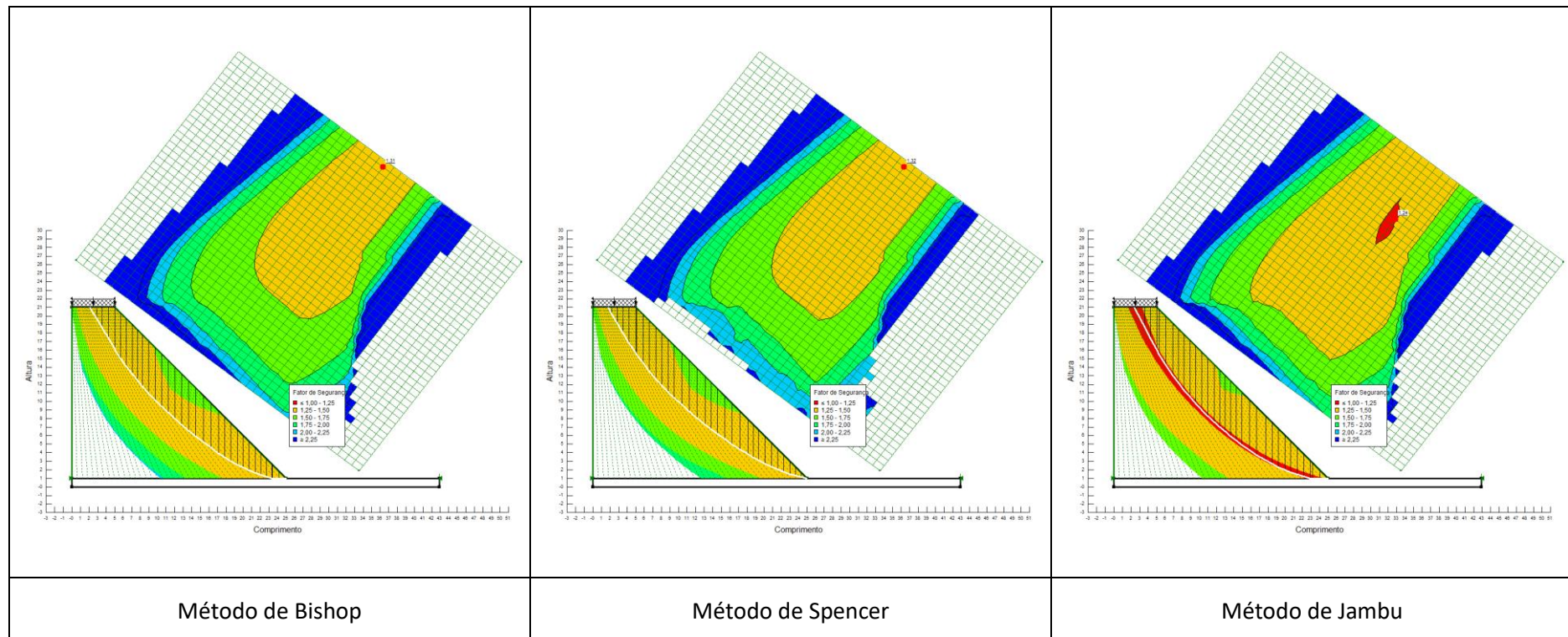
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

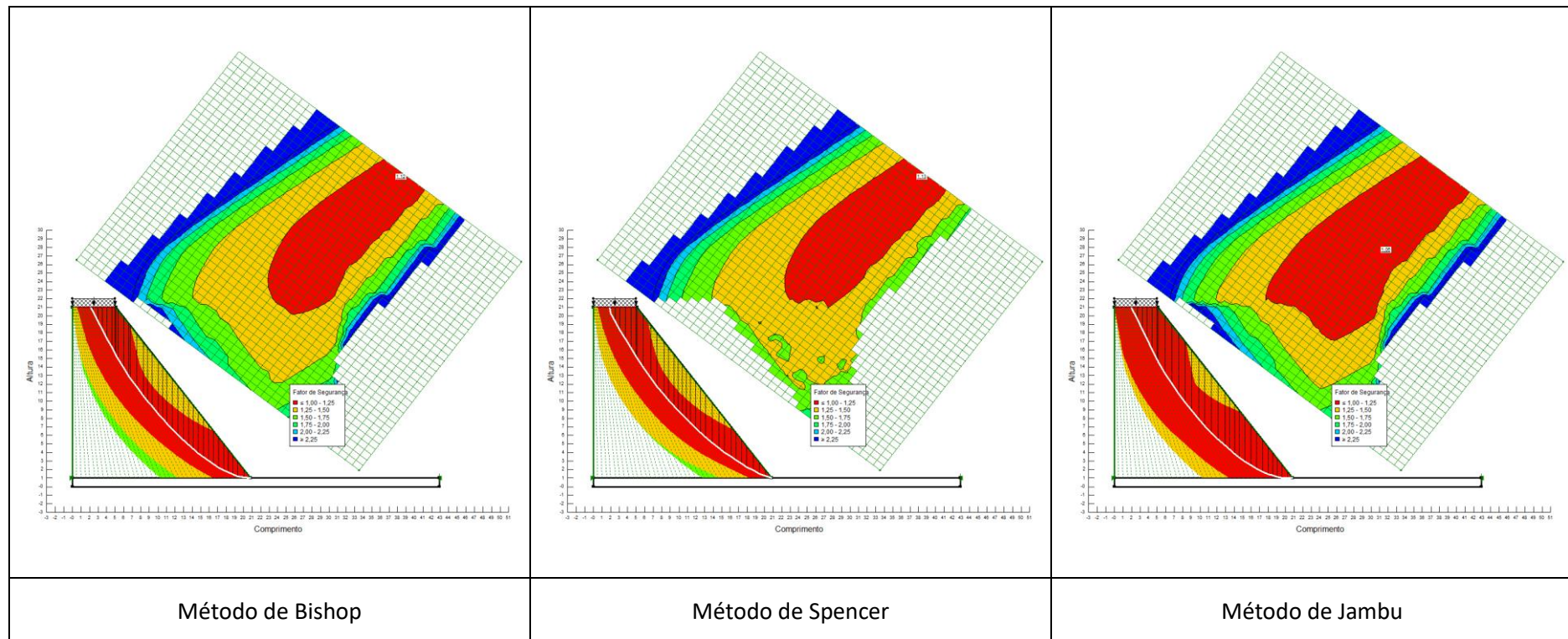
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

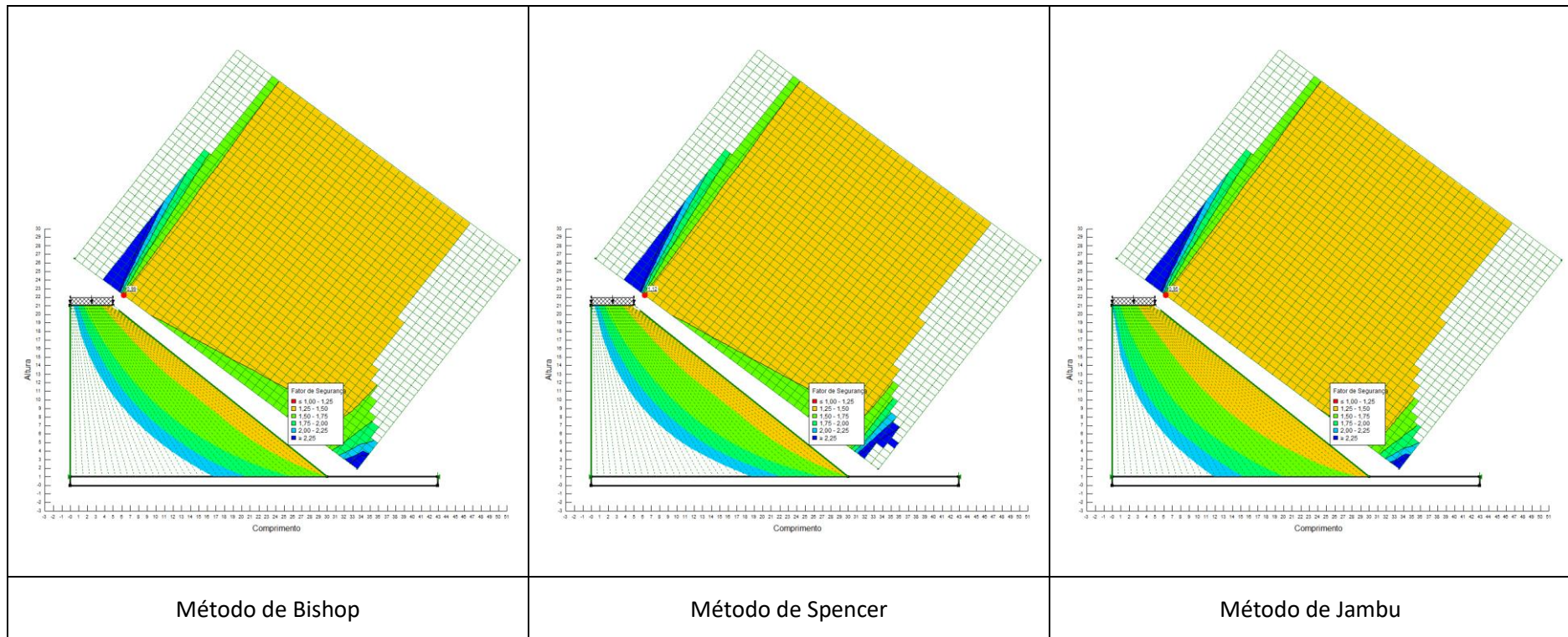
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

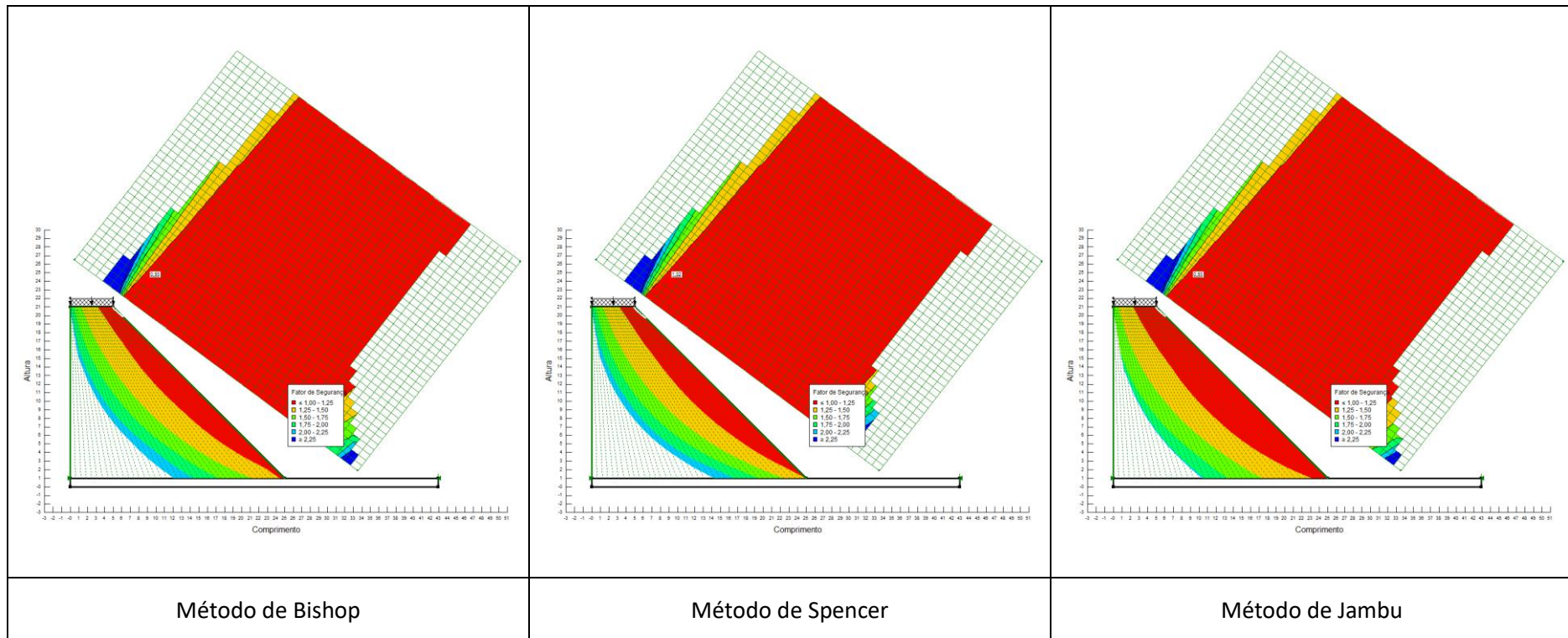
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

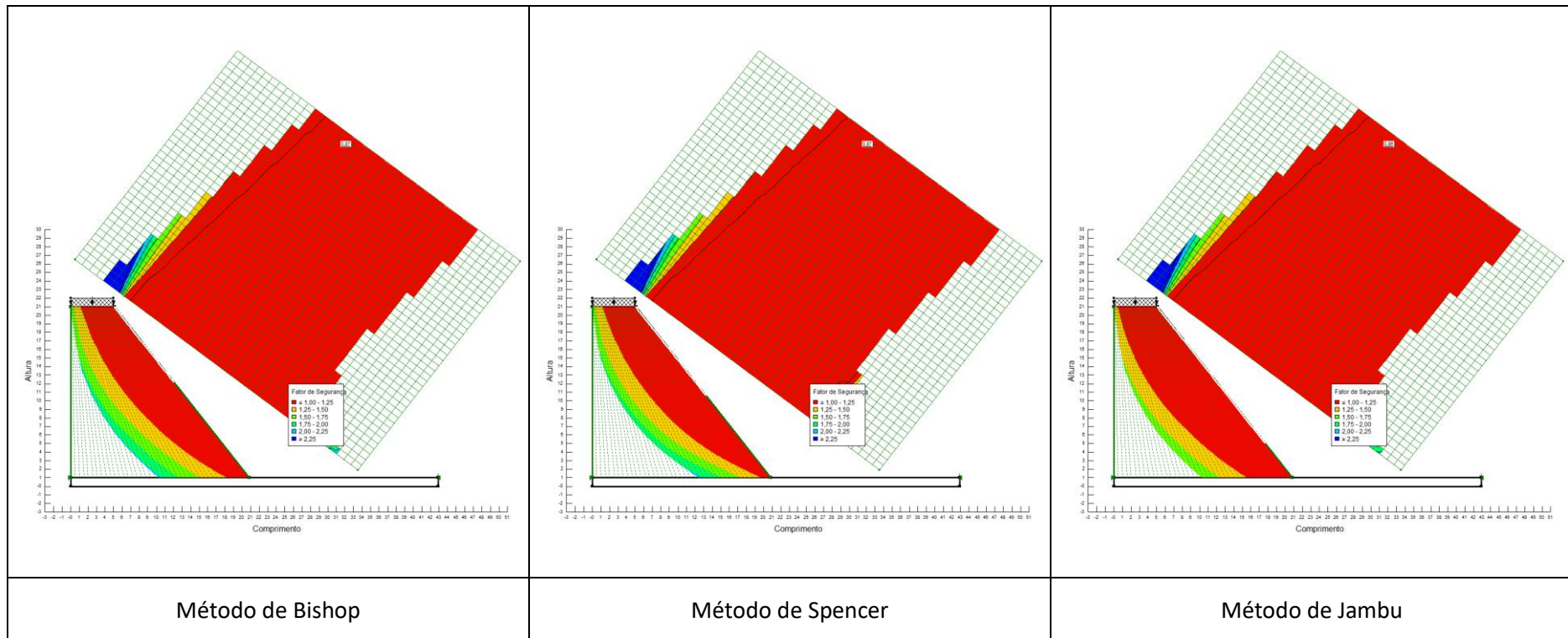
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

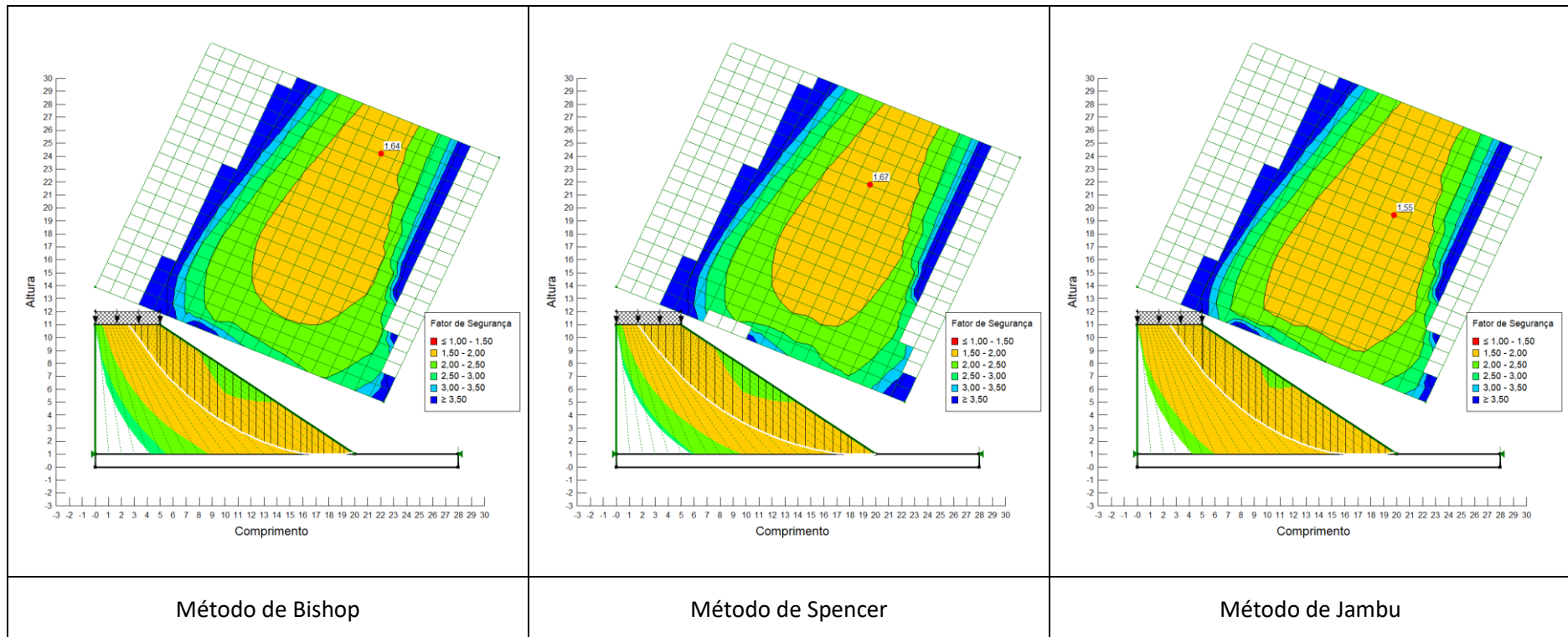
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

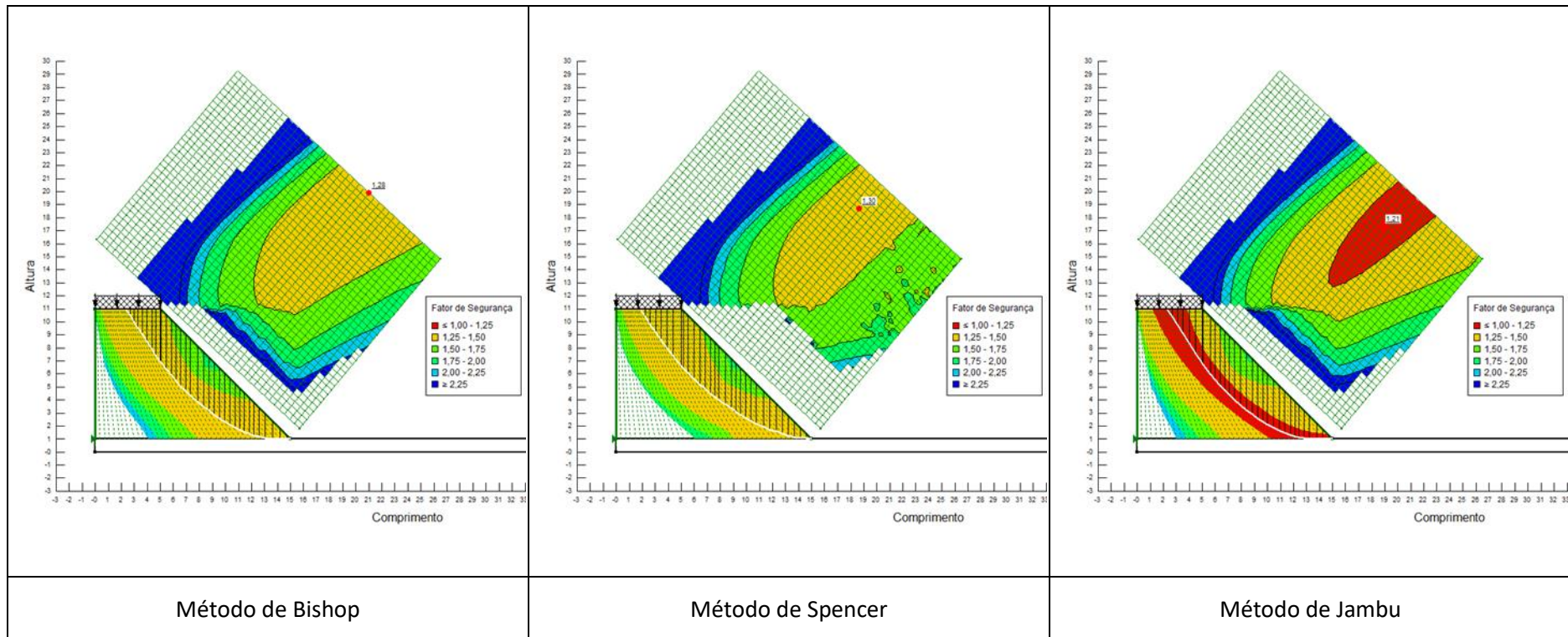
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

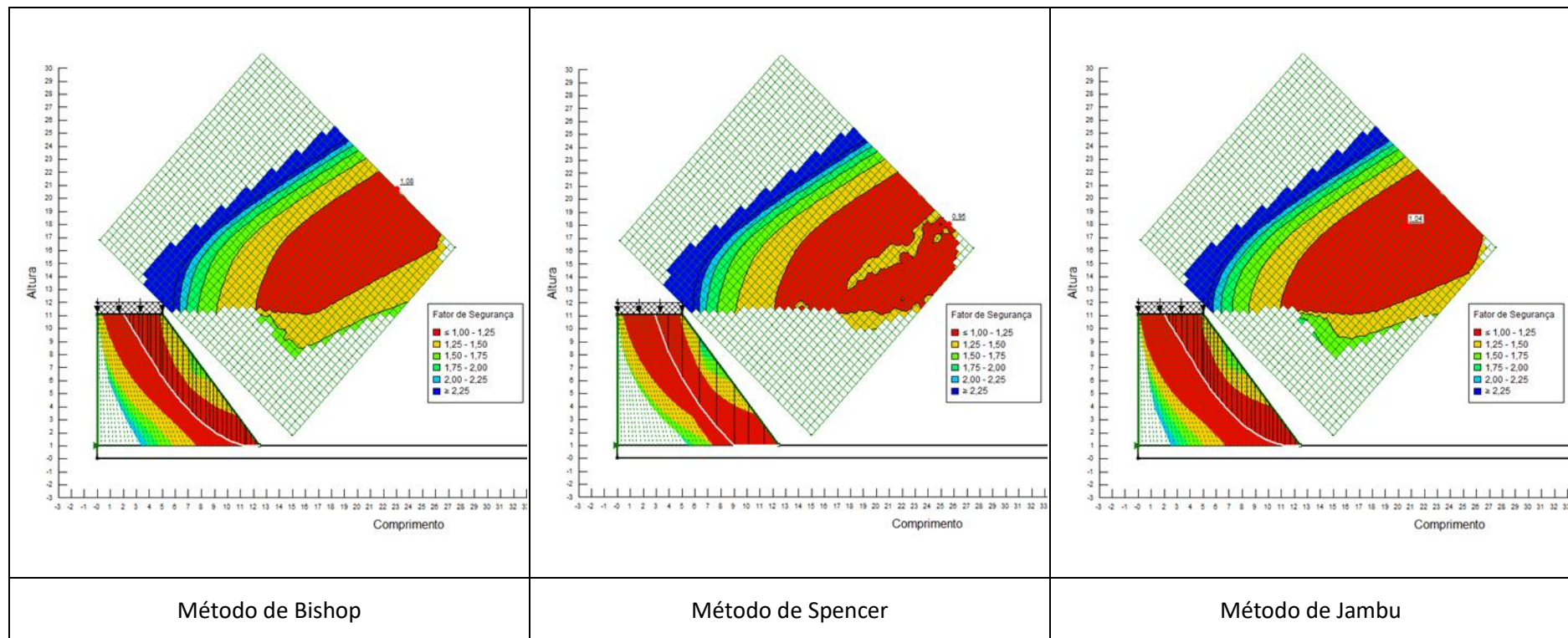
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

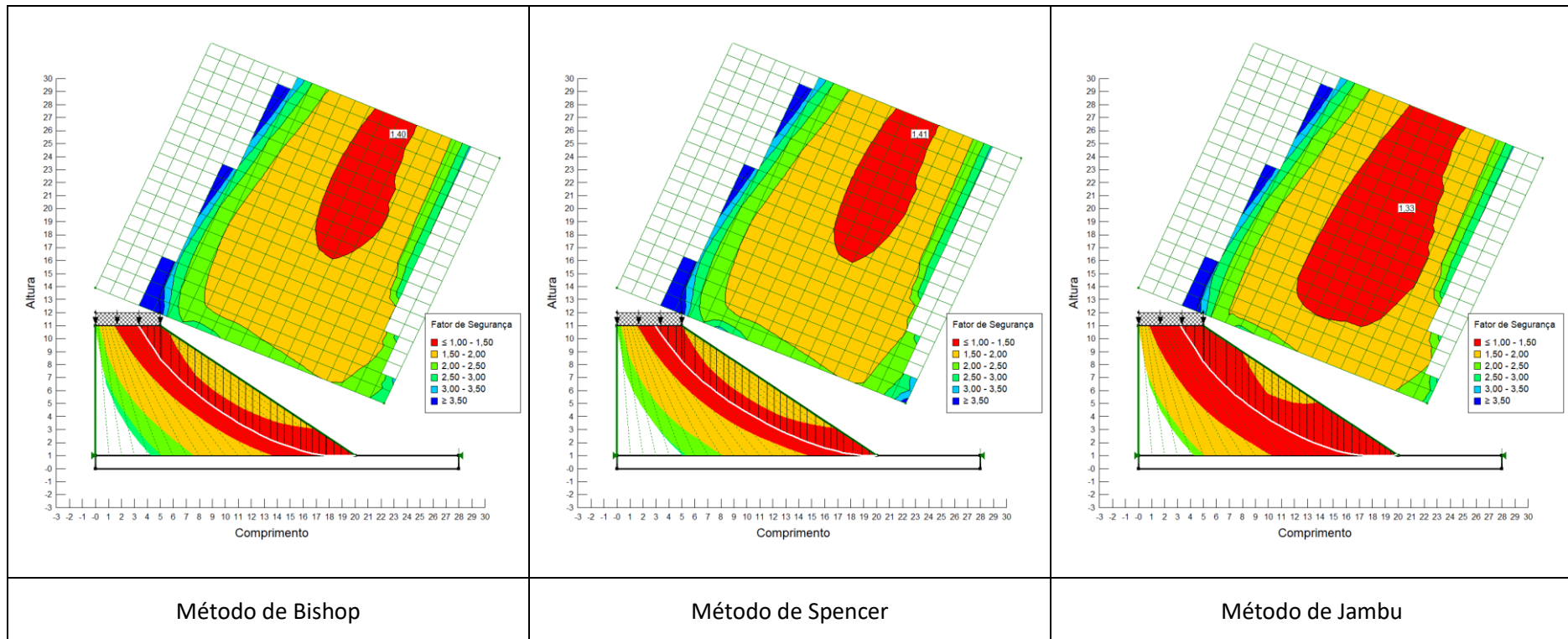
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

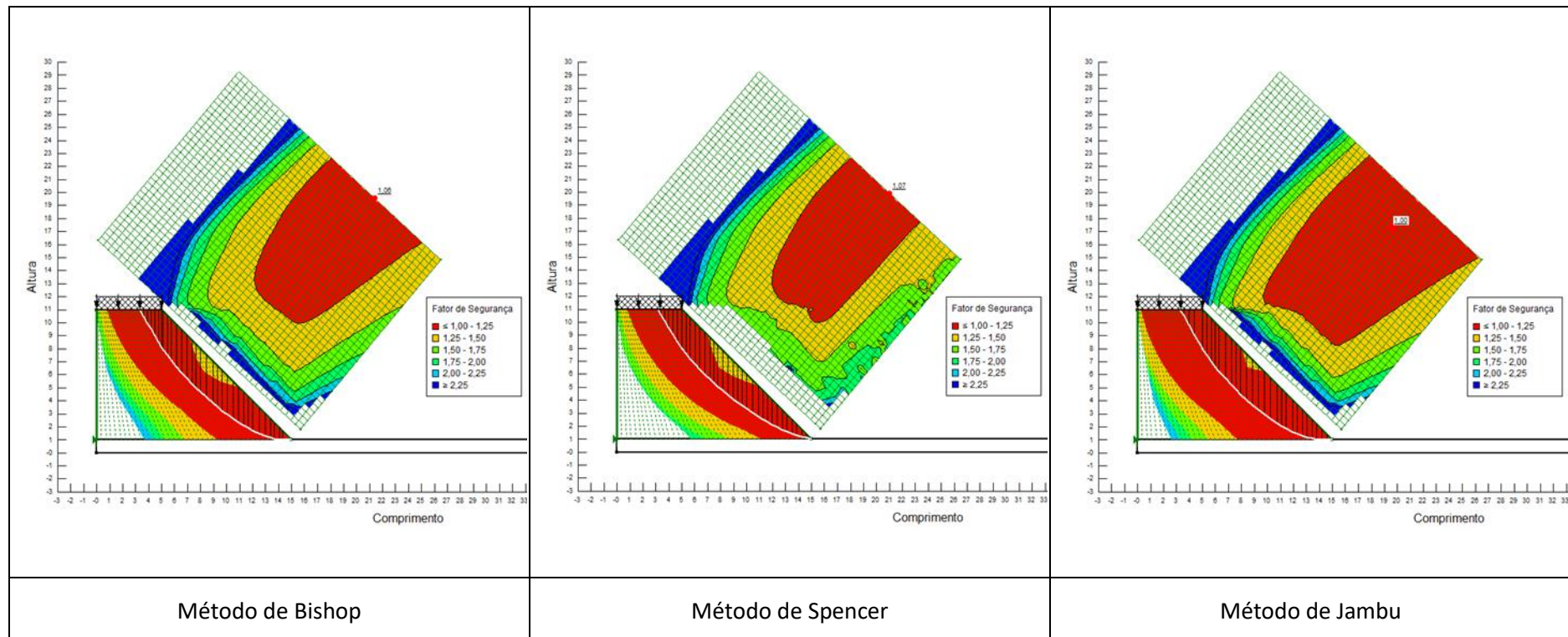
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

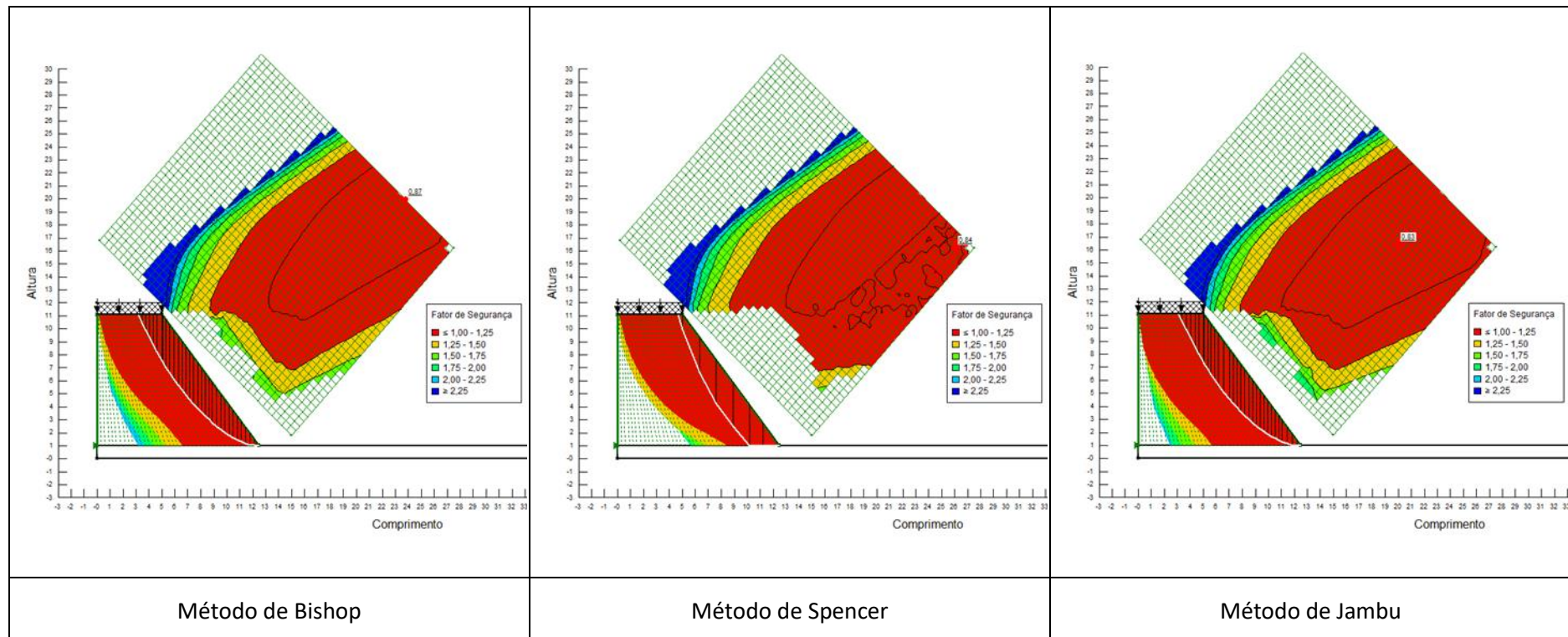
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

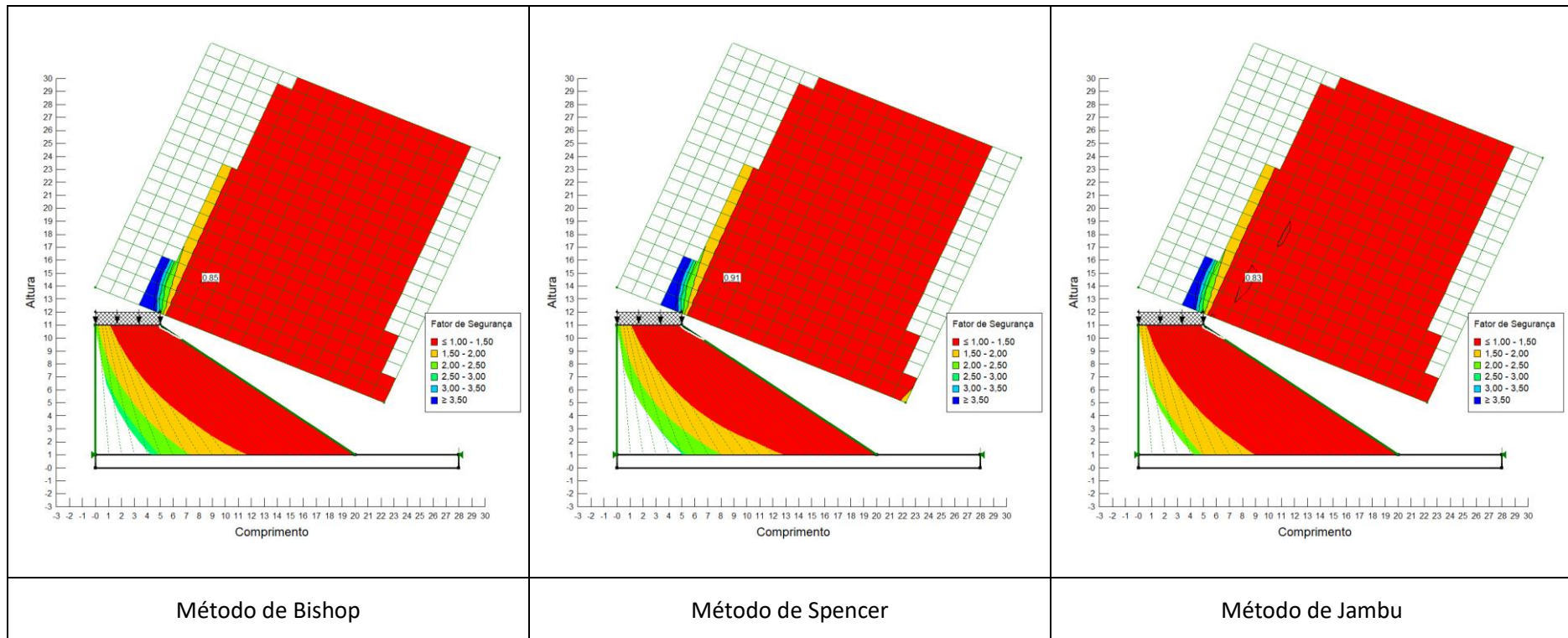
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

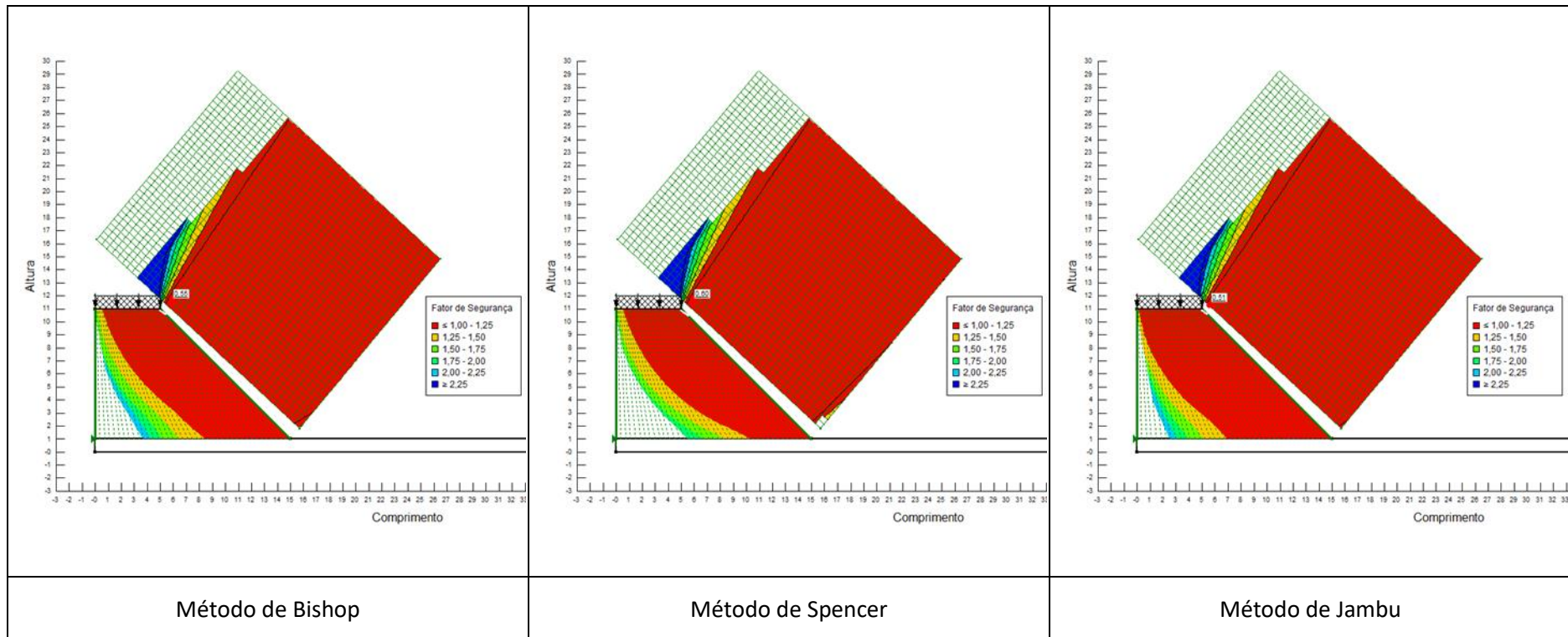
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

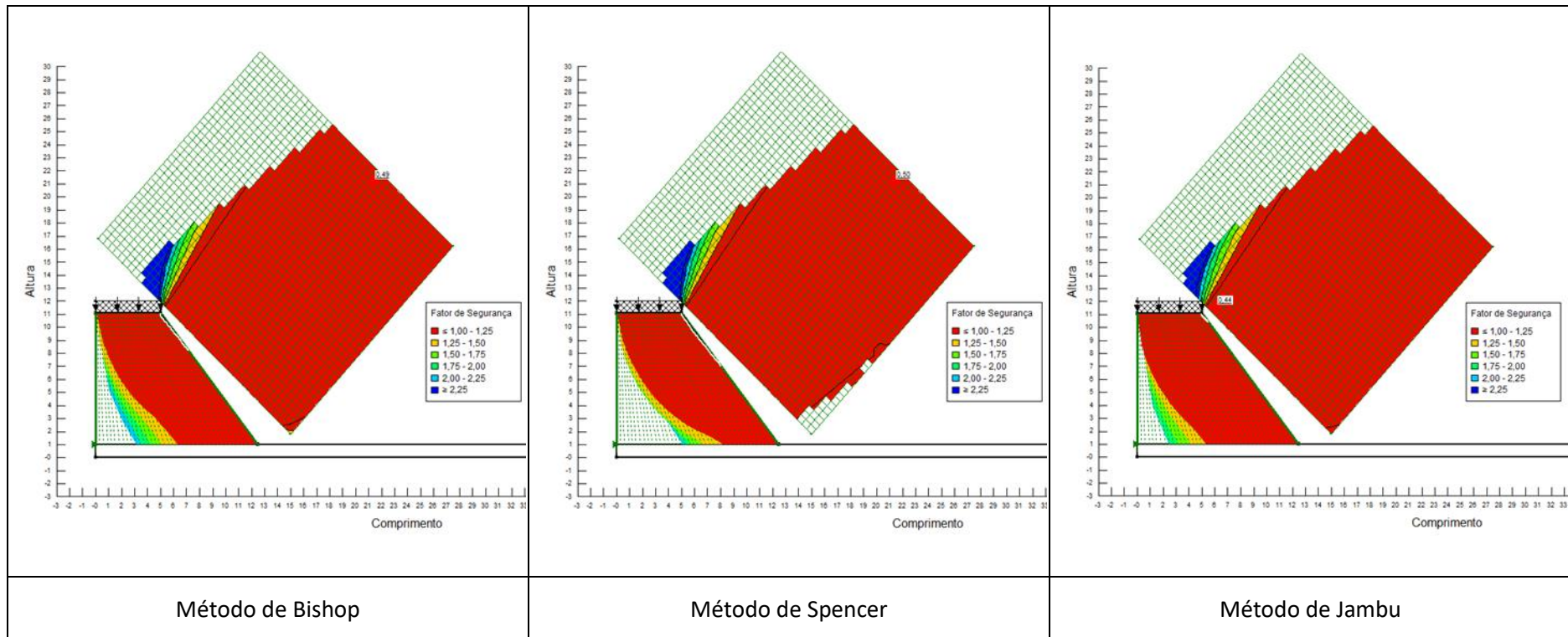
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

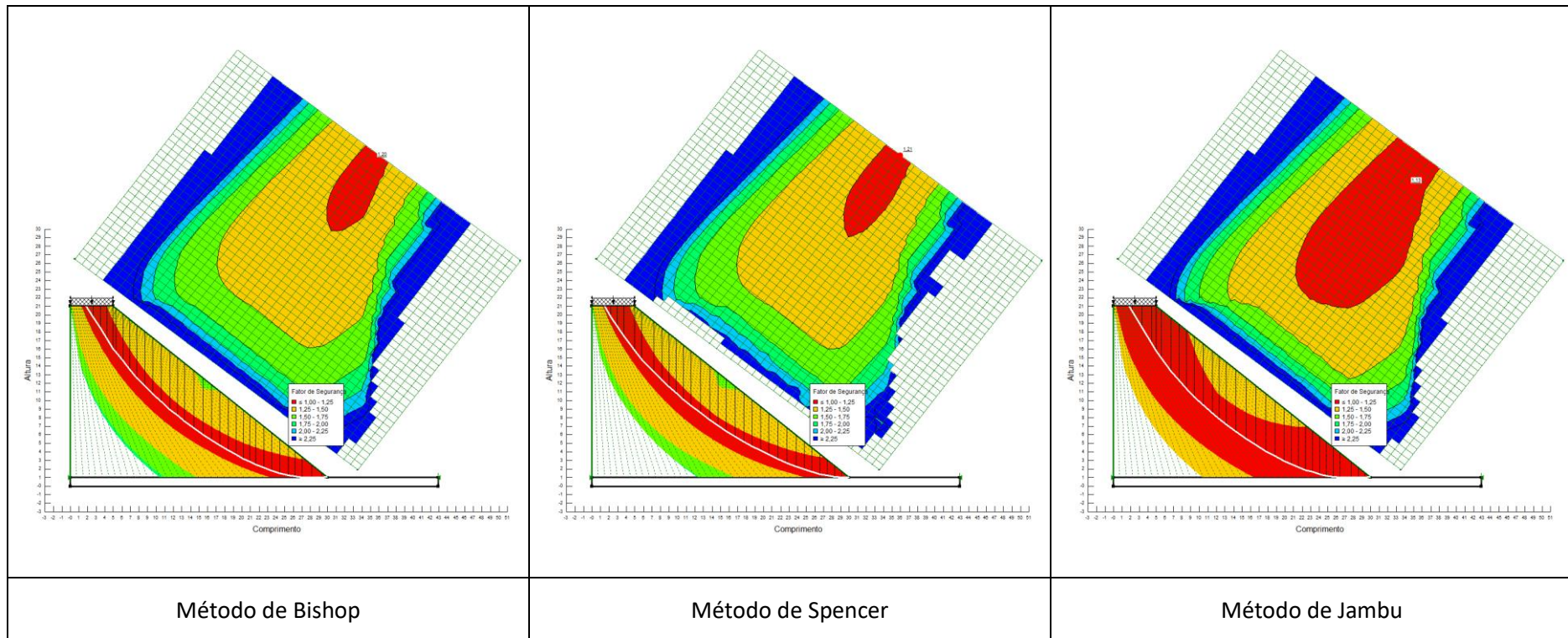
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

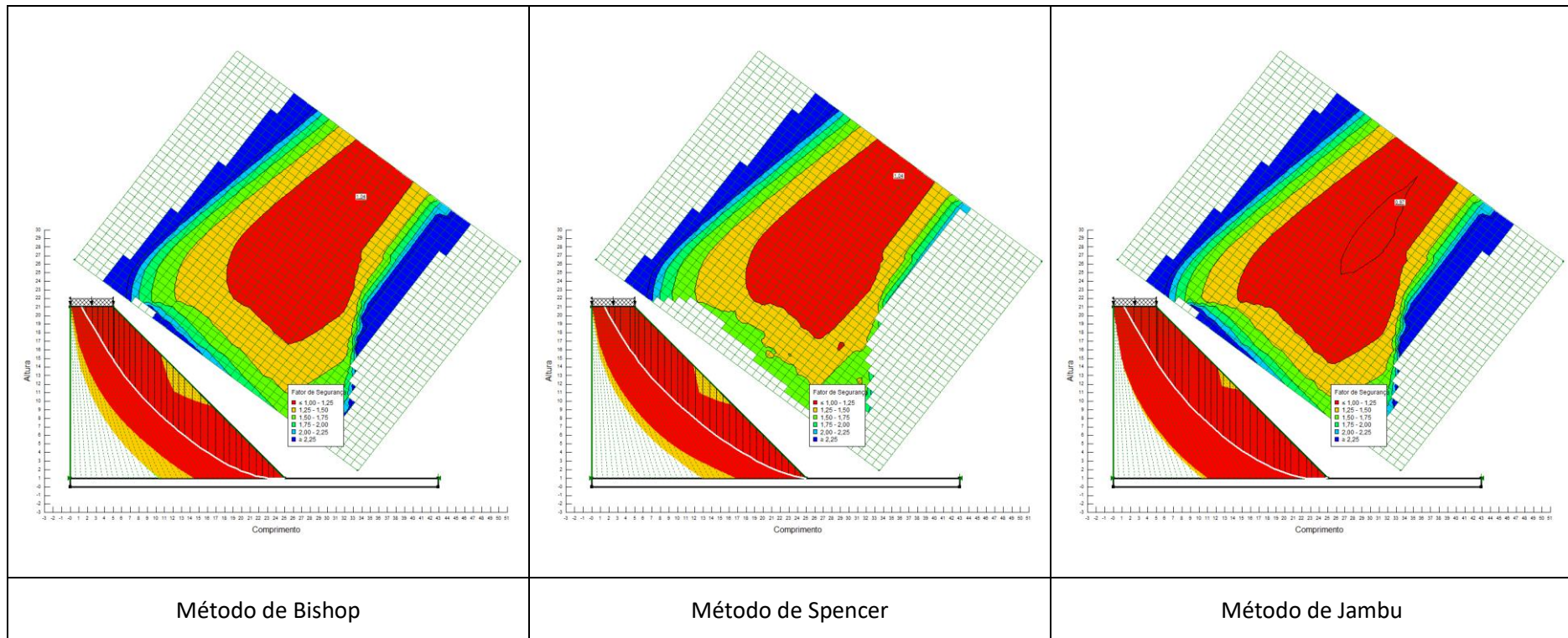
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

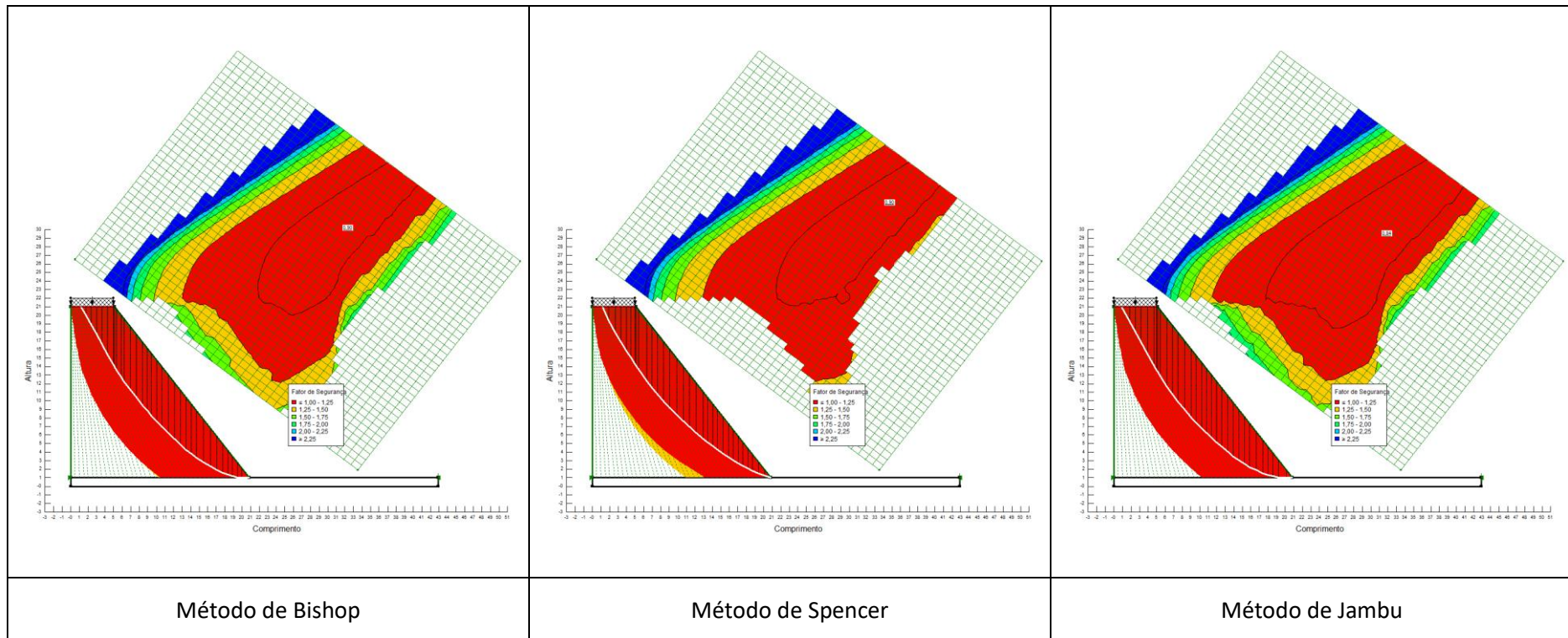
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

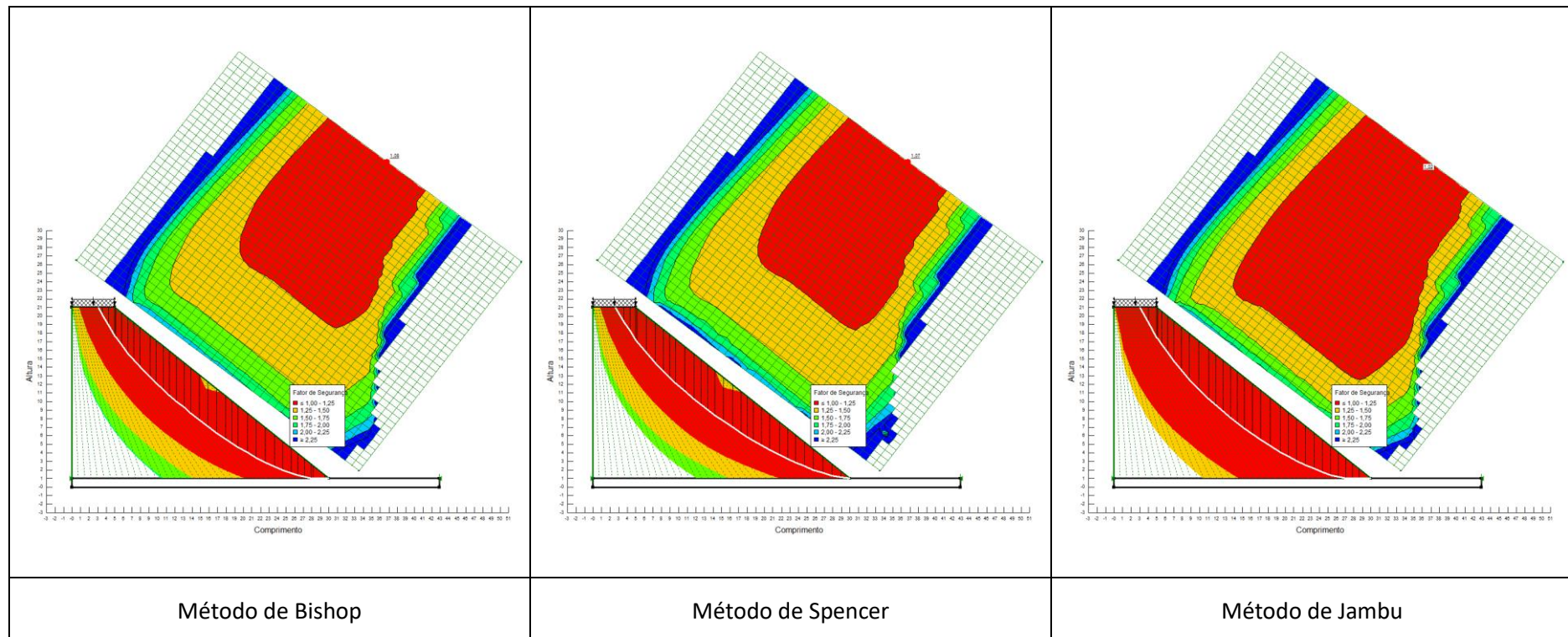
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

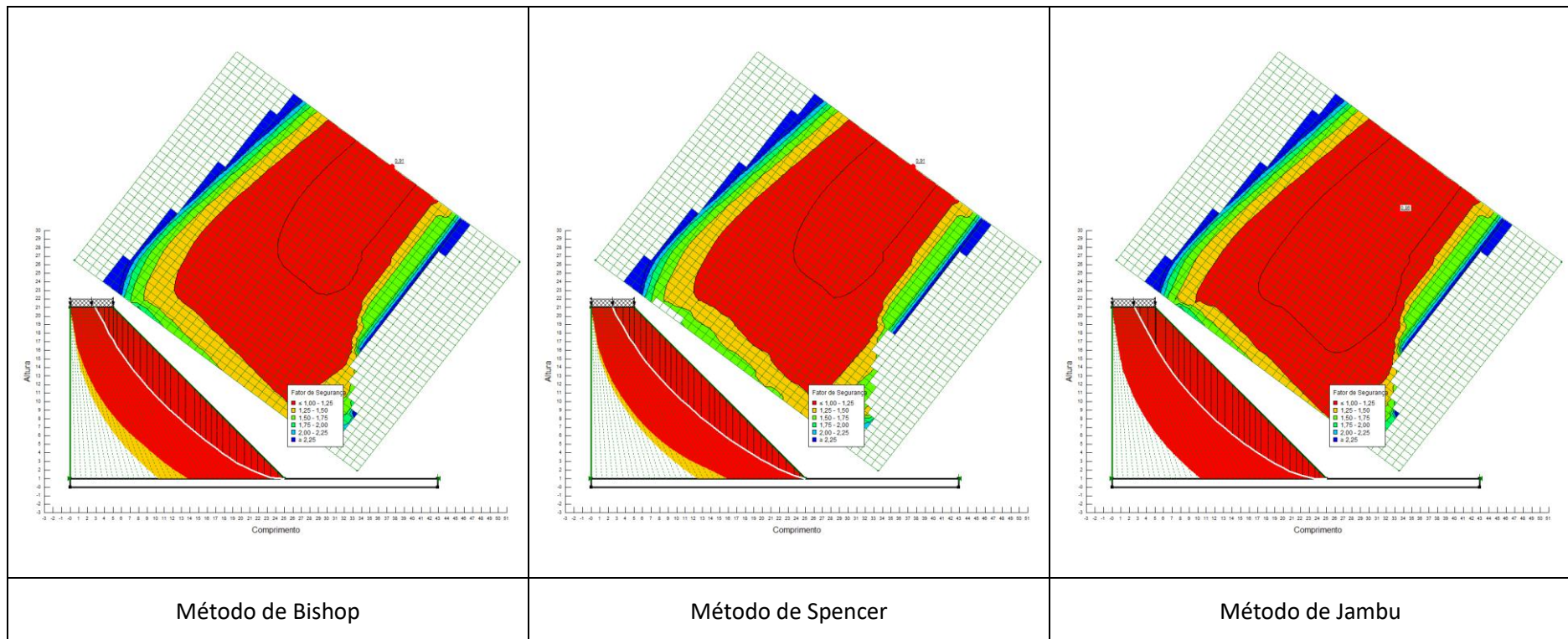
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

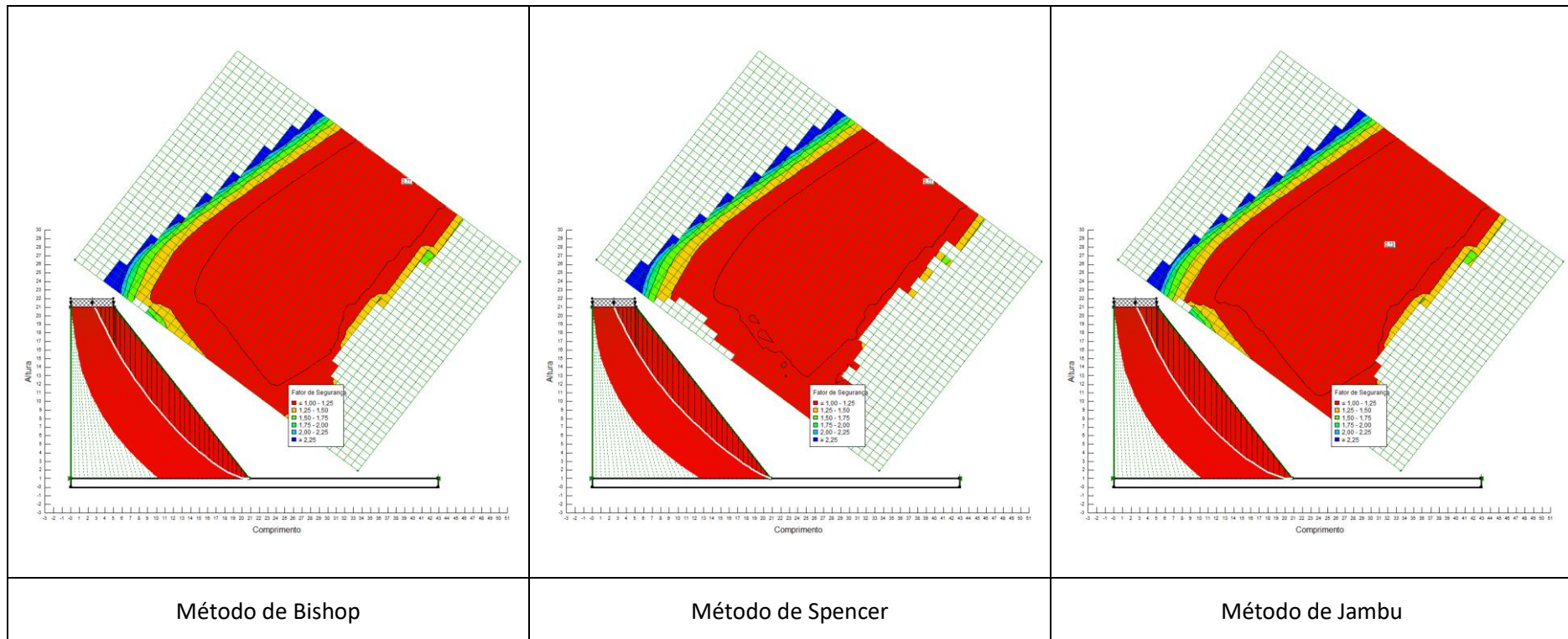
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

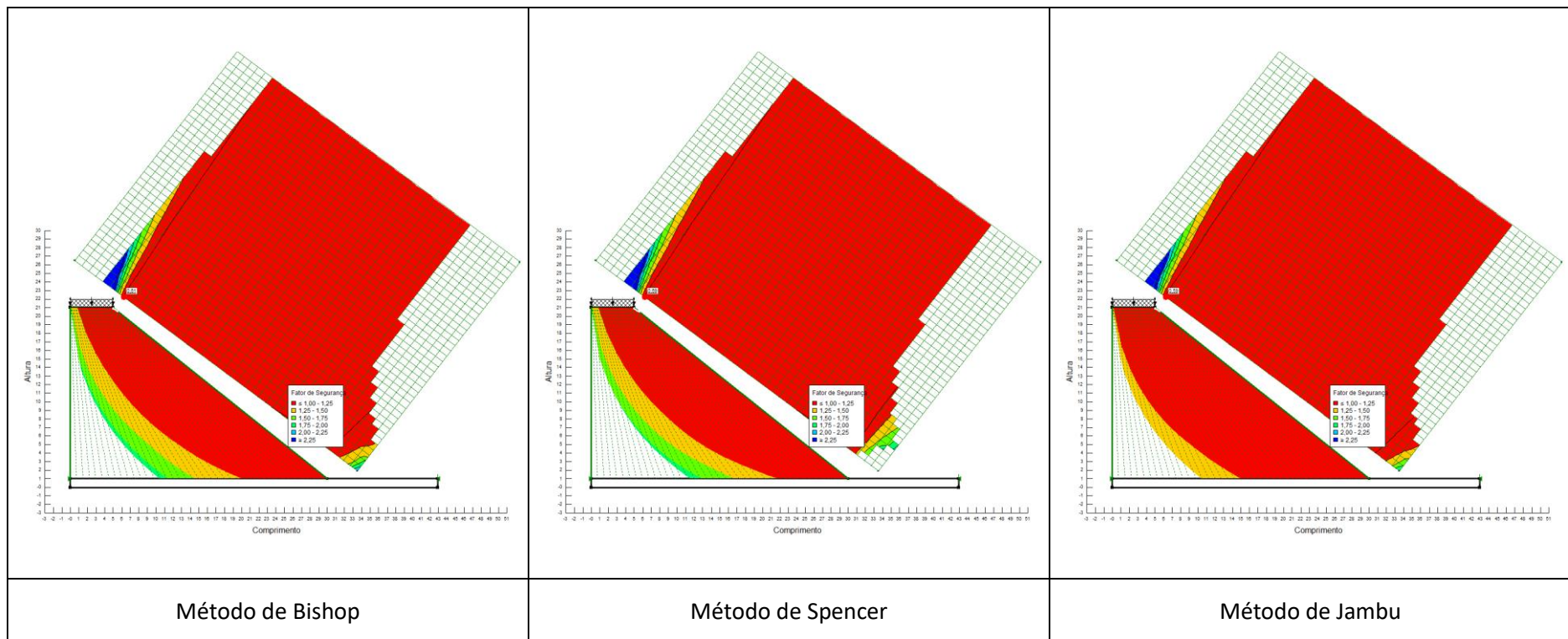
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

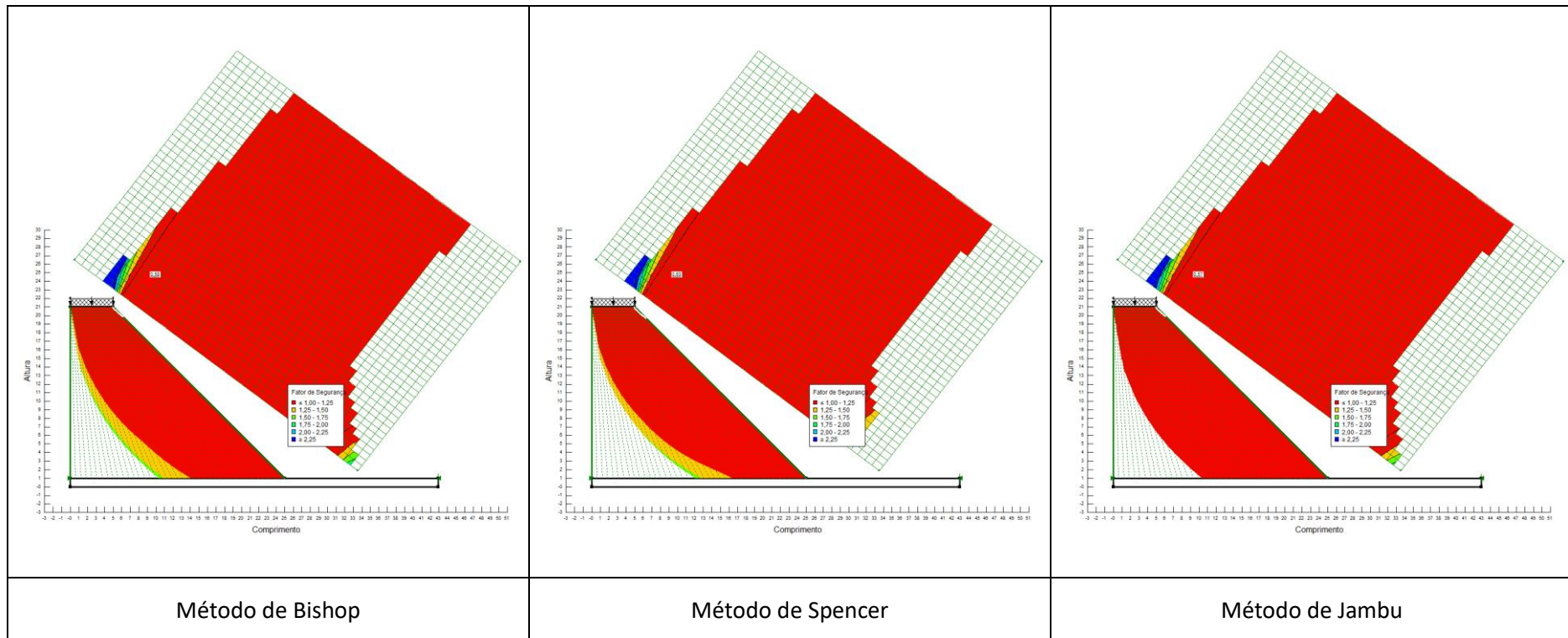
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

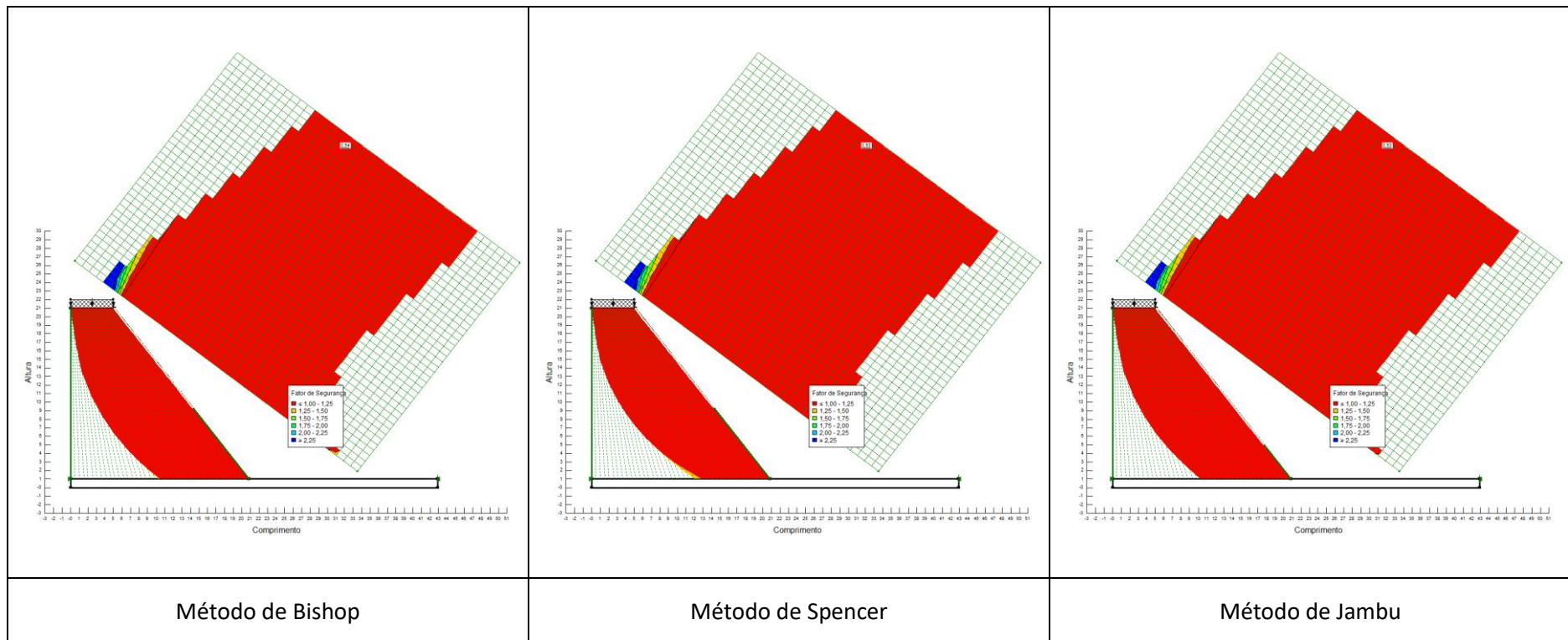
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z2 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75

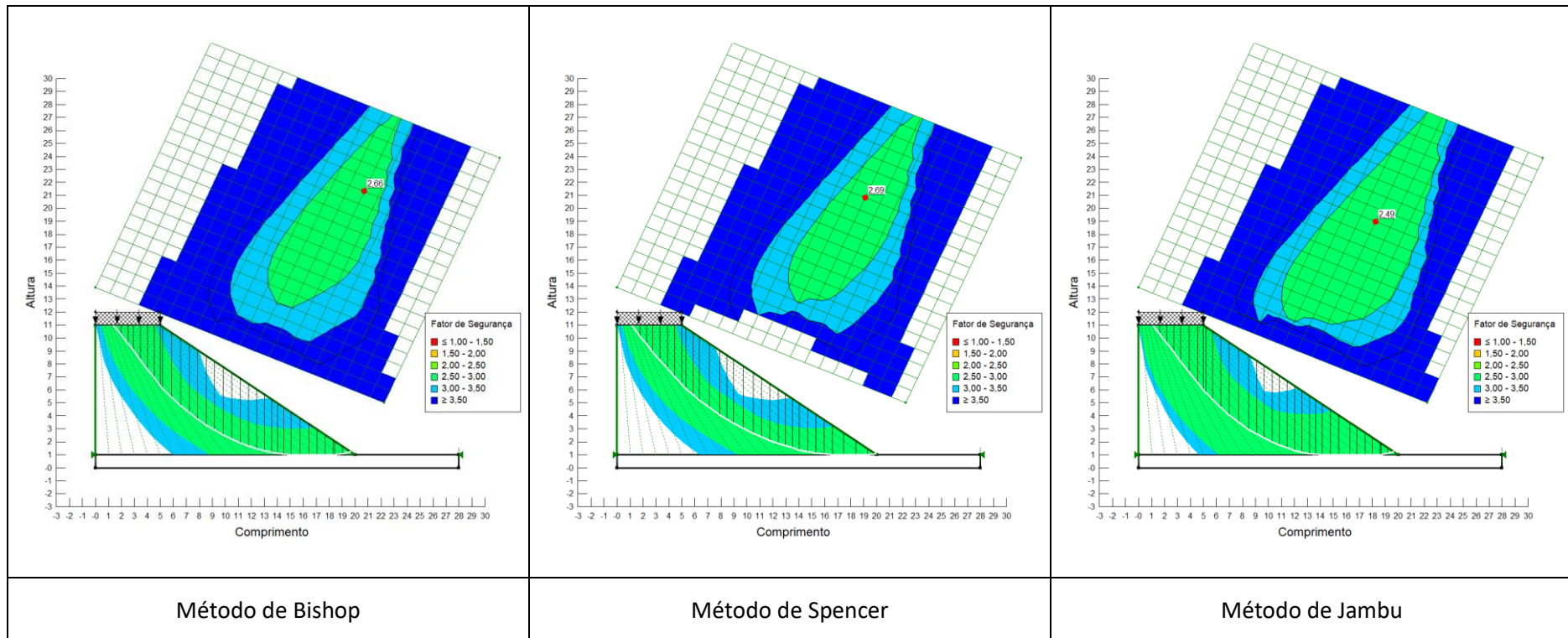


SOLO Z3

SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

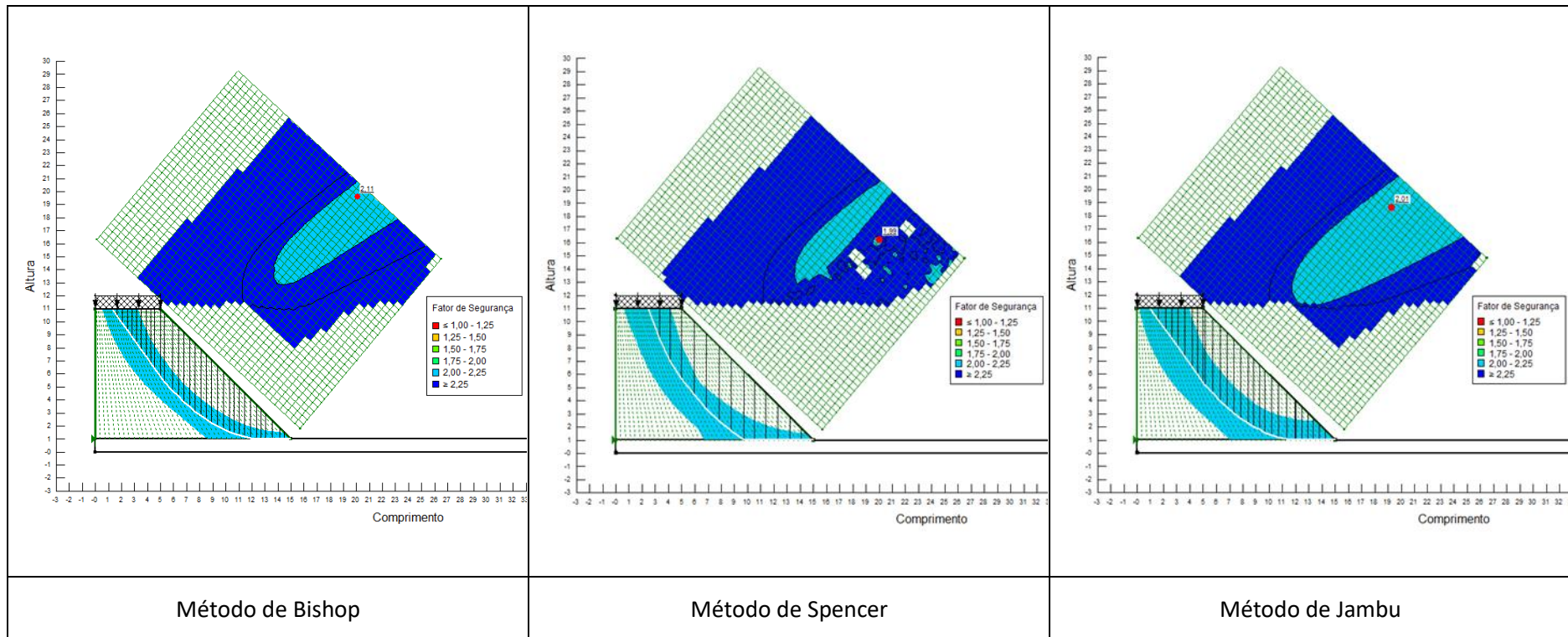
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

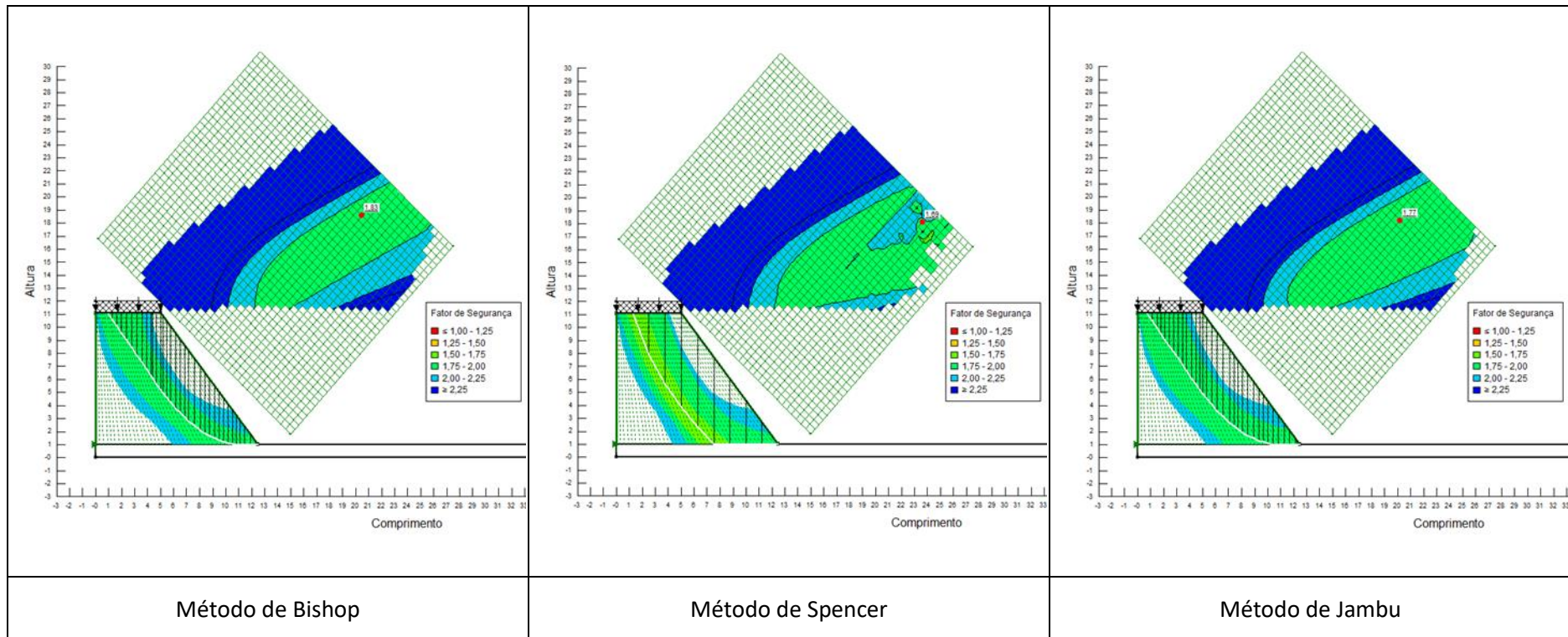
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

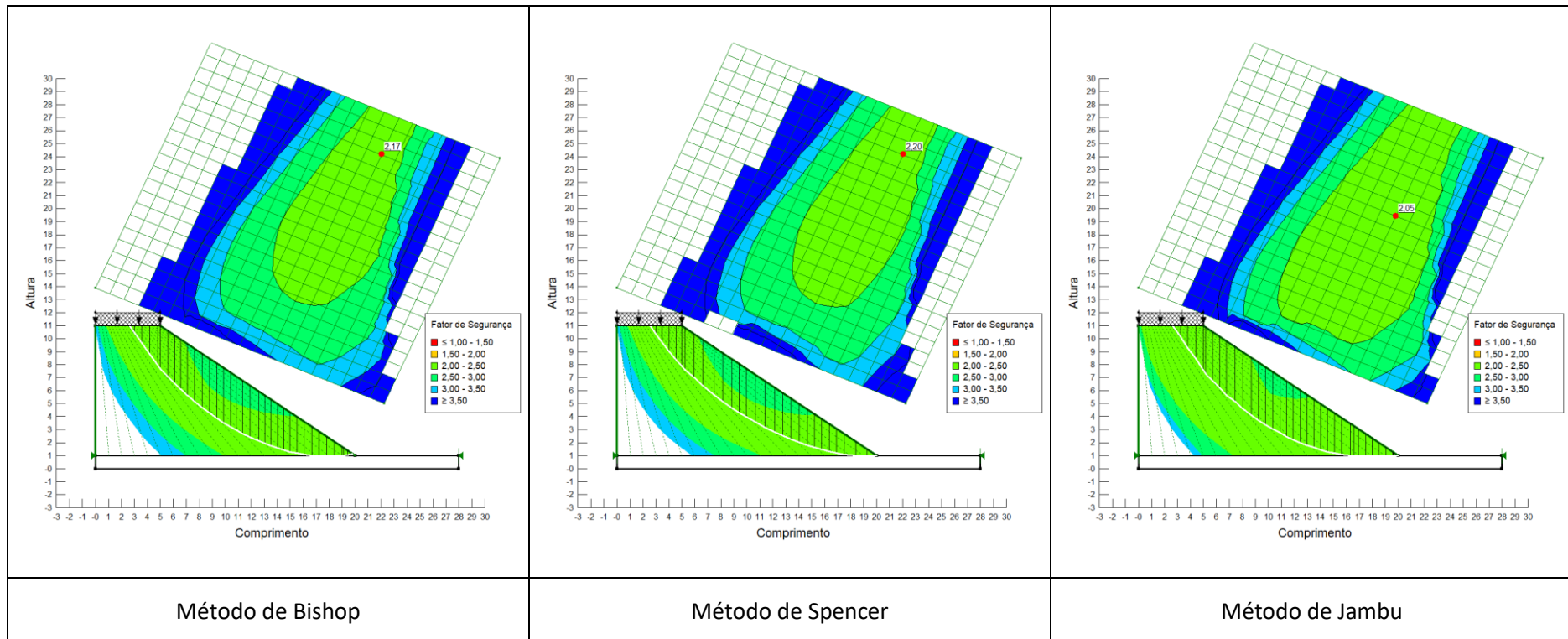
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

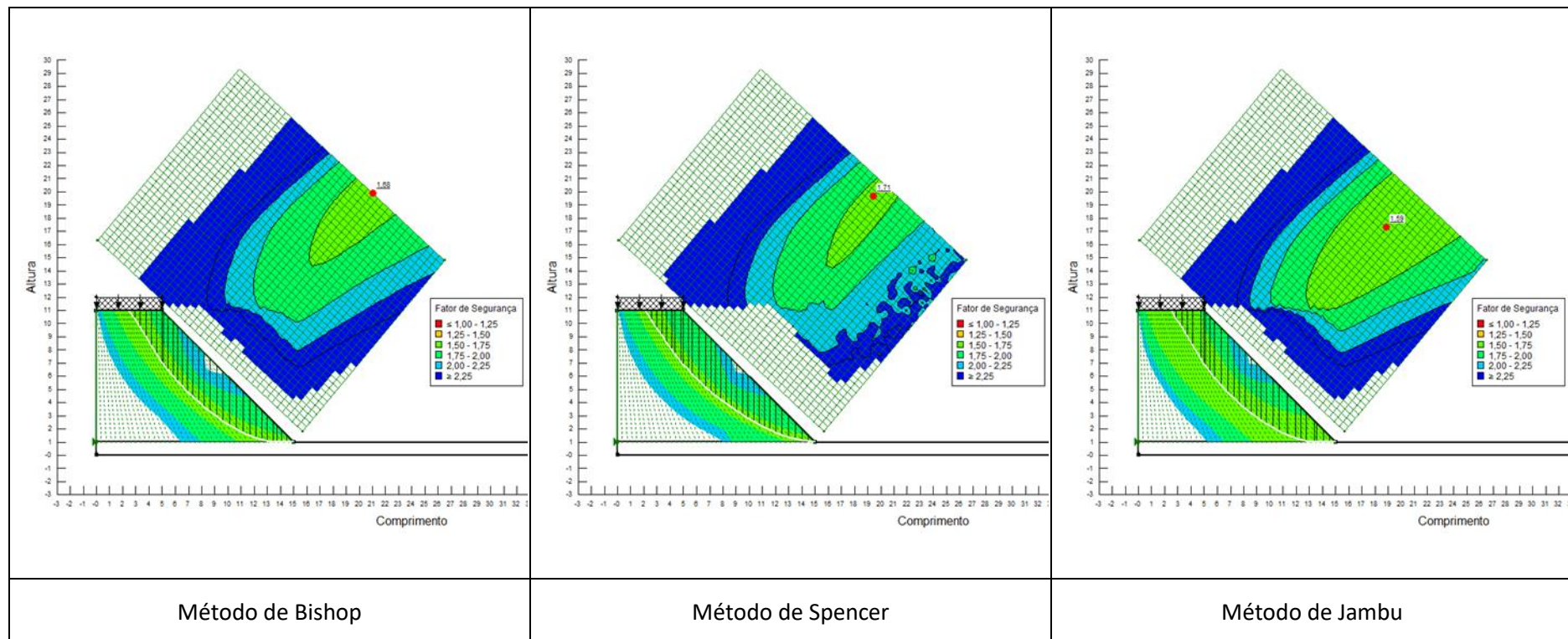
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

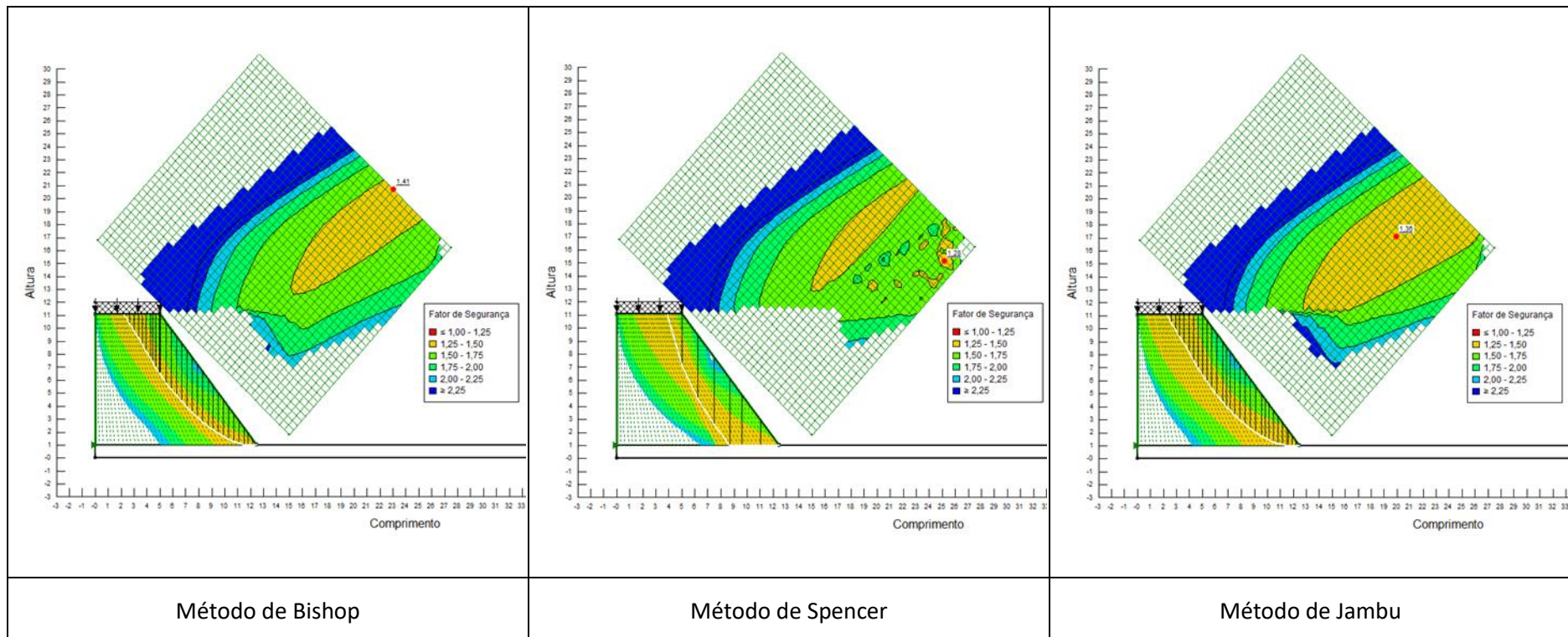
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

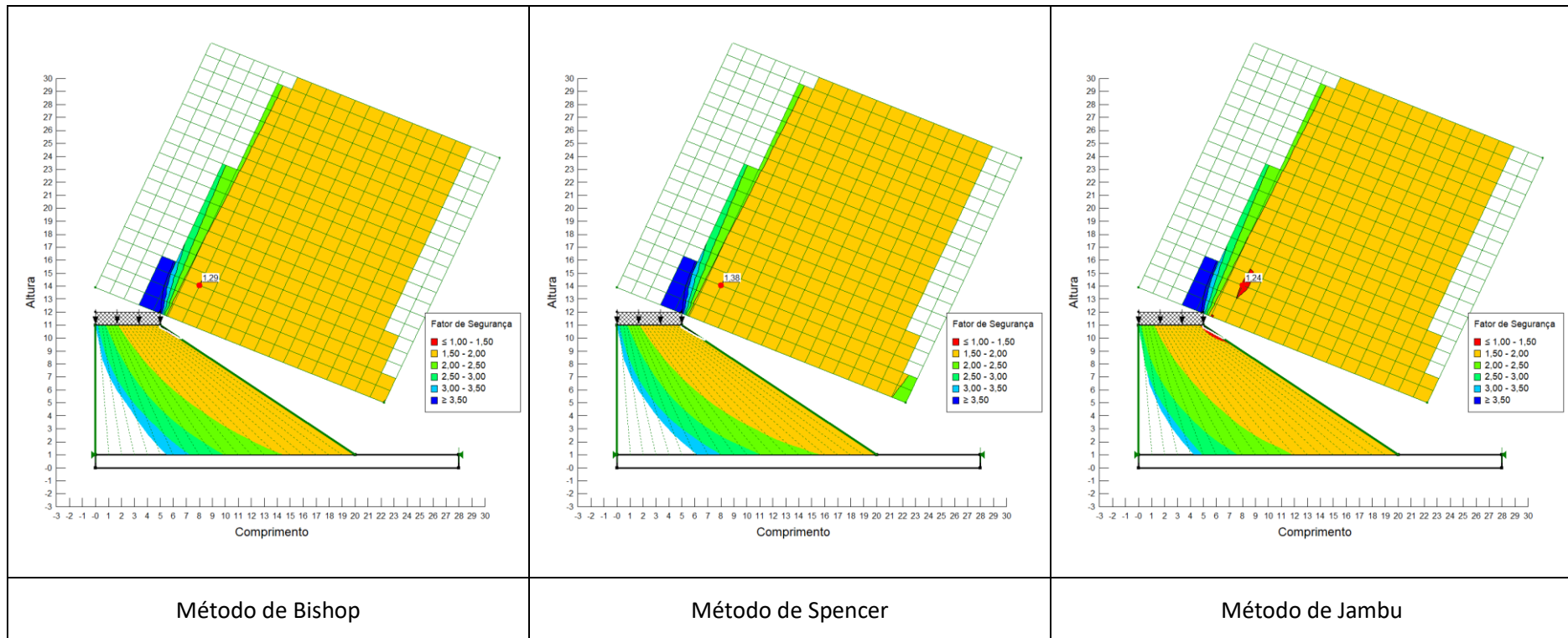
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

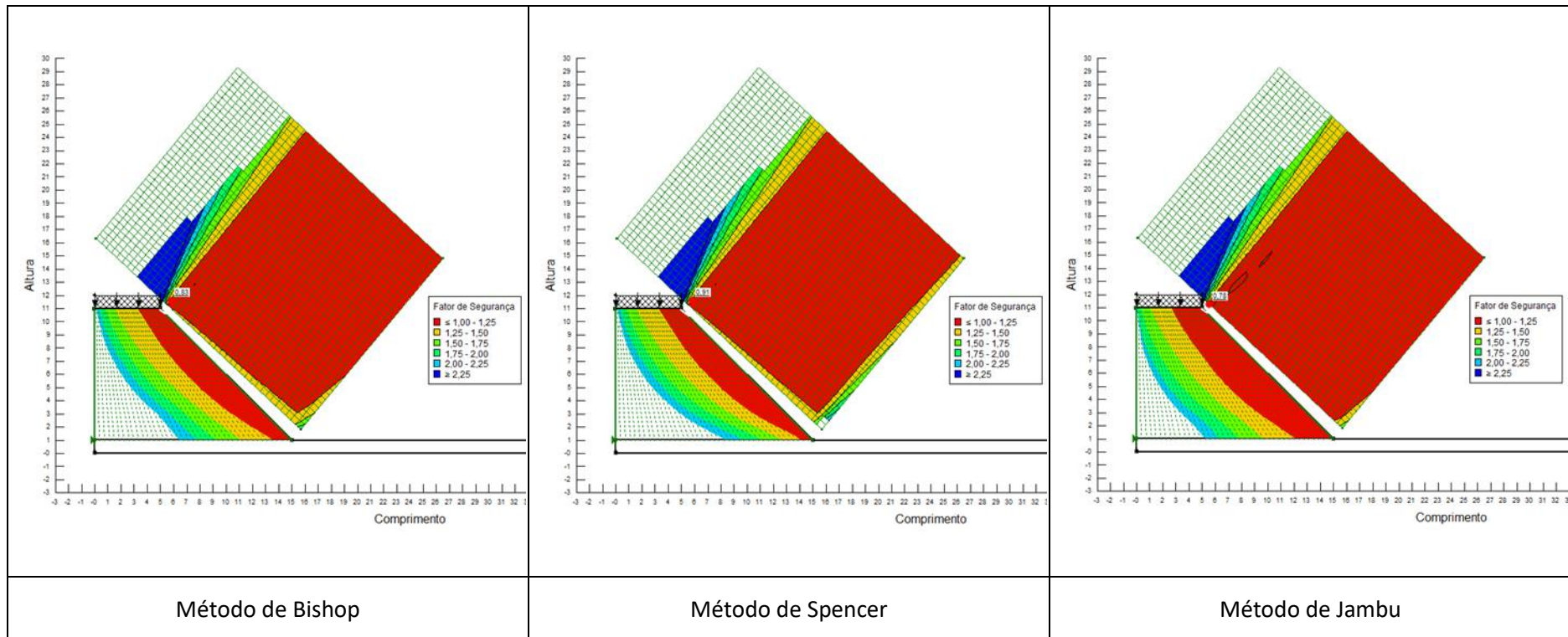
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

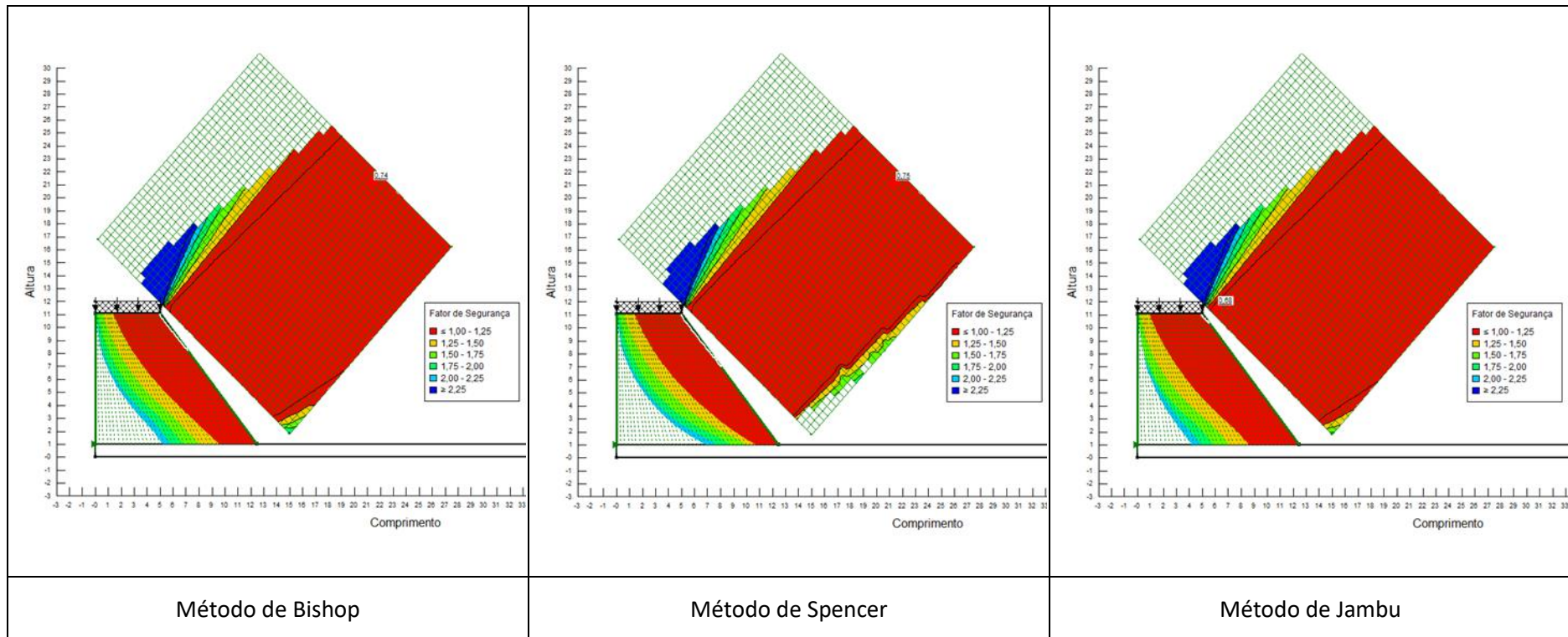
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

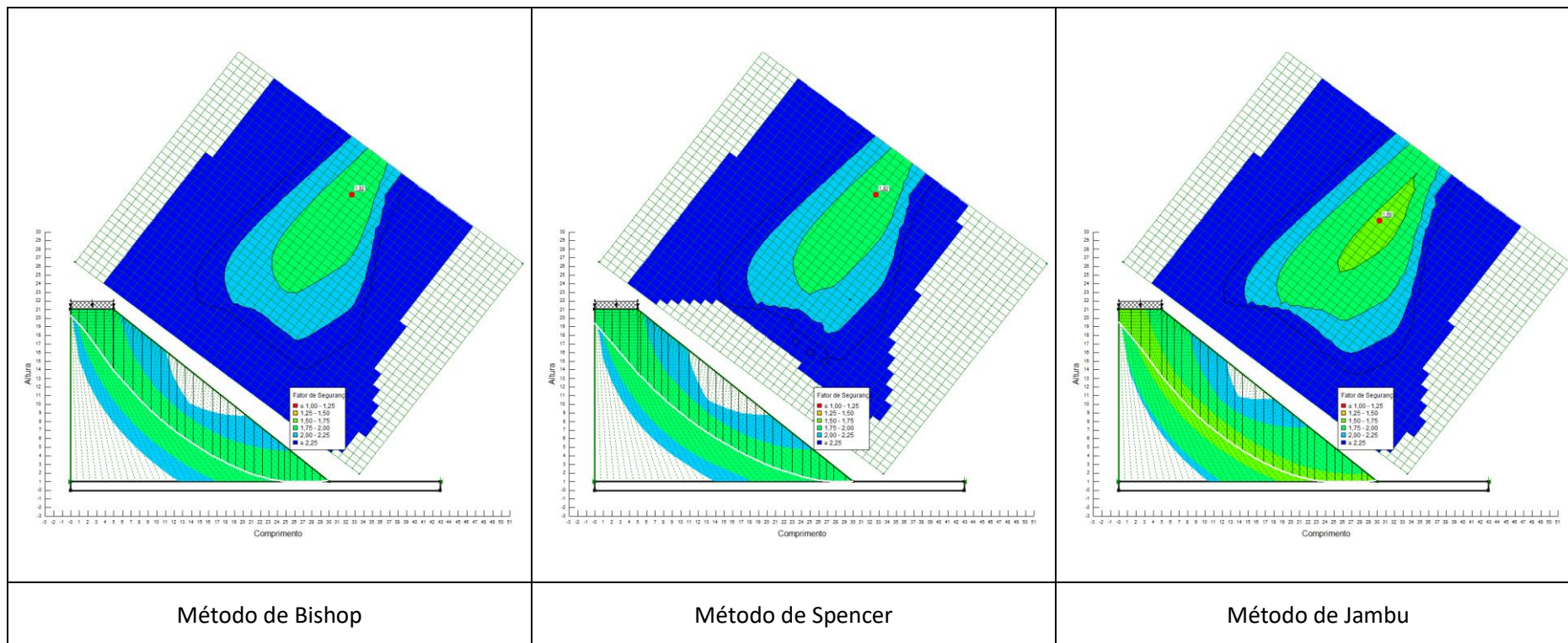
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

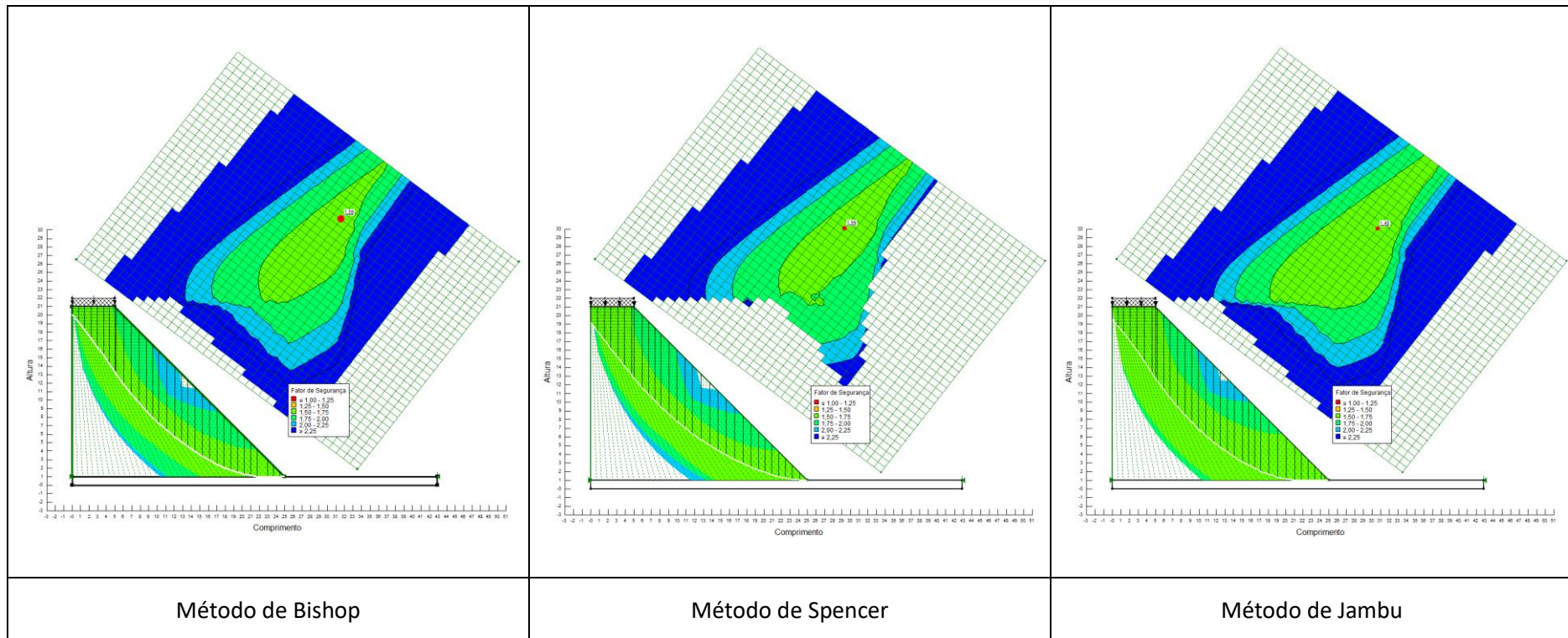
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

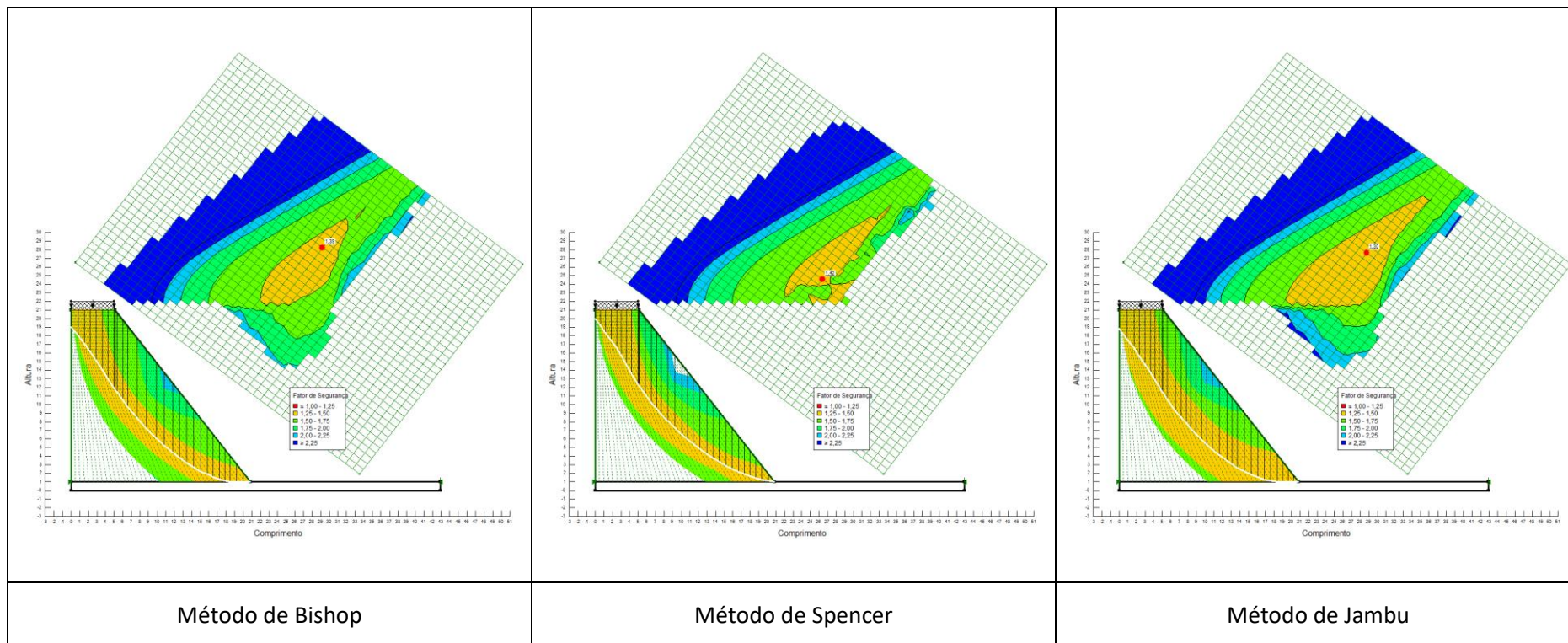
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

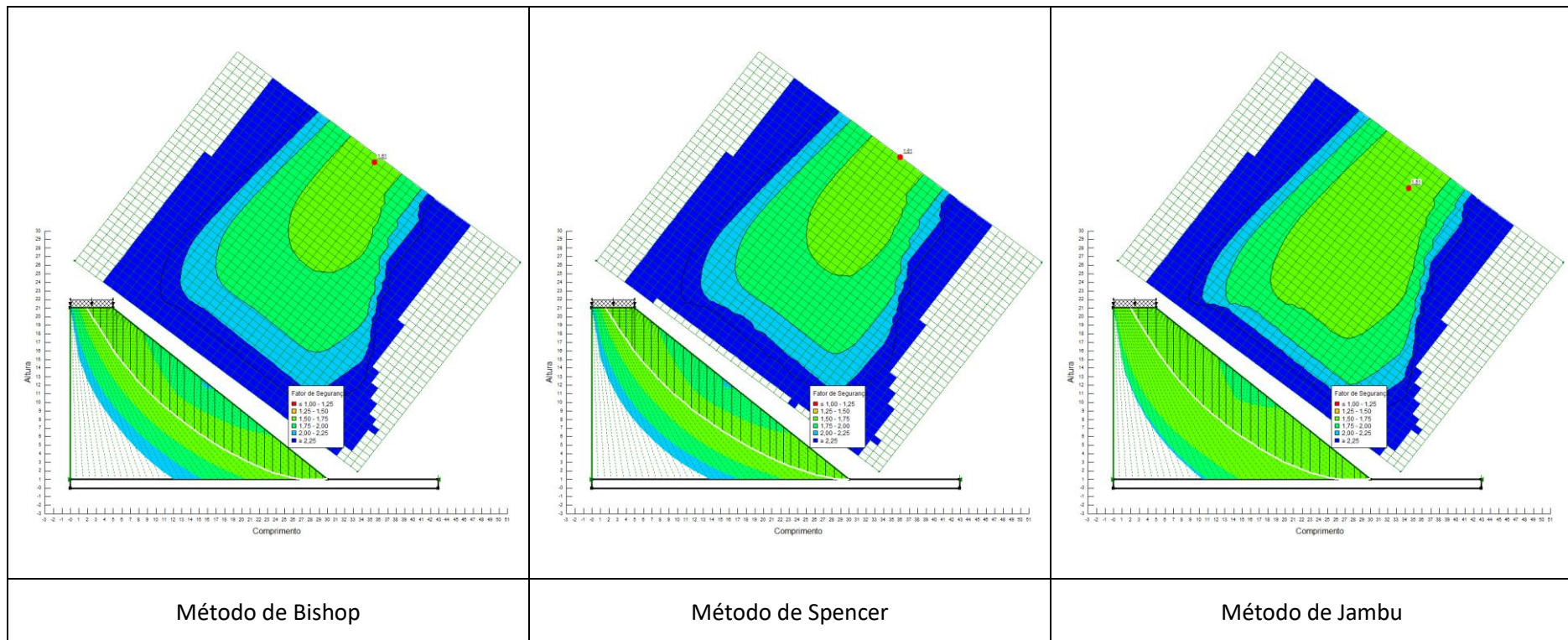
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

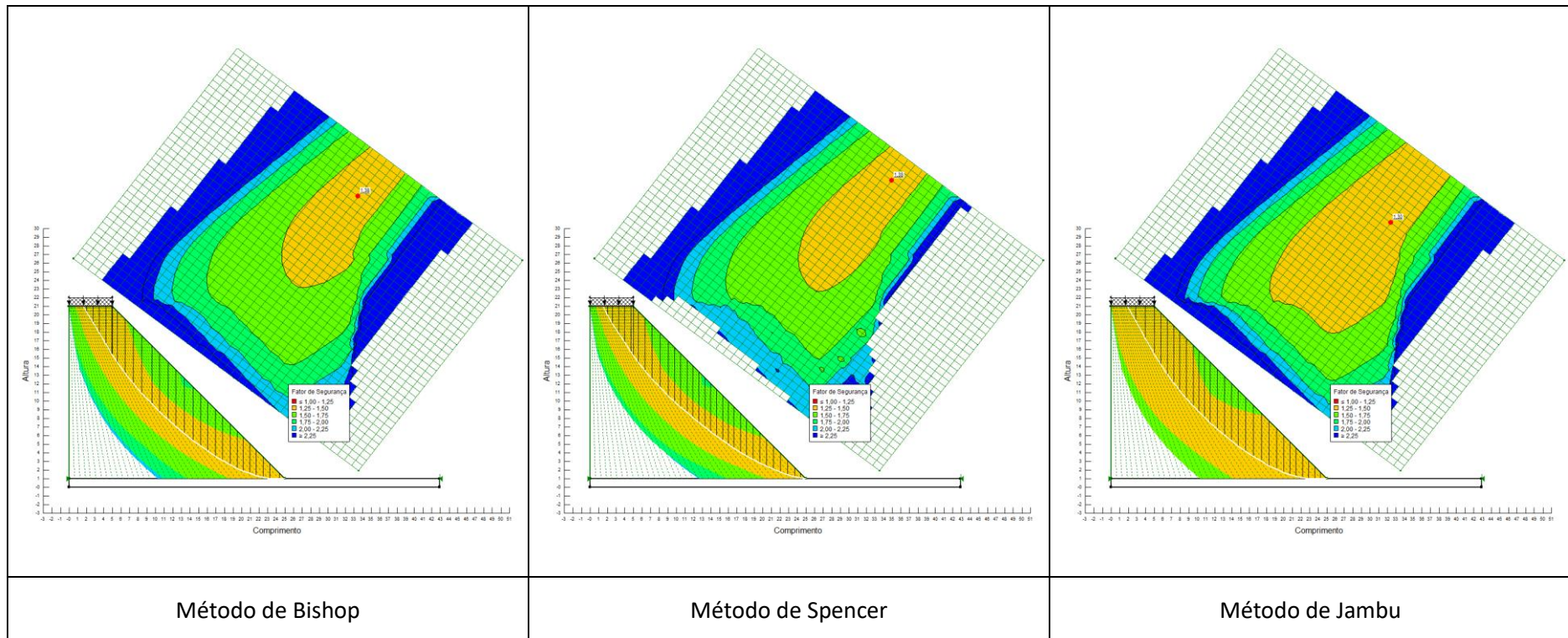
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

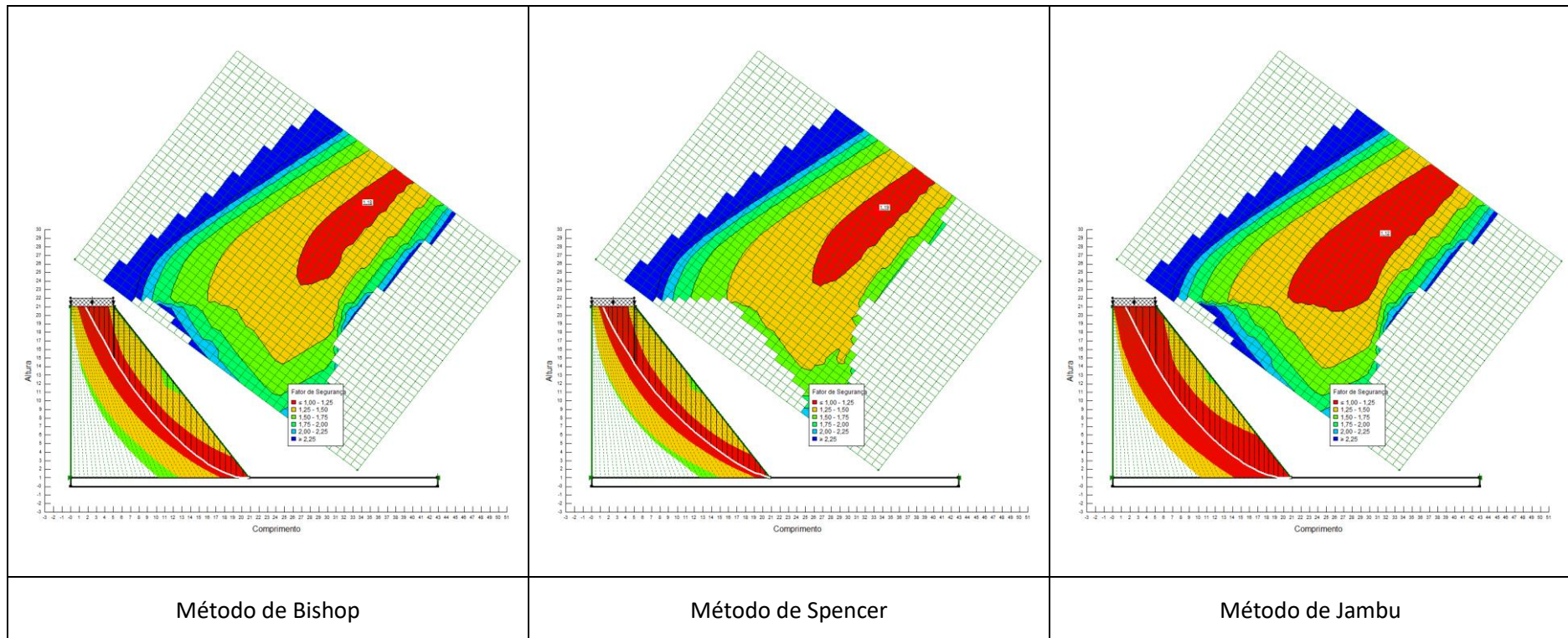
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

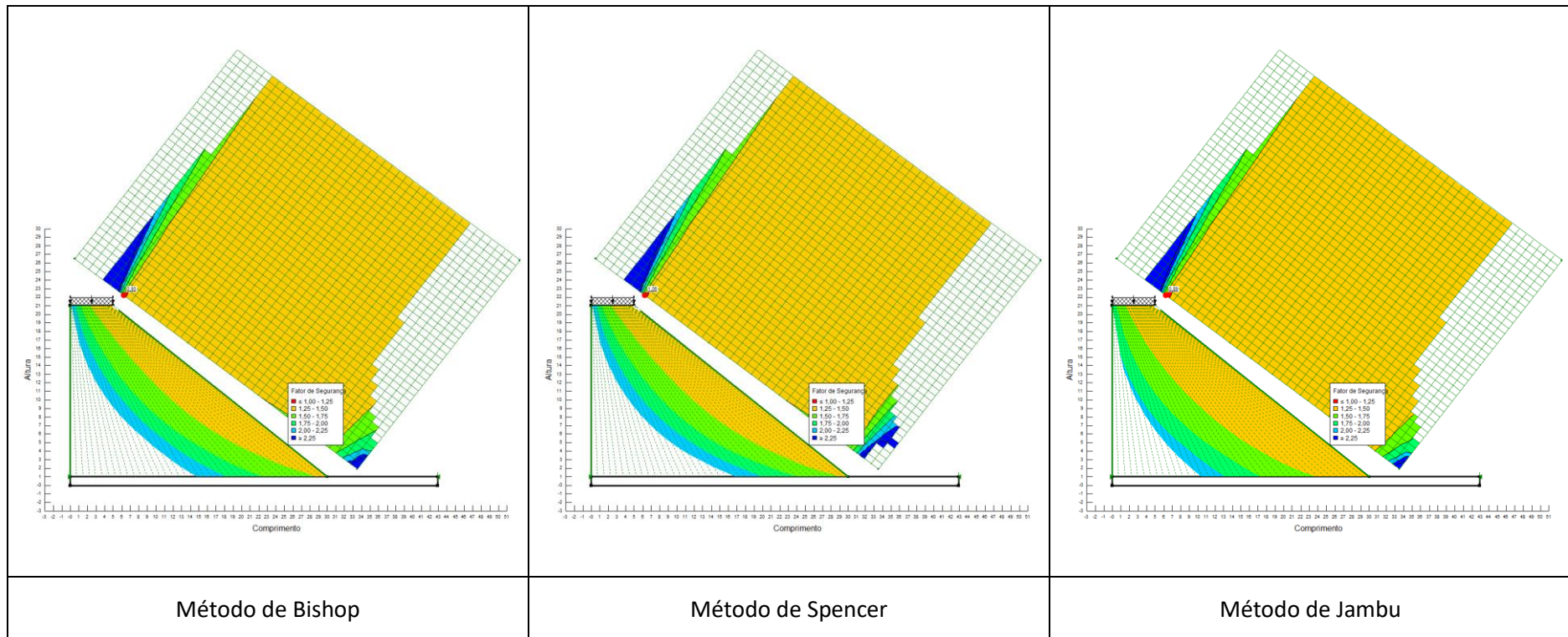
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

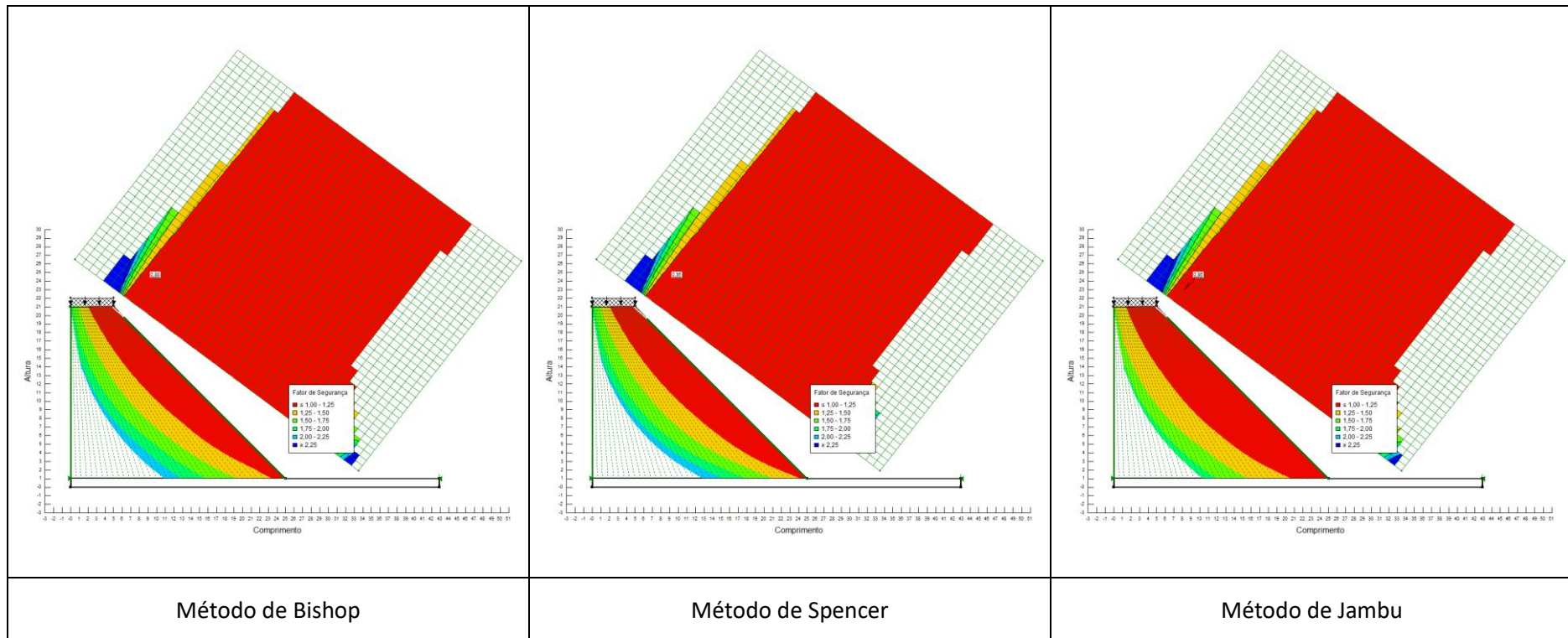
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

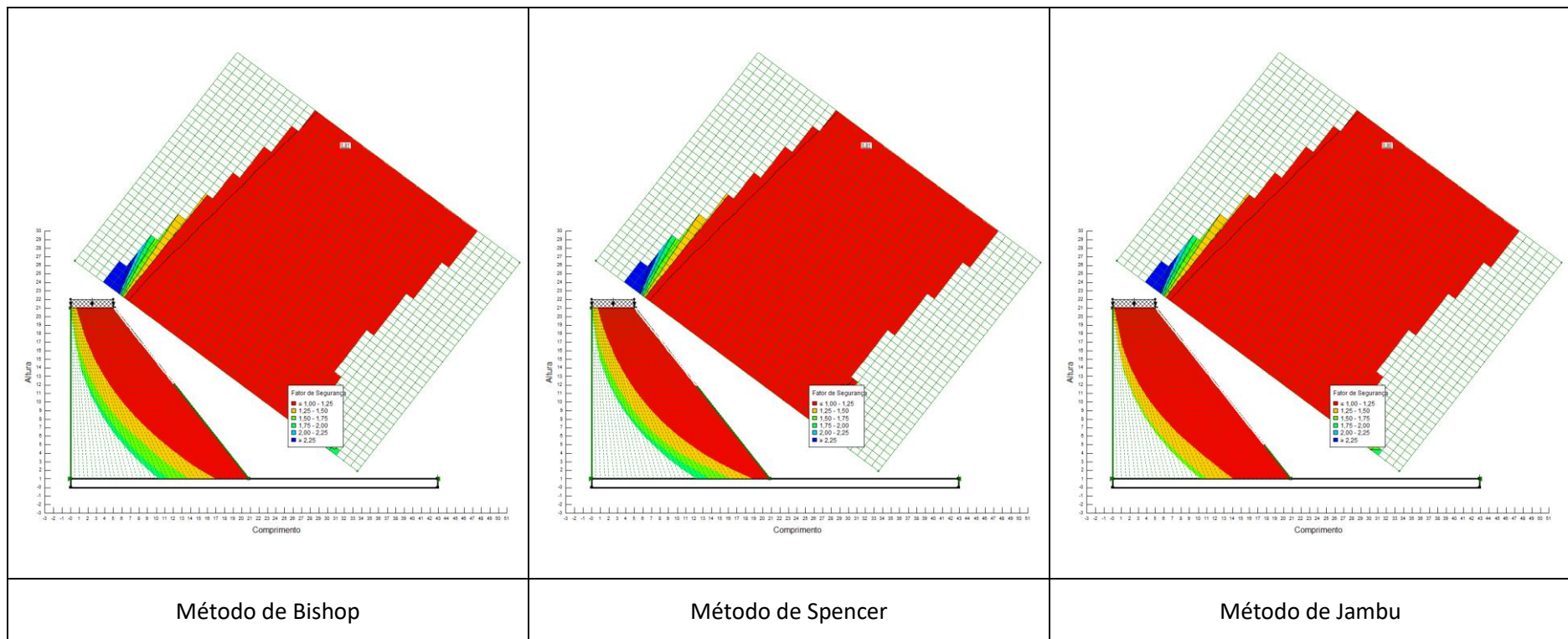
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

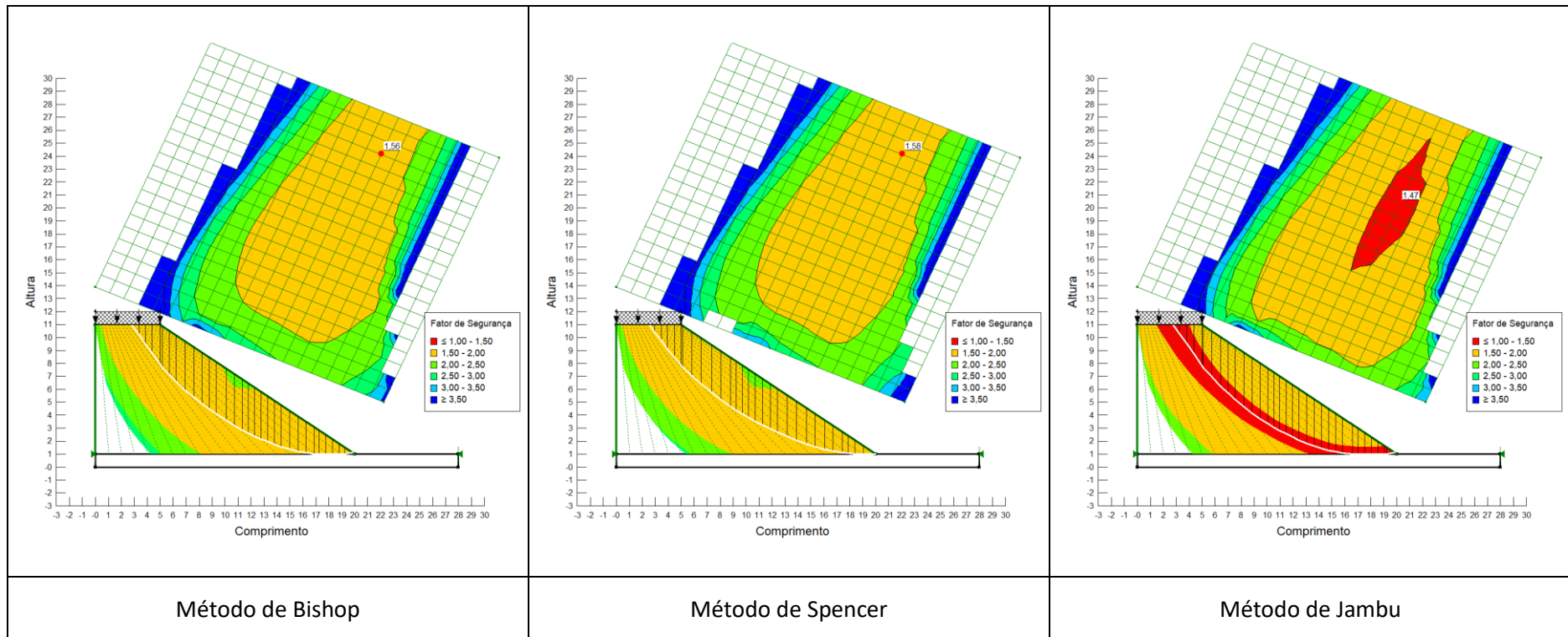
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

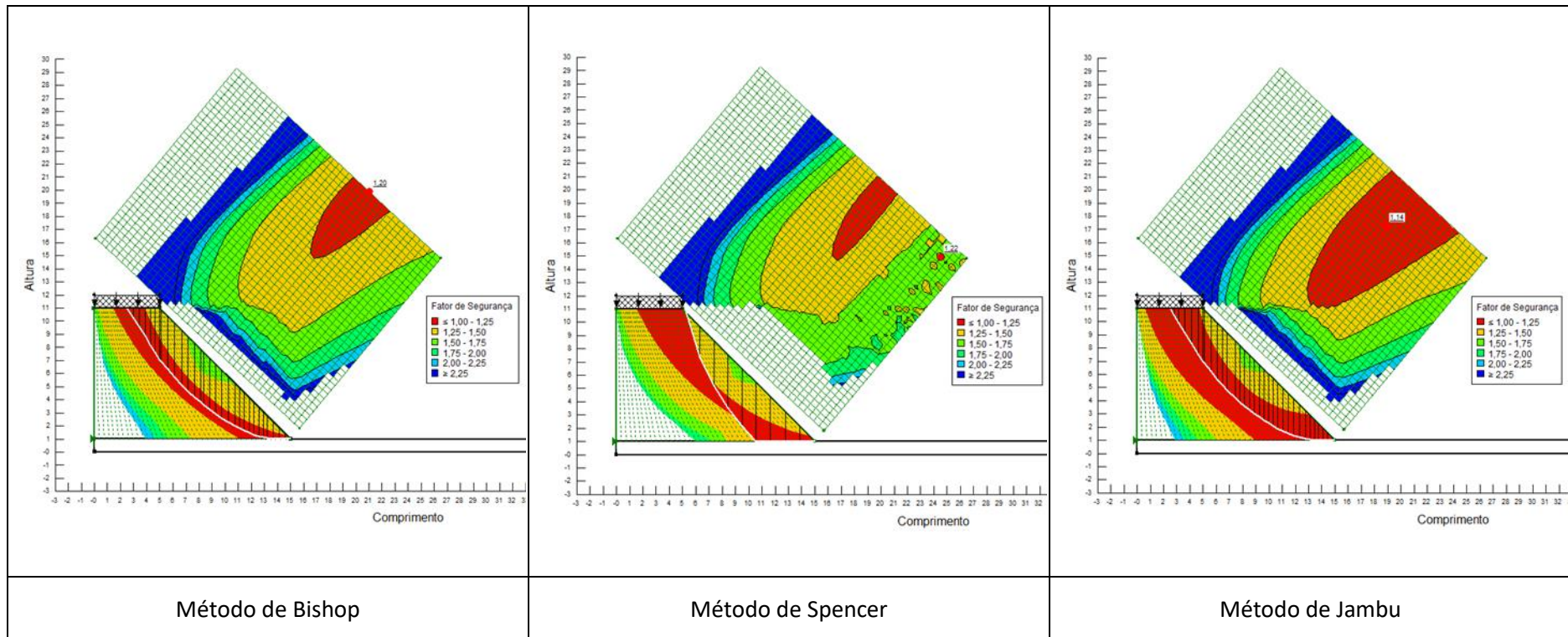
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

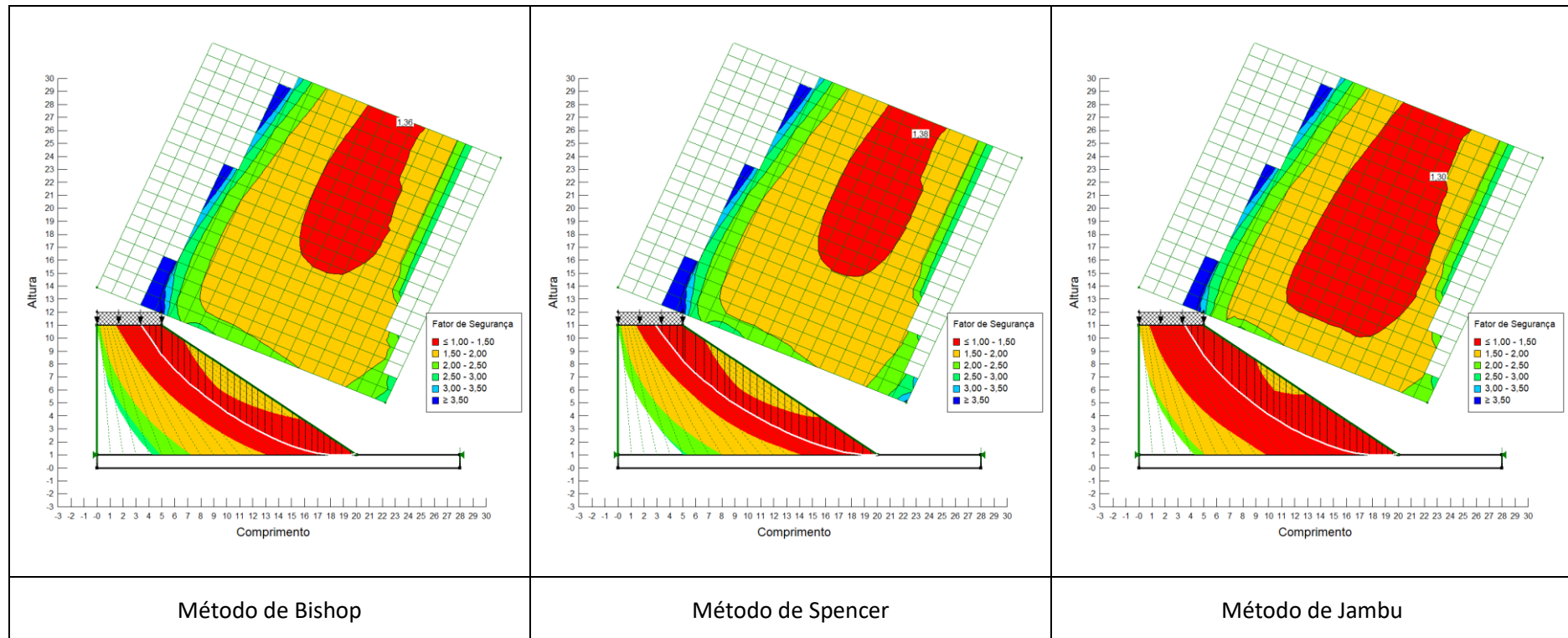
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

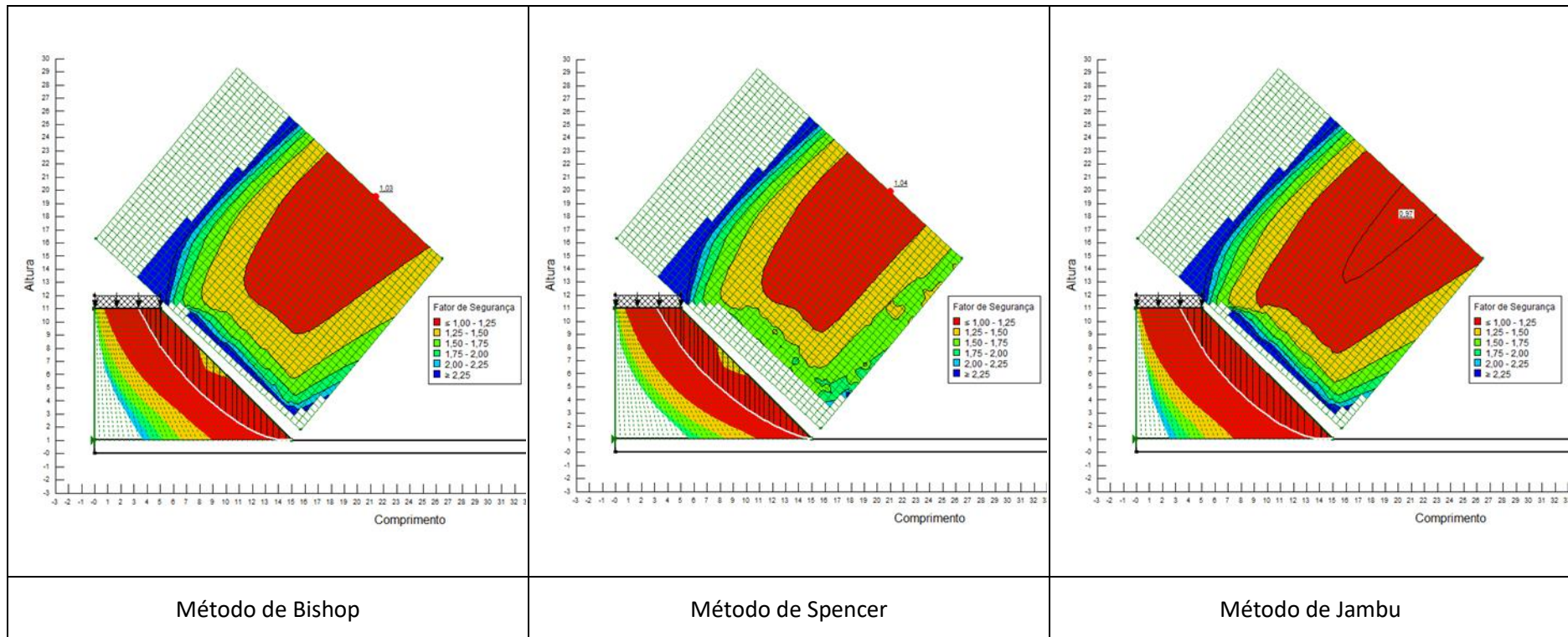
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

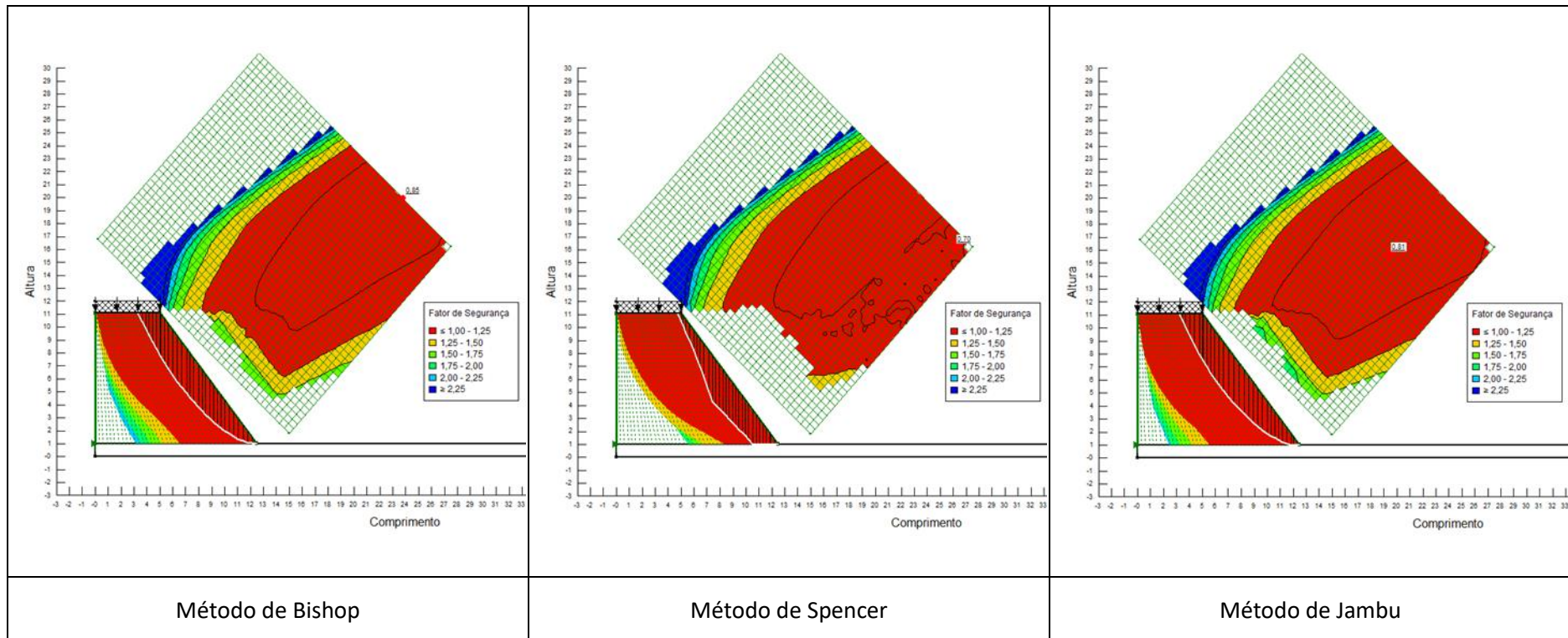
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

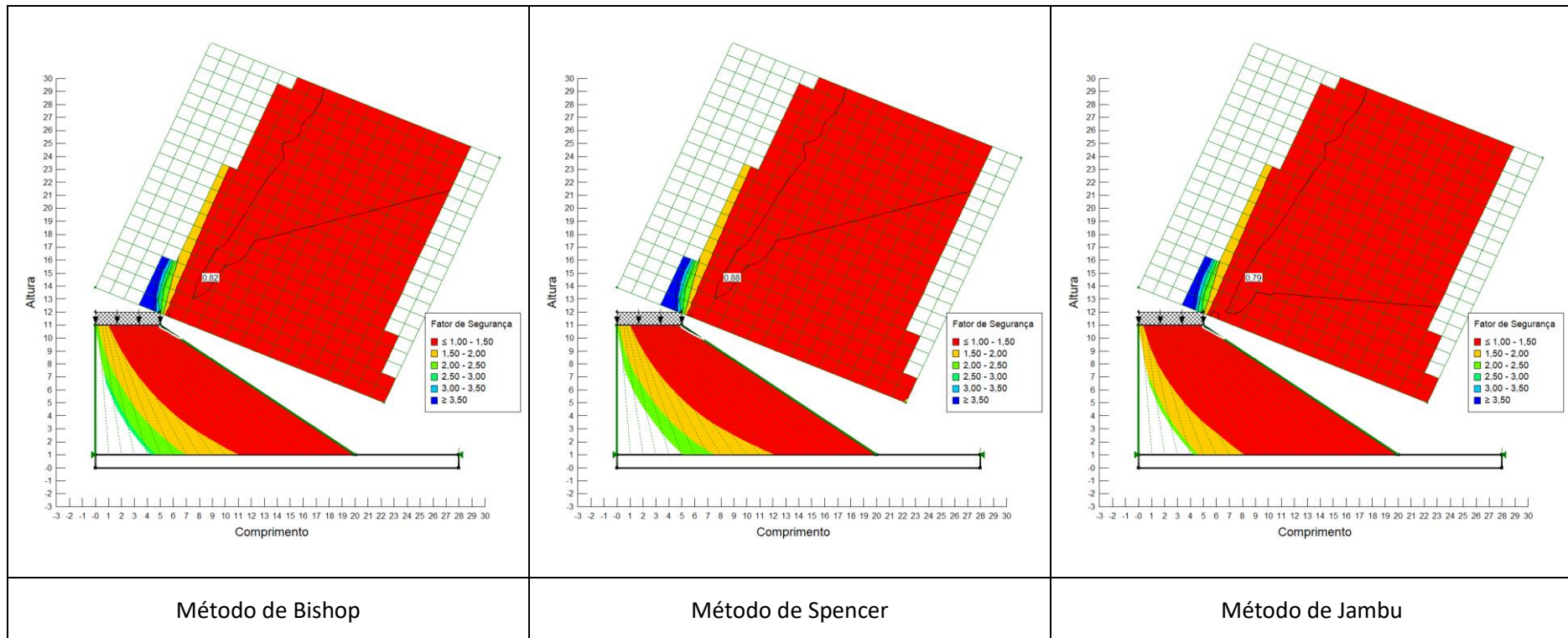
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

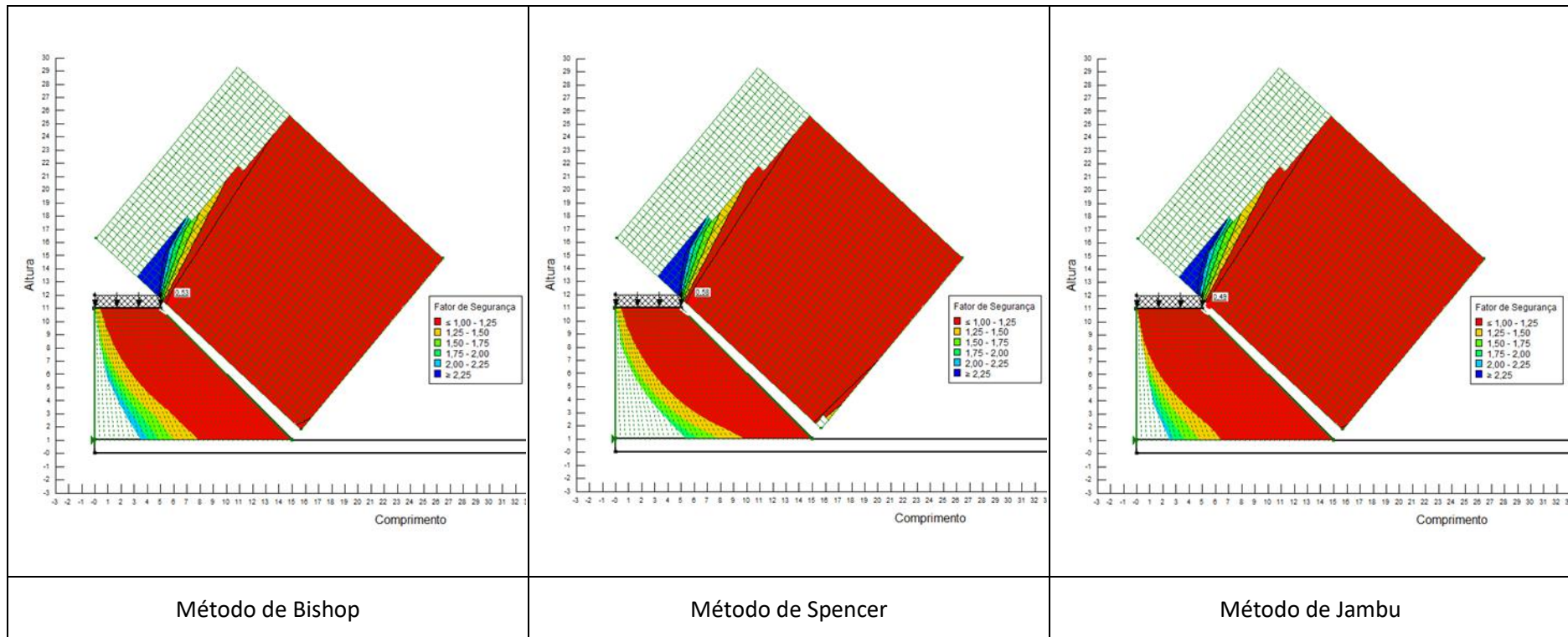
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

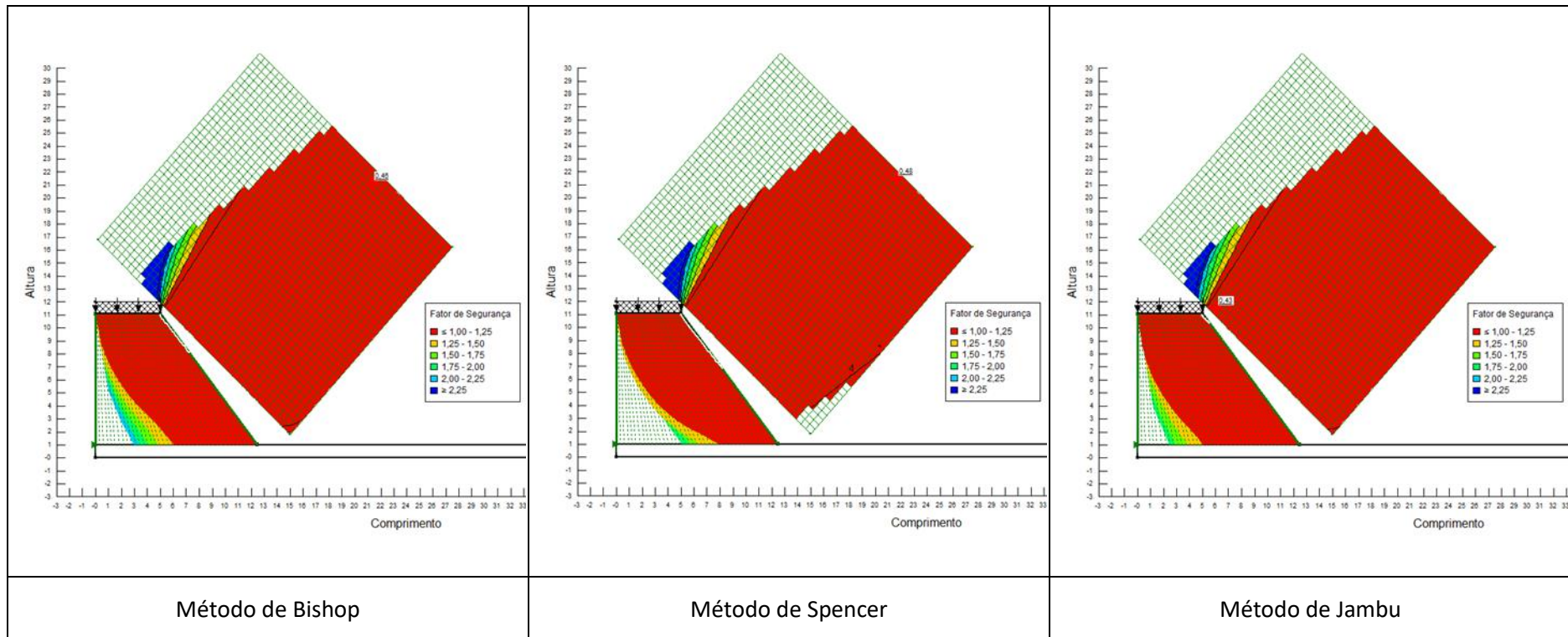
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

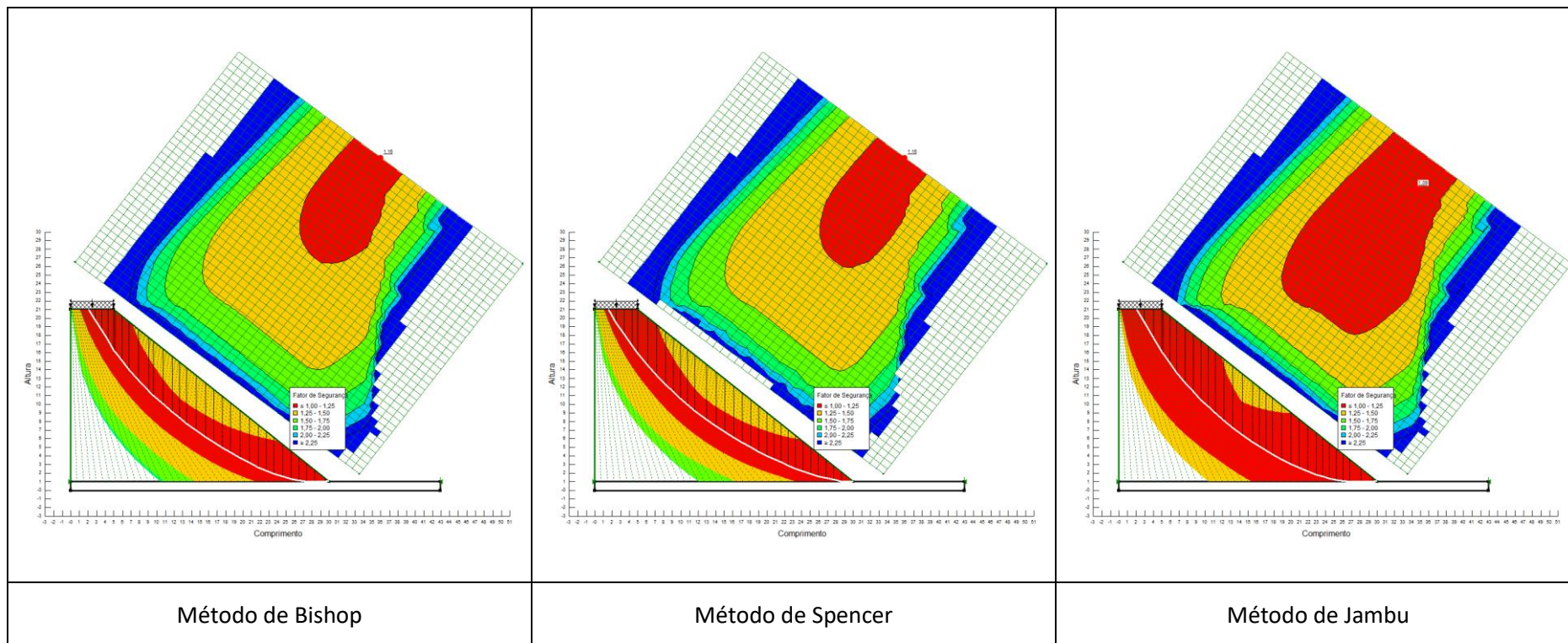
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

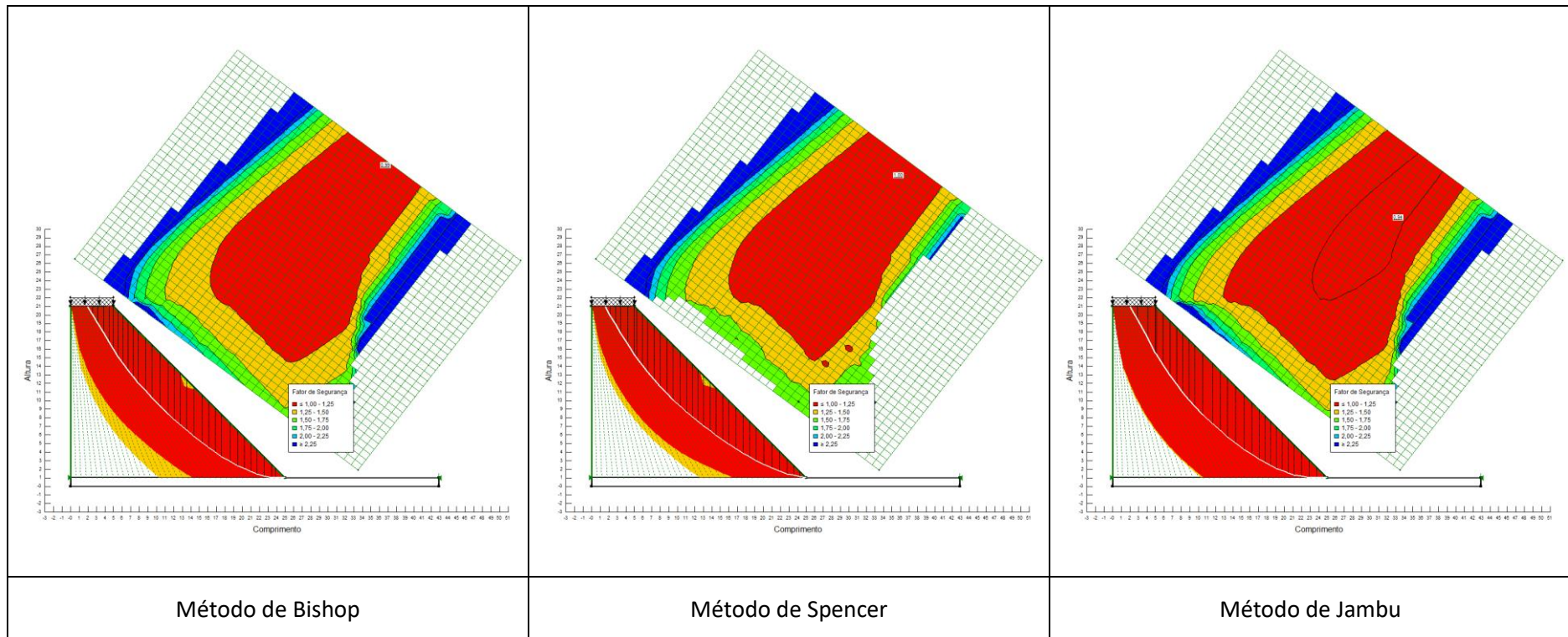
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

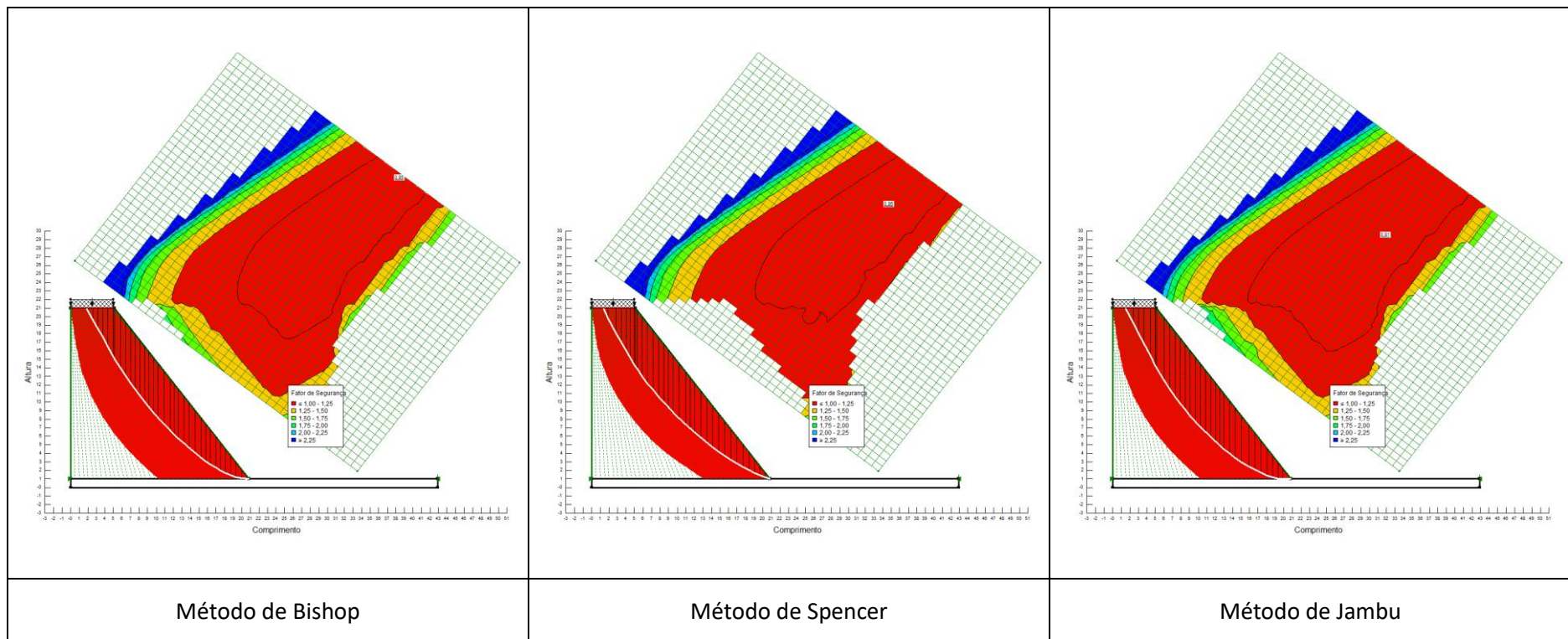
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

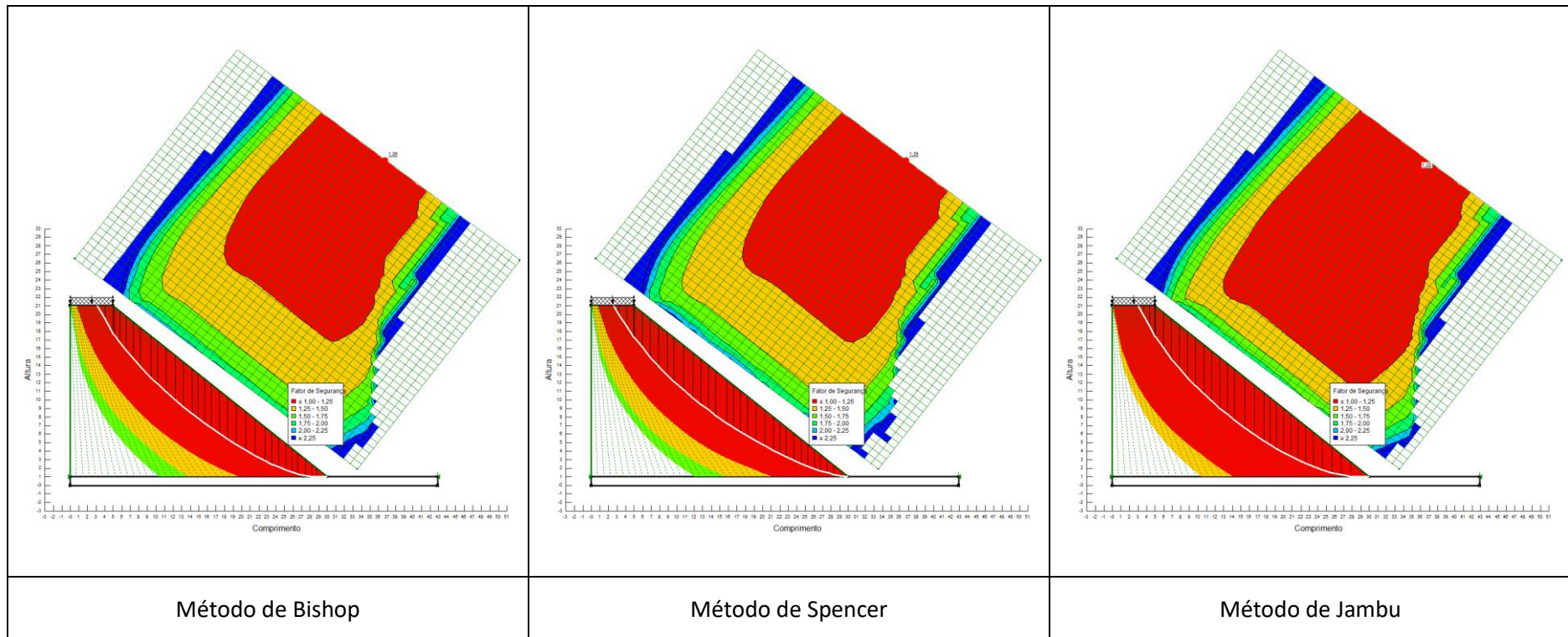
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

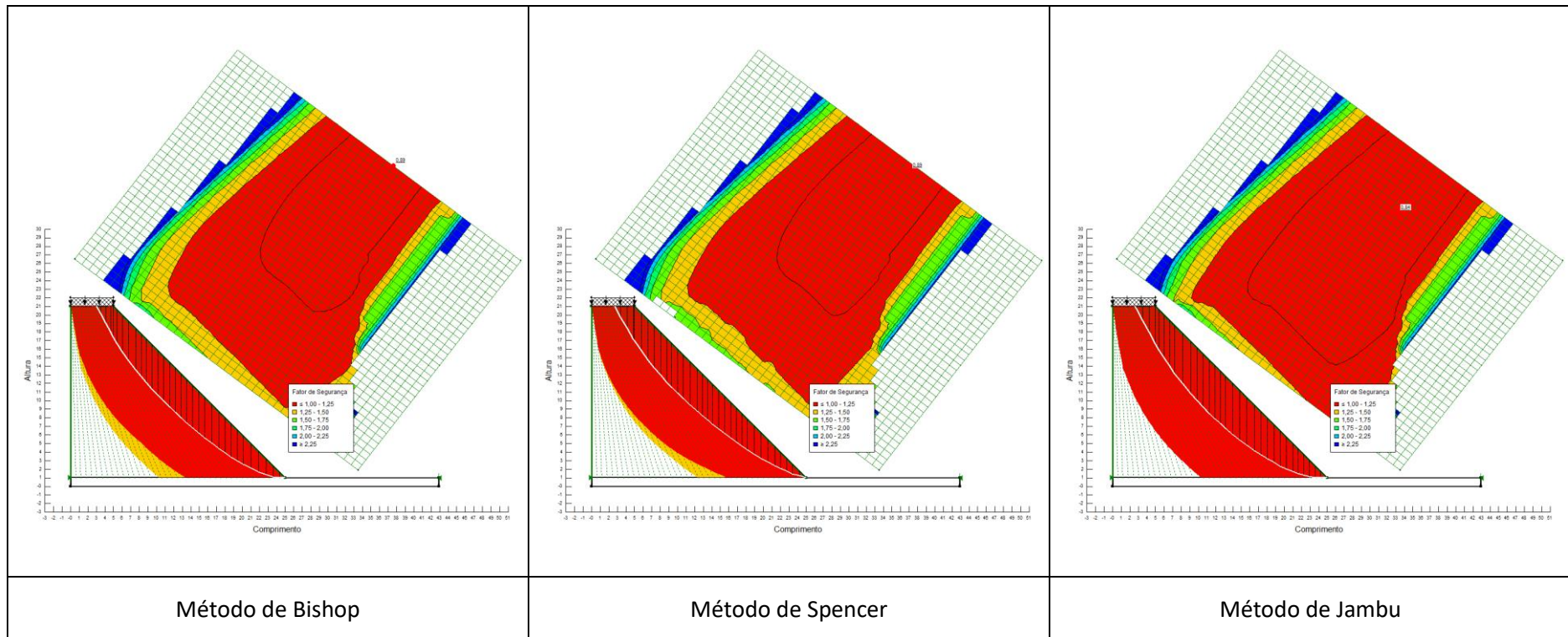
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

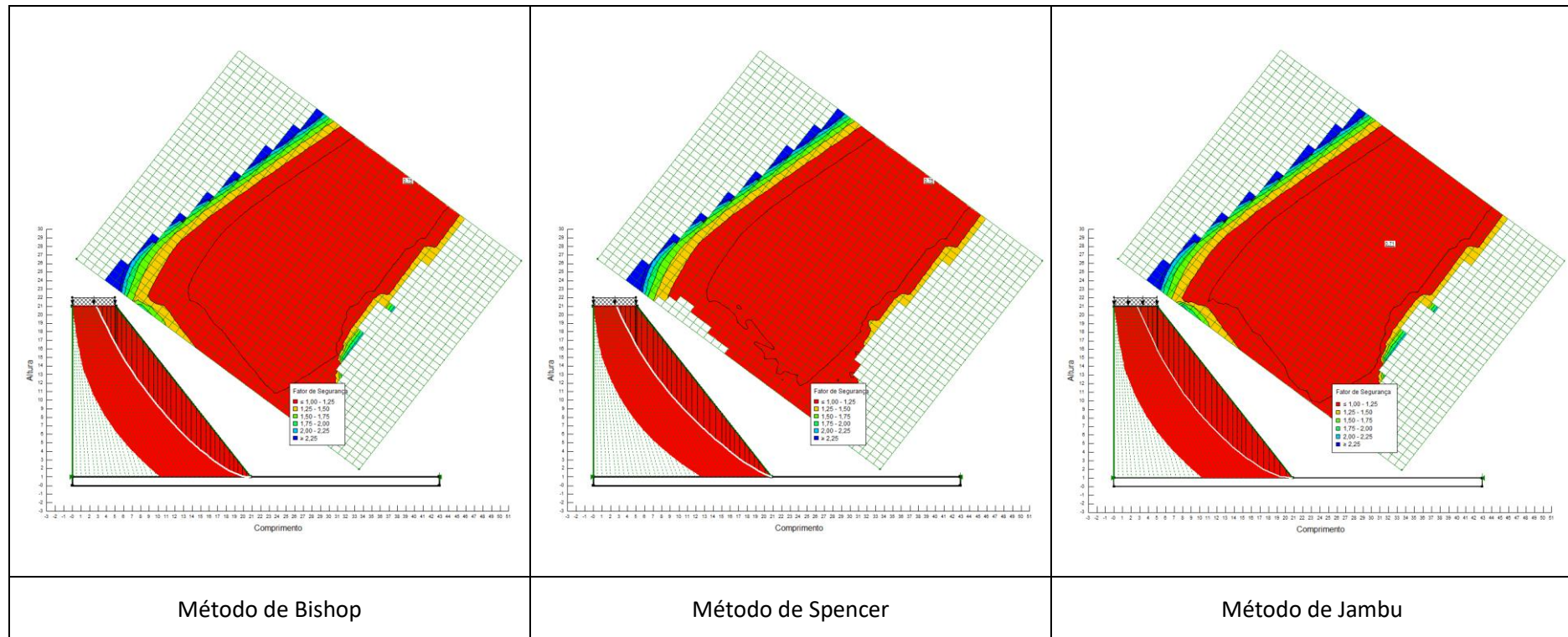
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

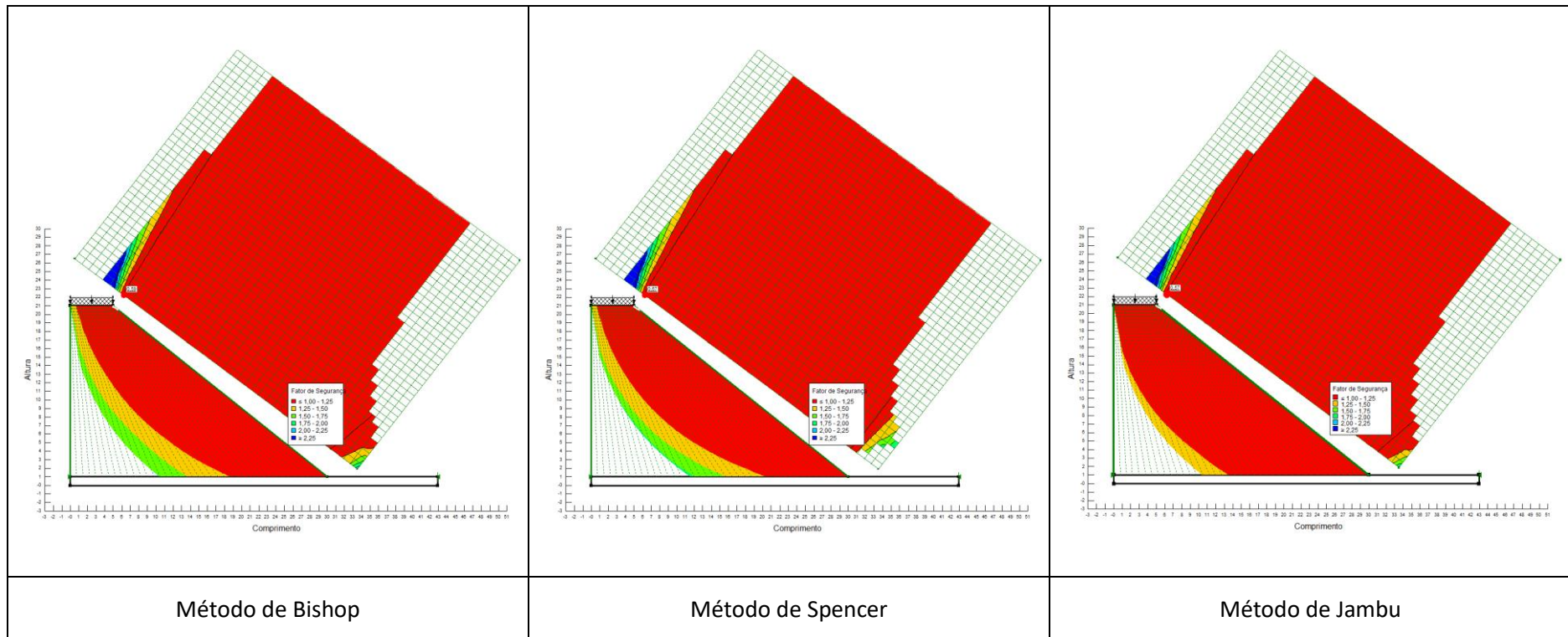
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

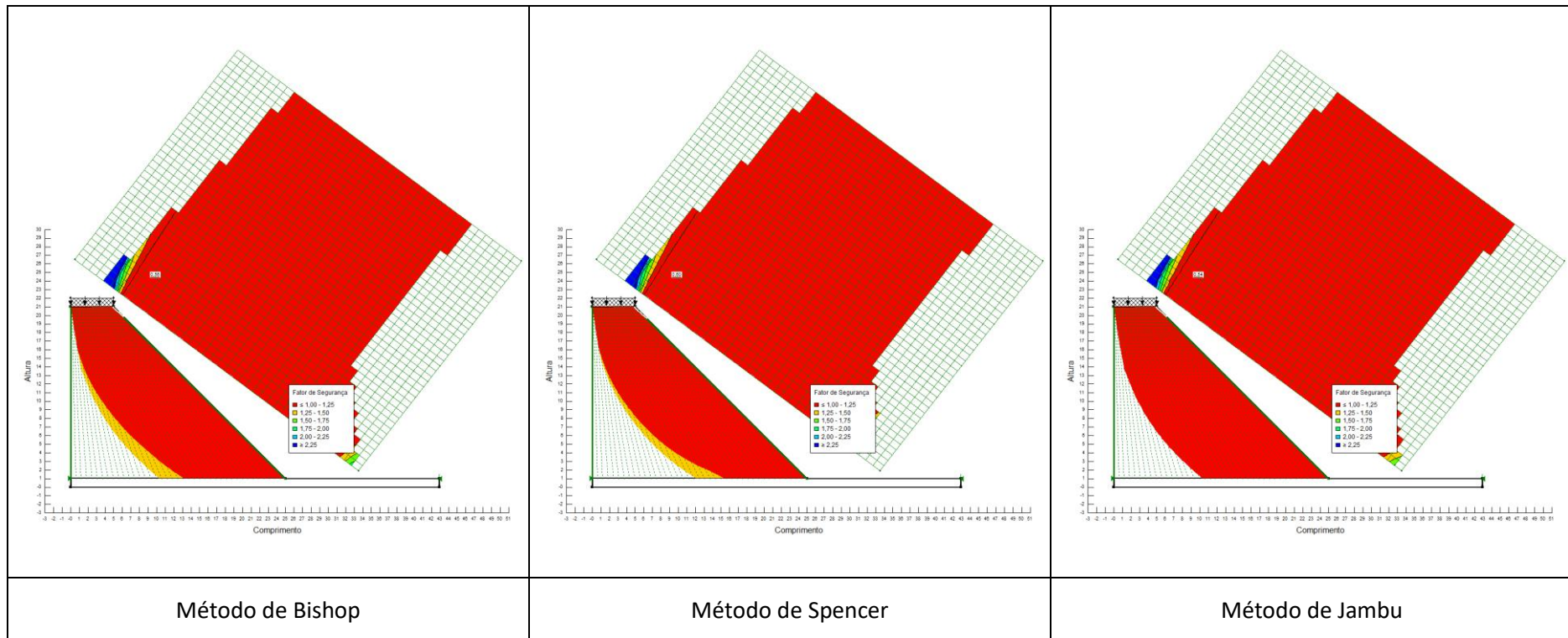
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

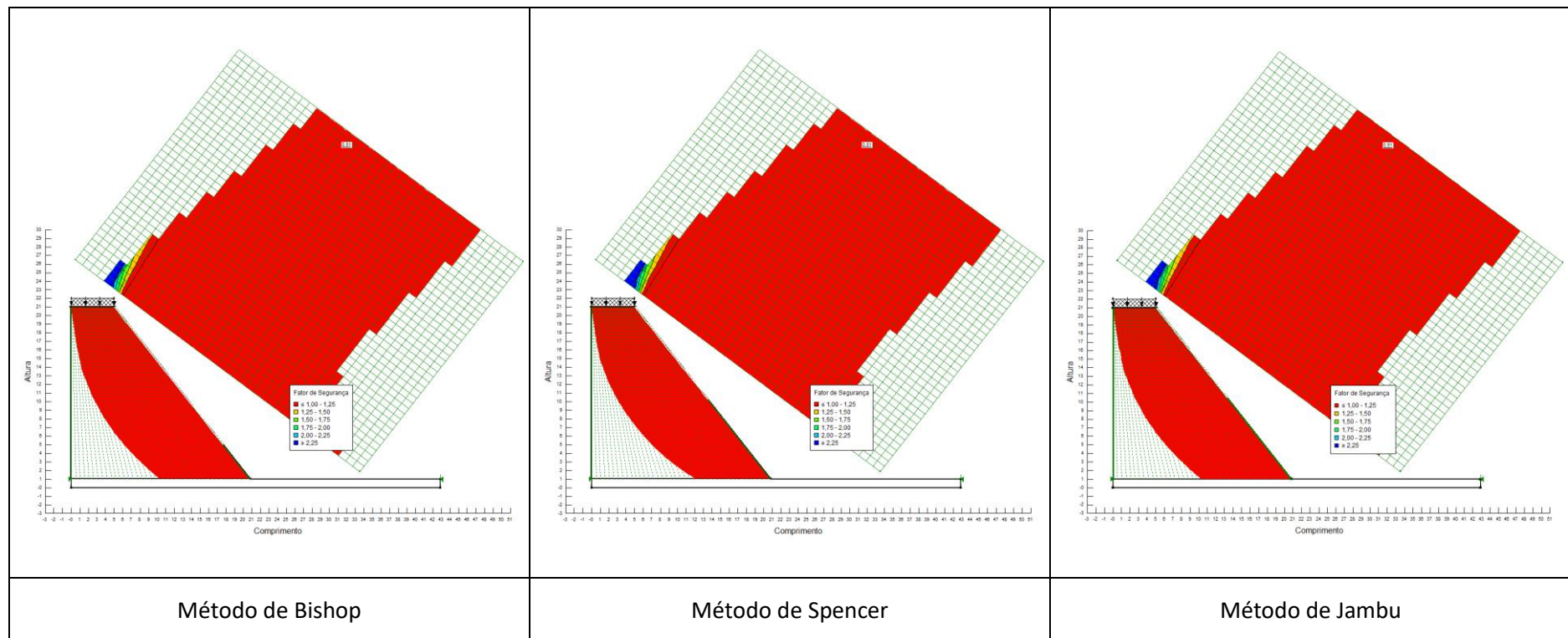
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z3 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75

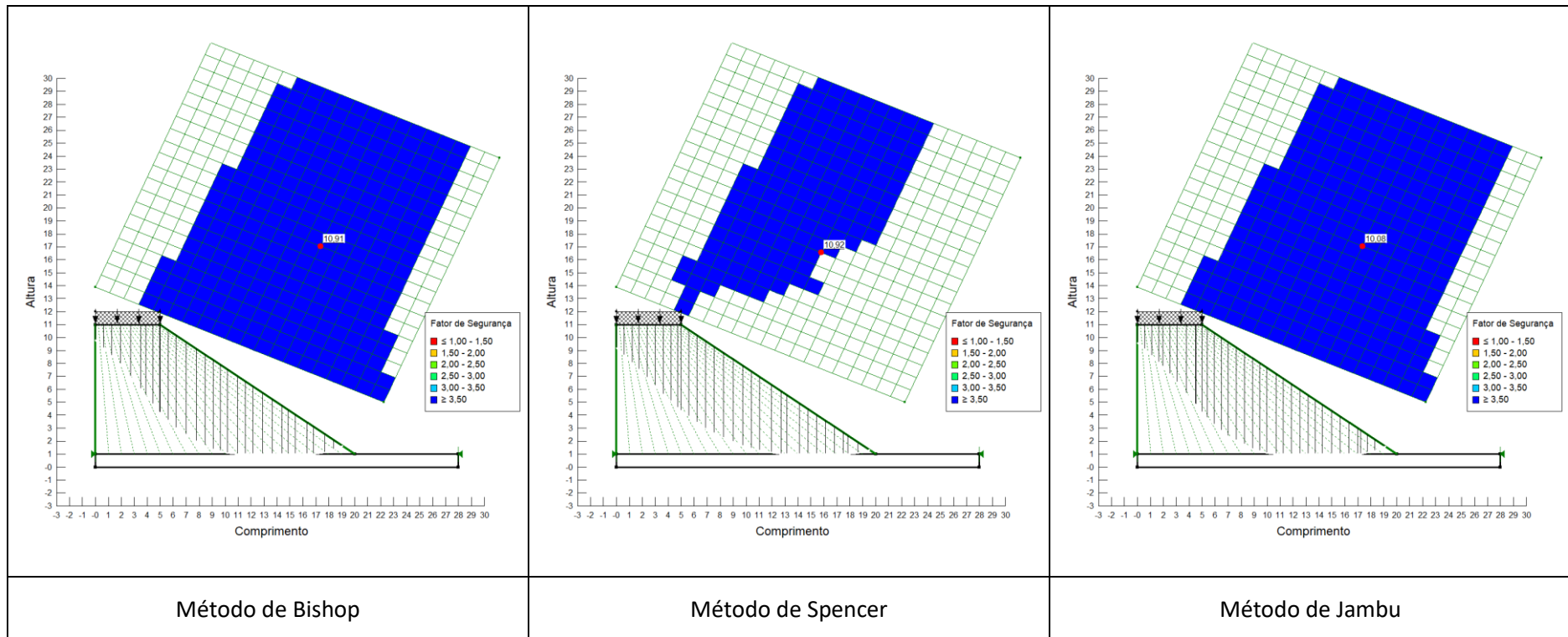


SOLO Z4

SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

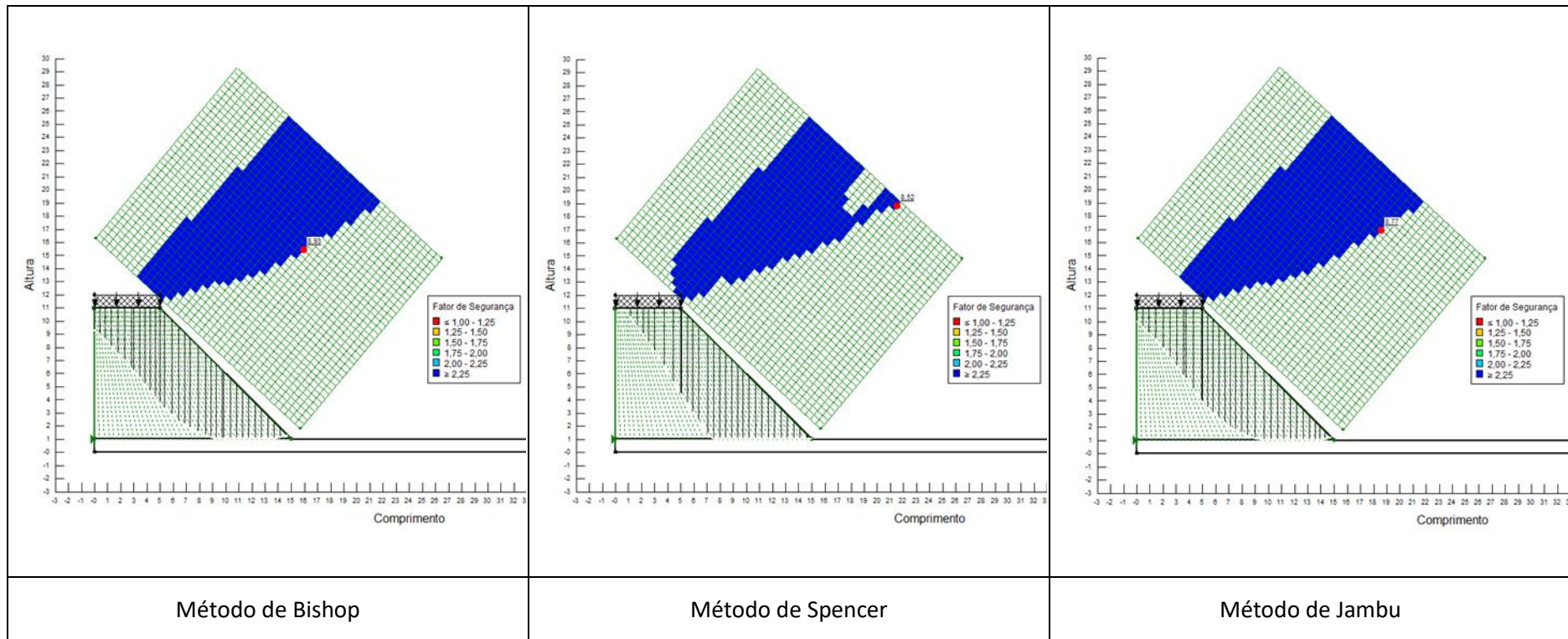
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

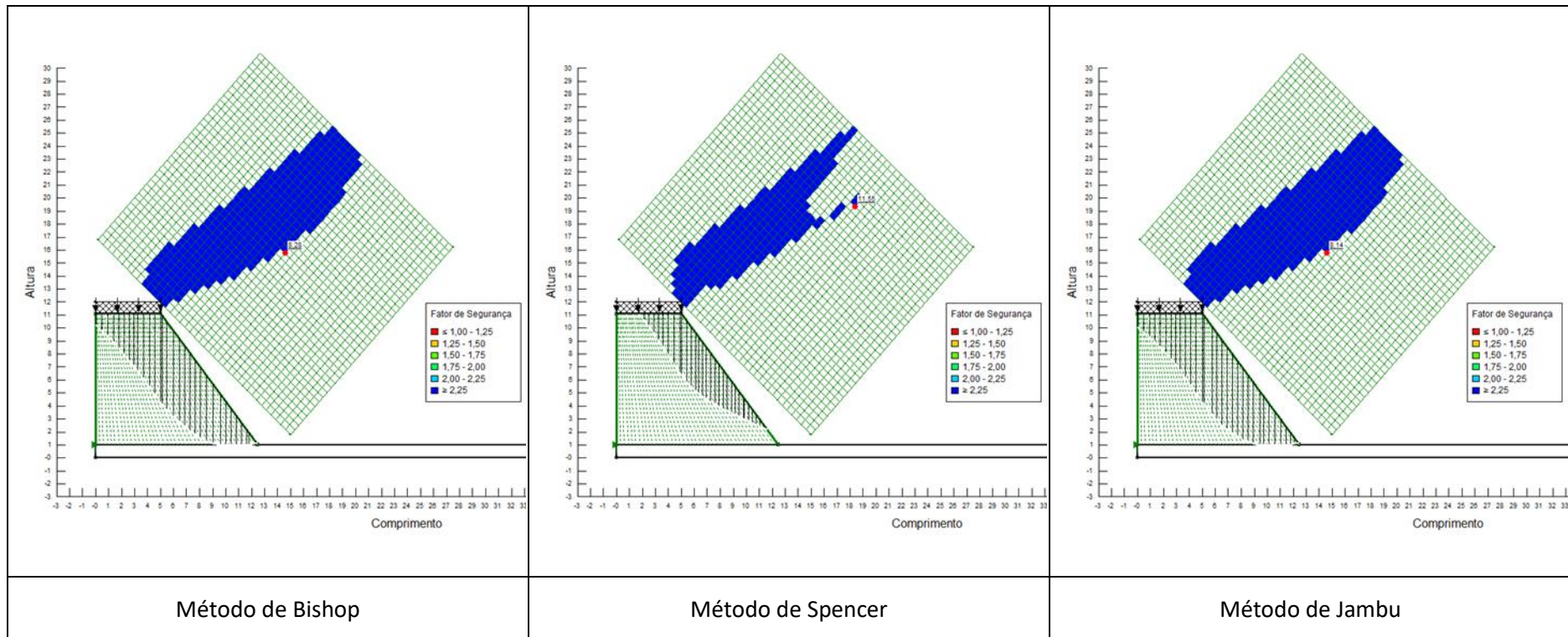
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

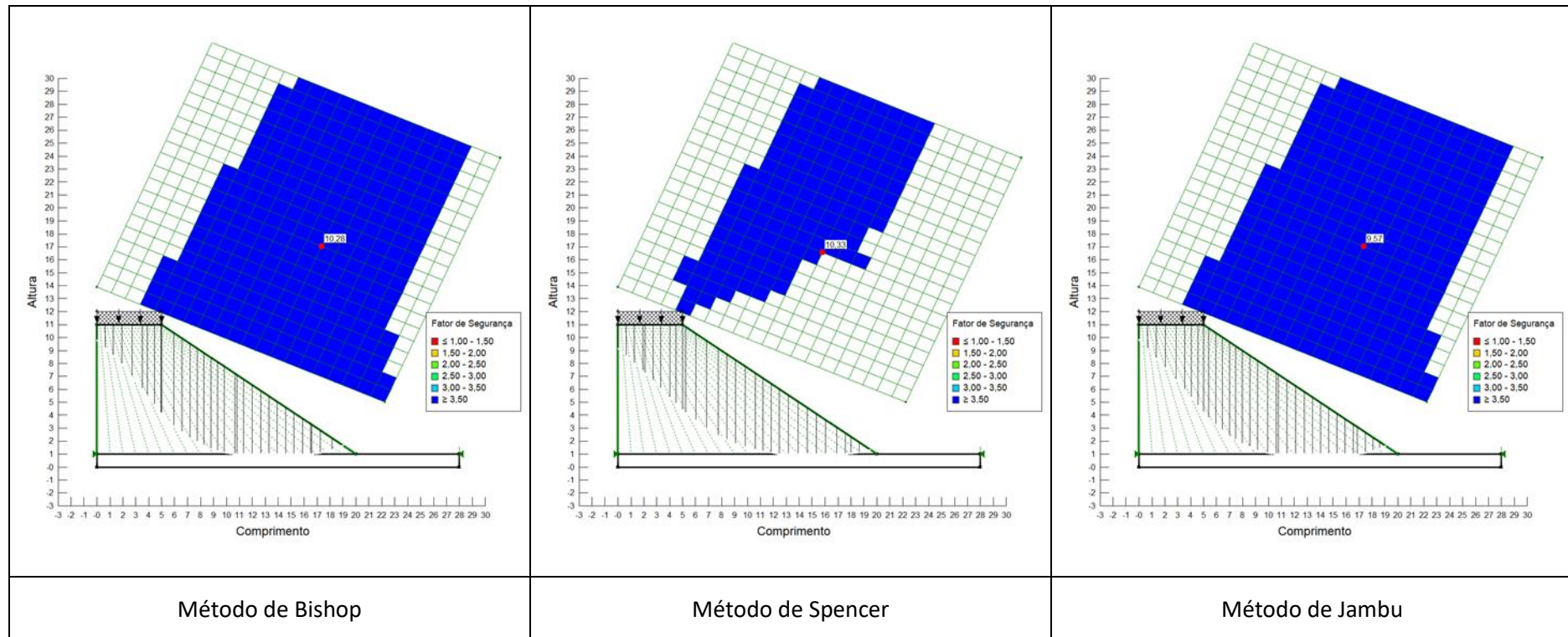
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

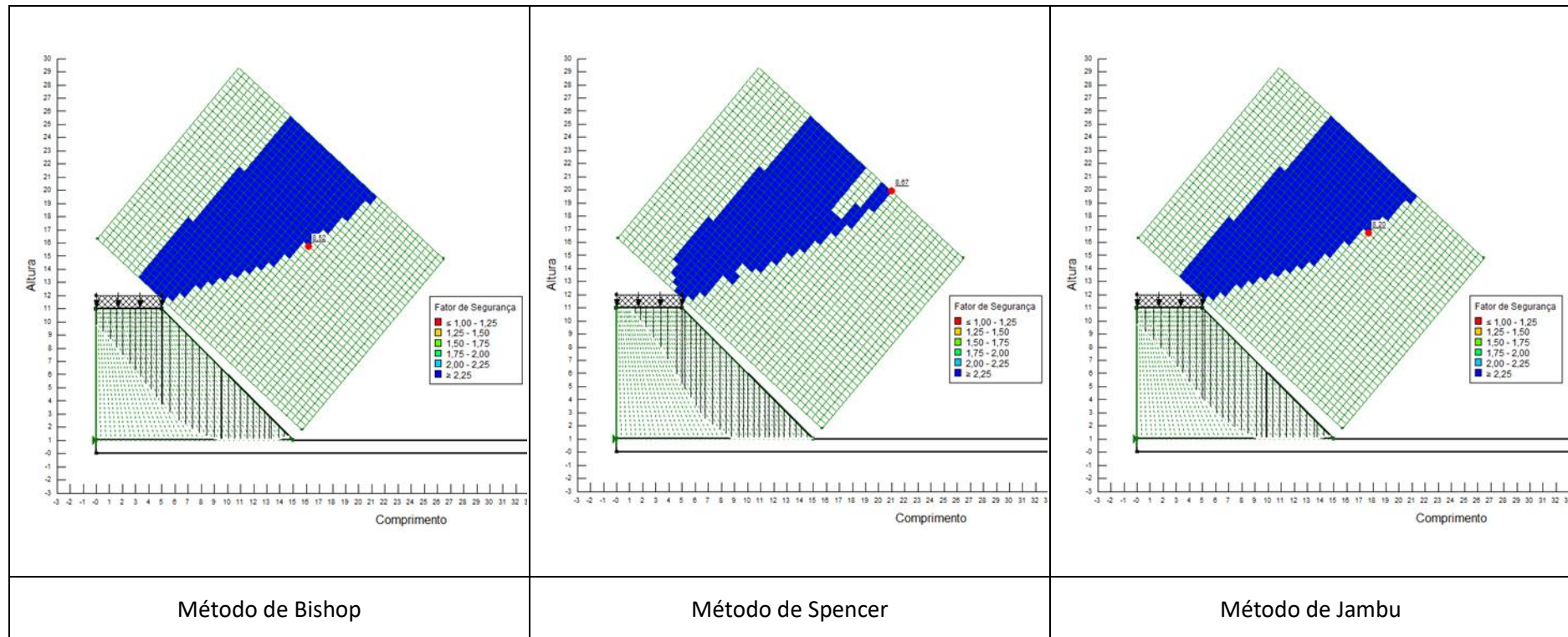
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

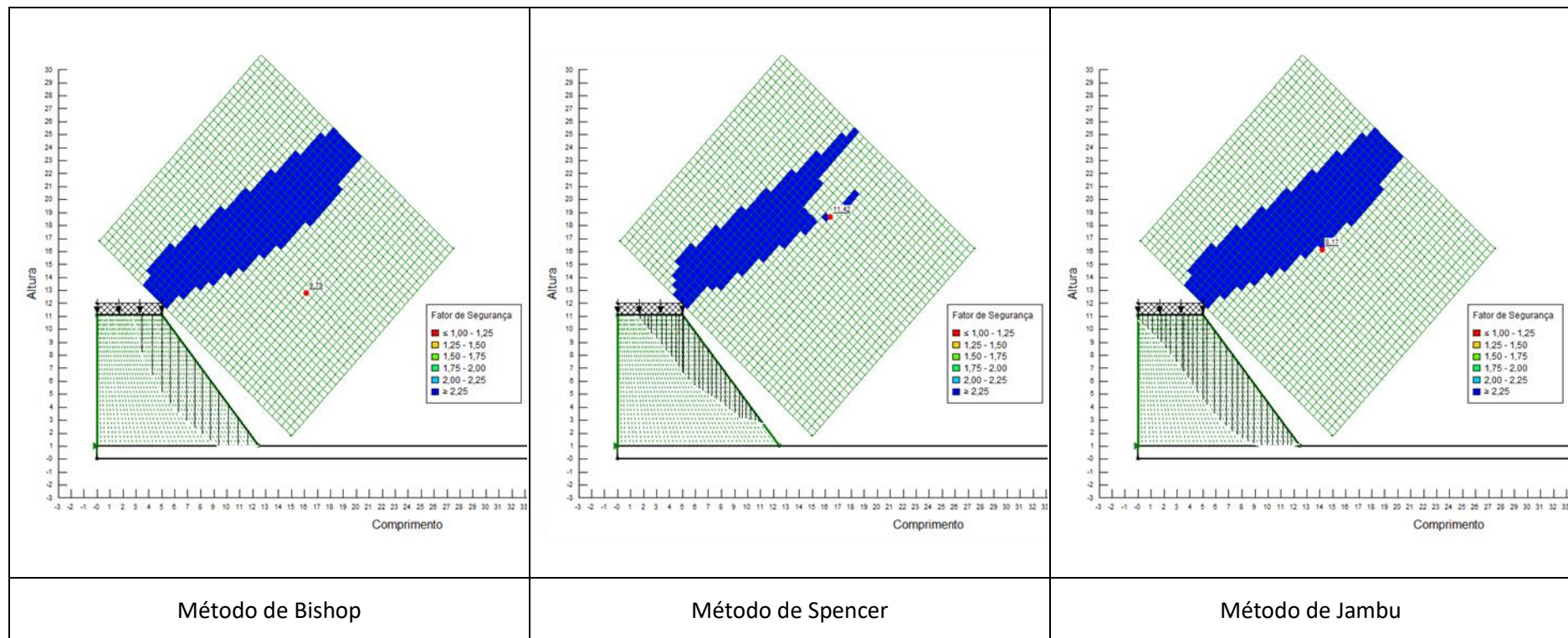
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

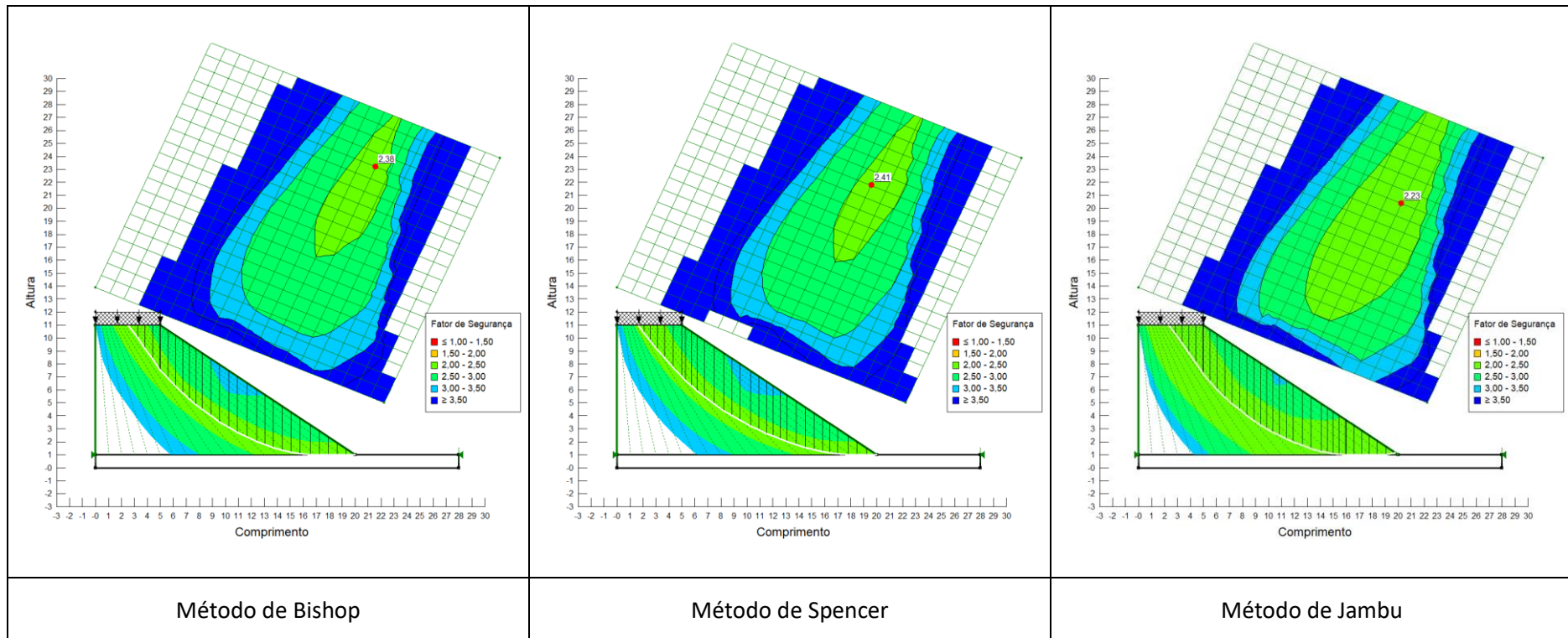
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

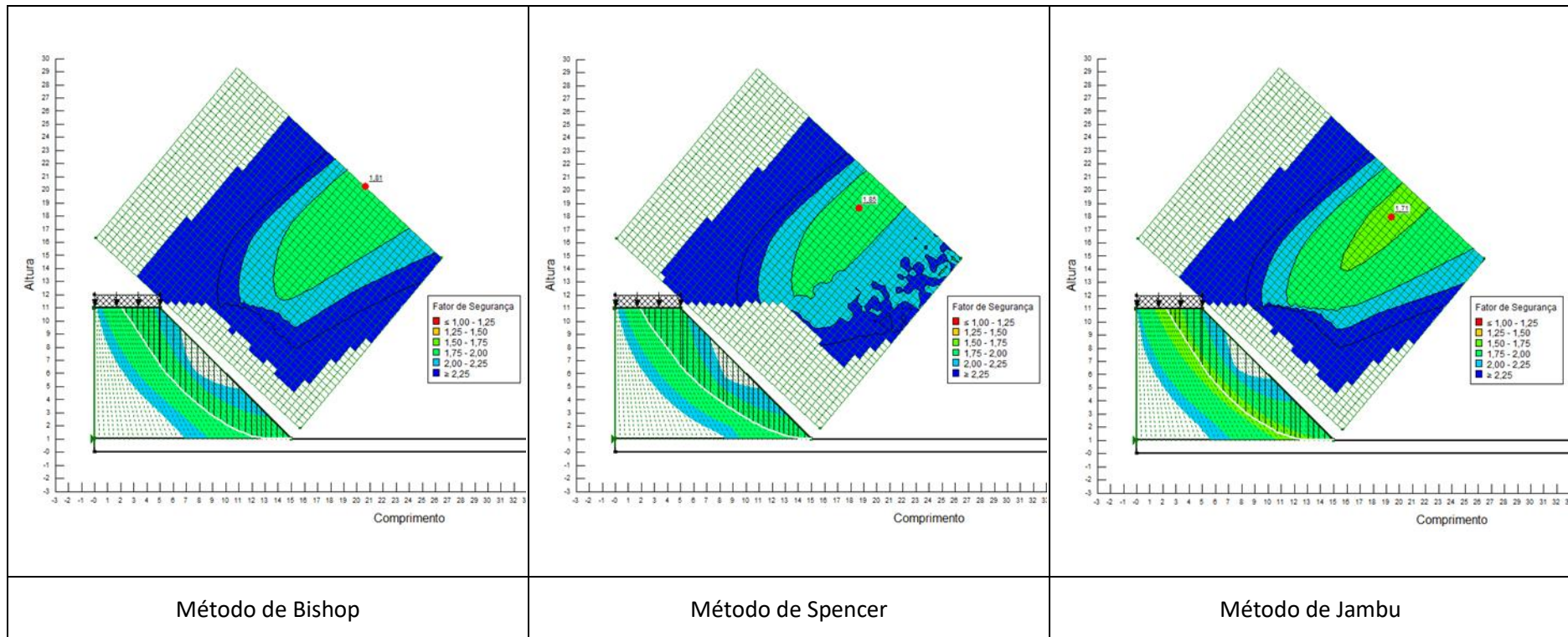
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

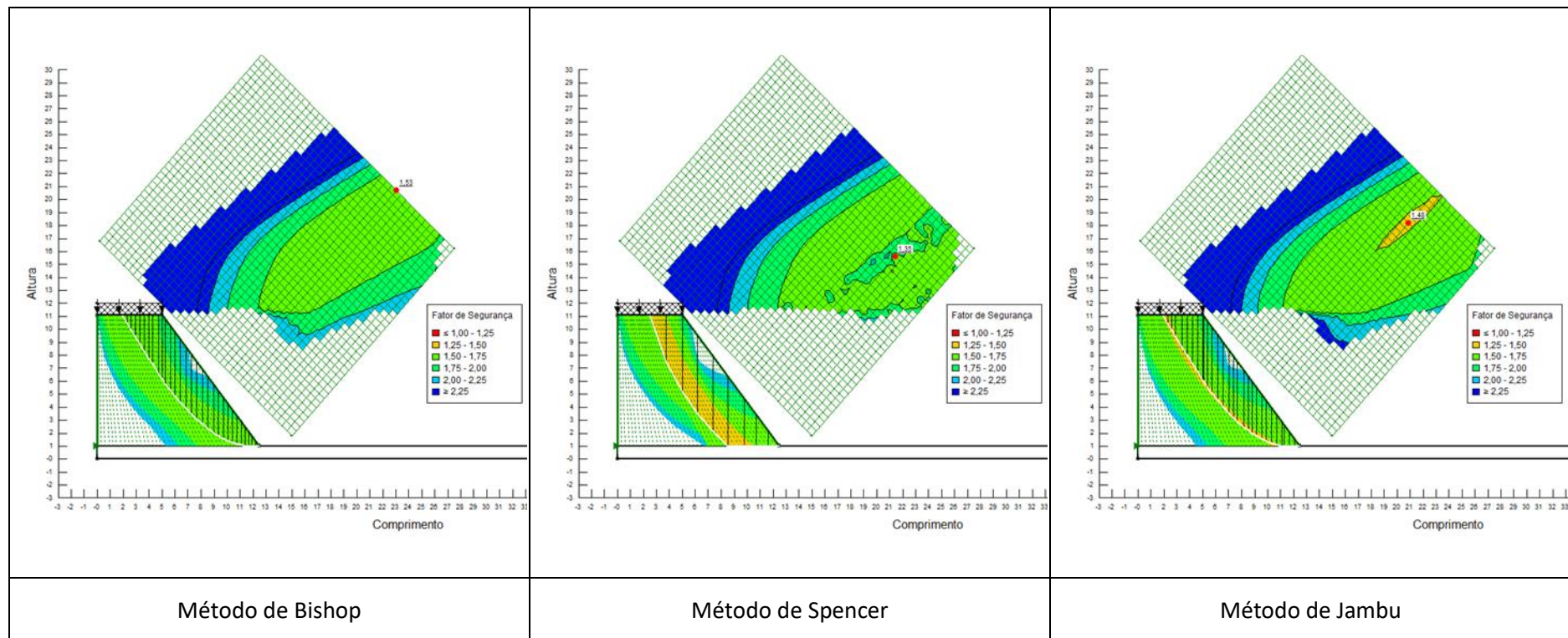
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

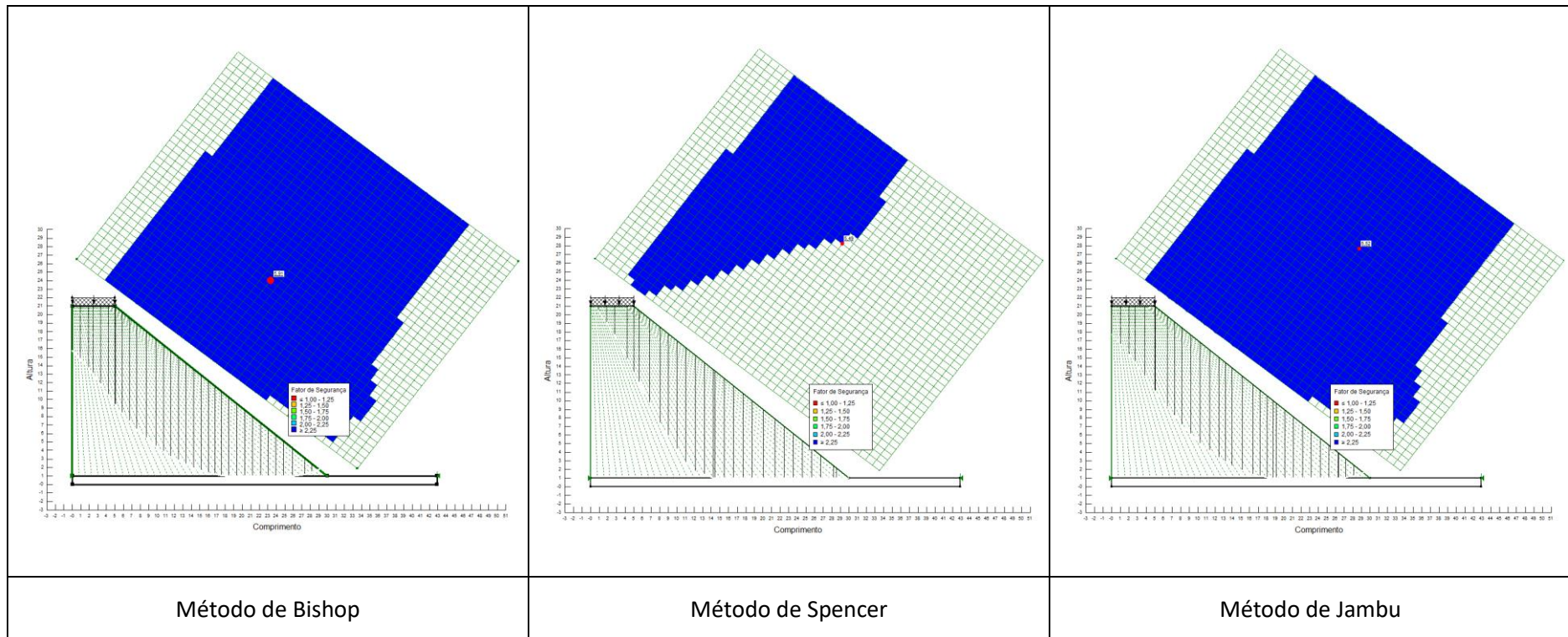
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

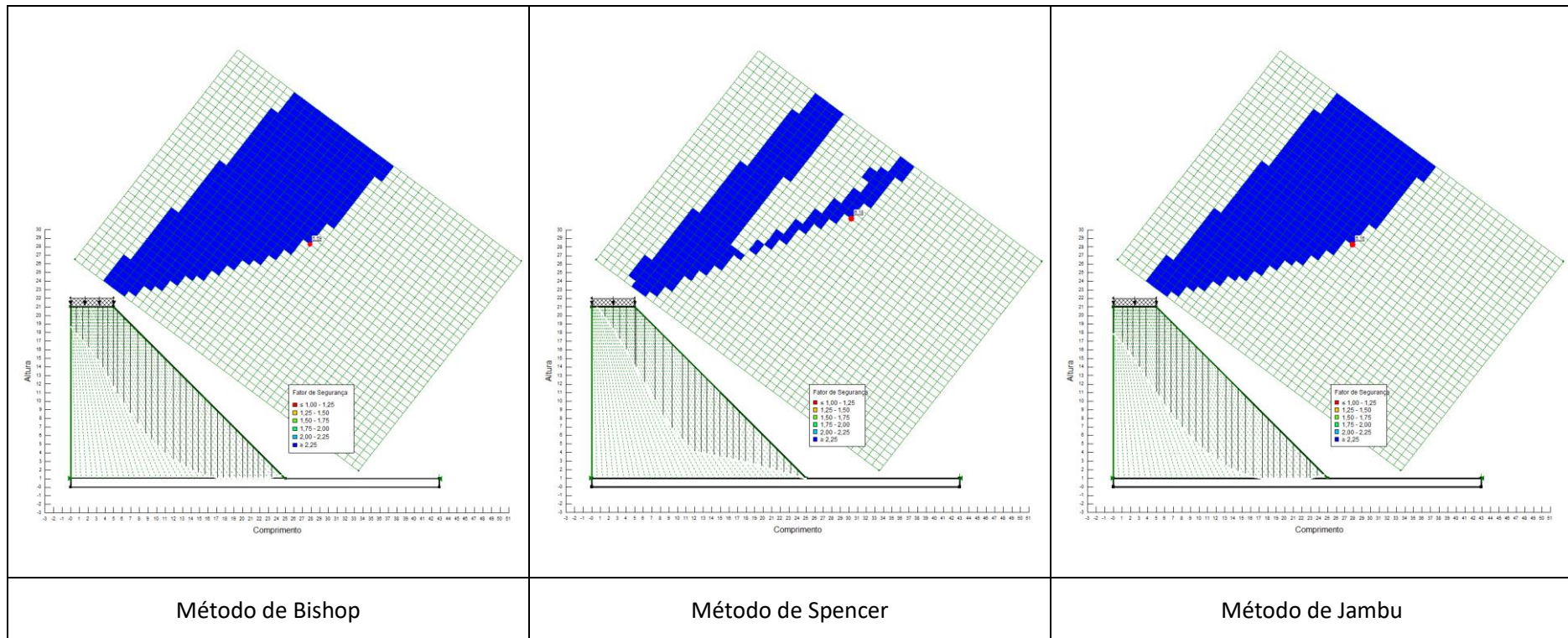
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

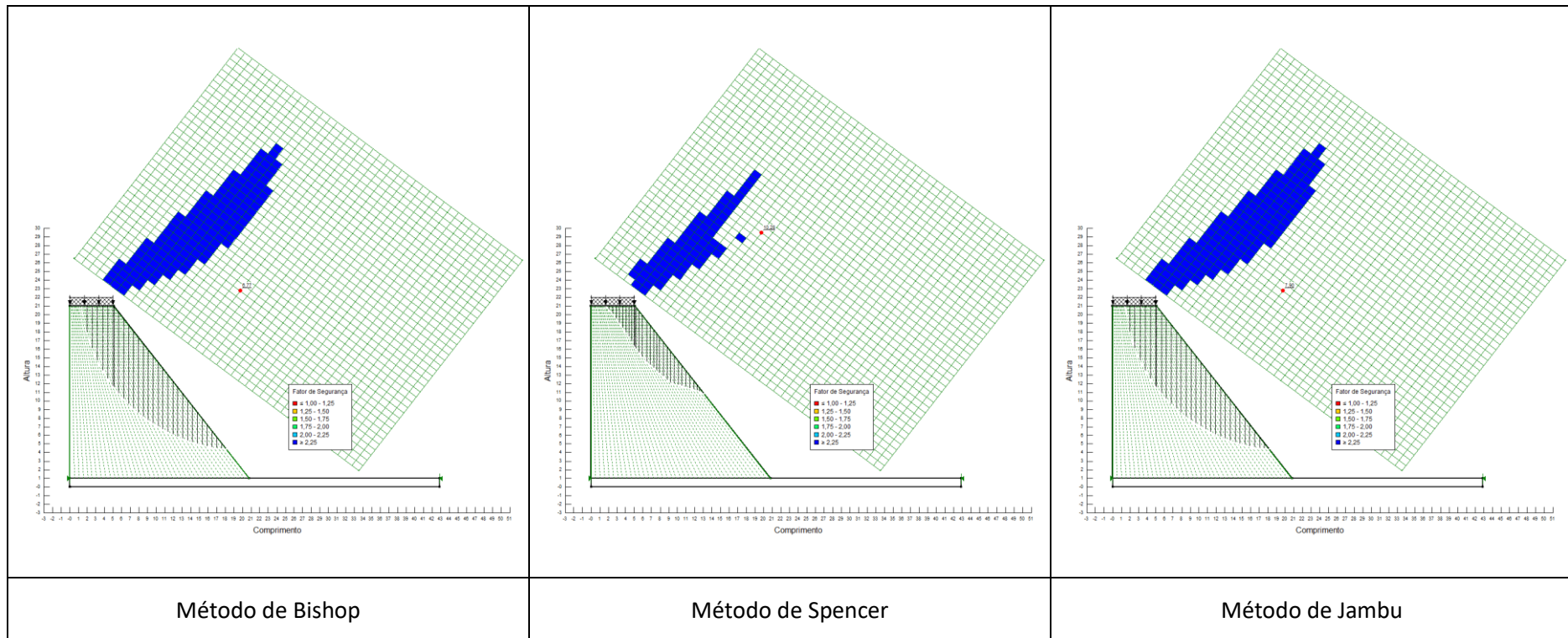
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

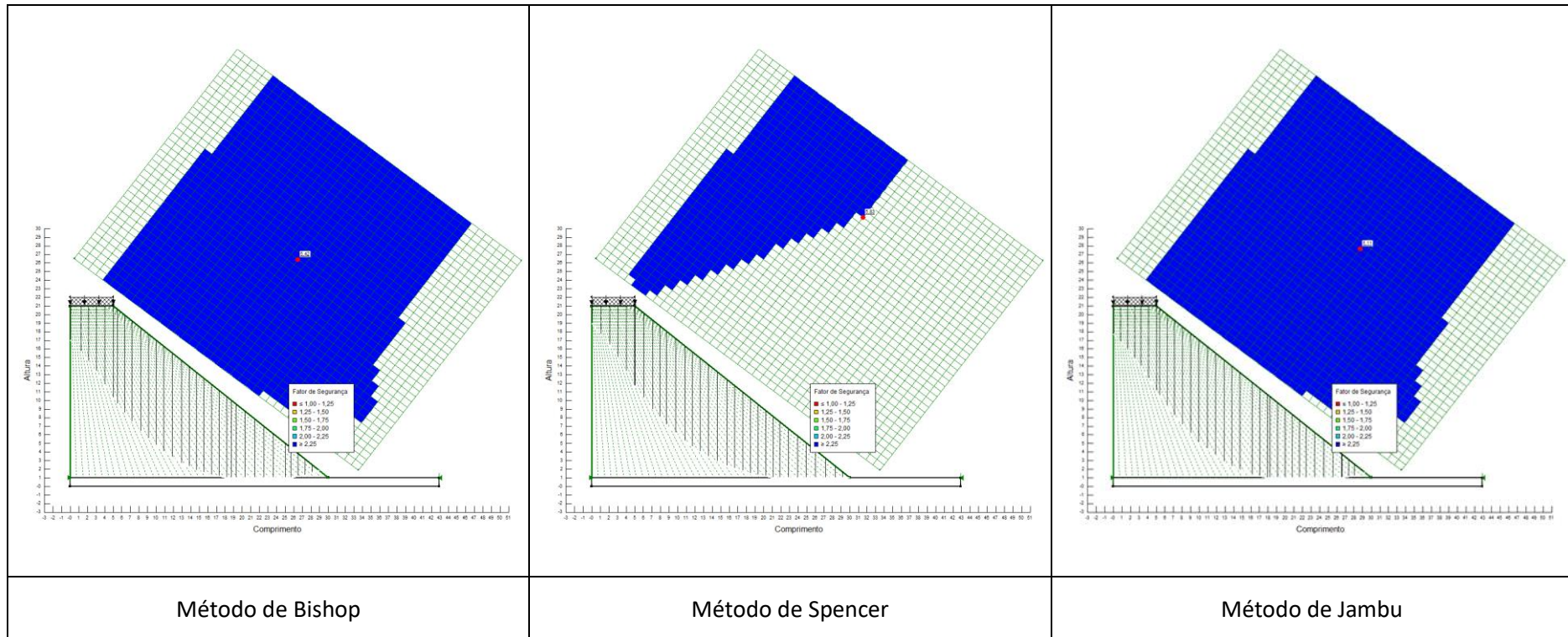
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

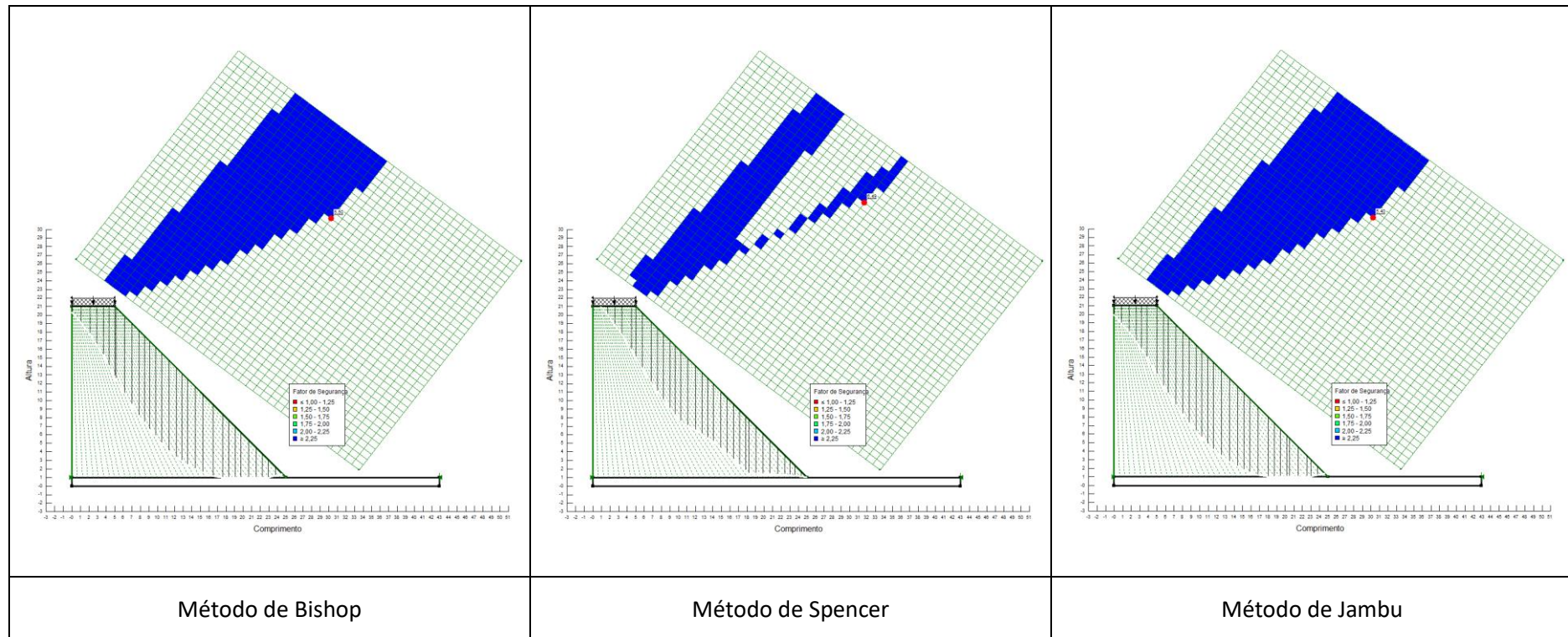
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

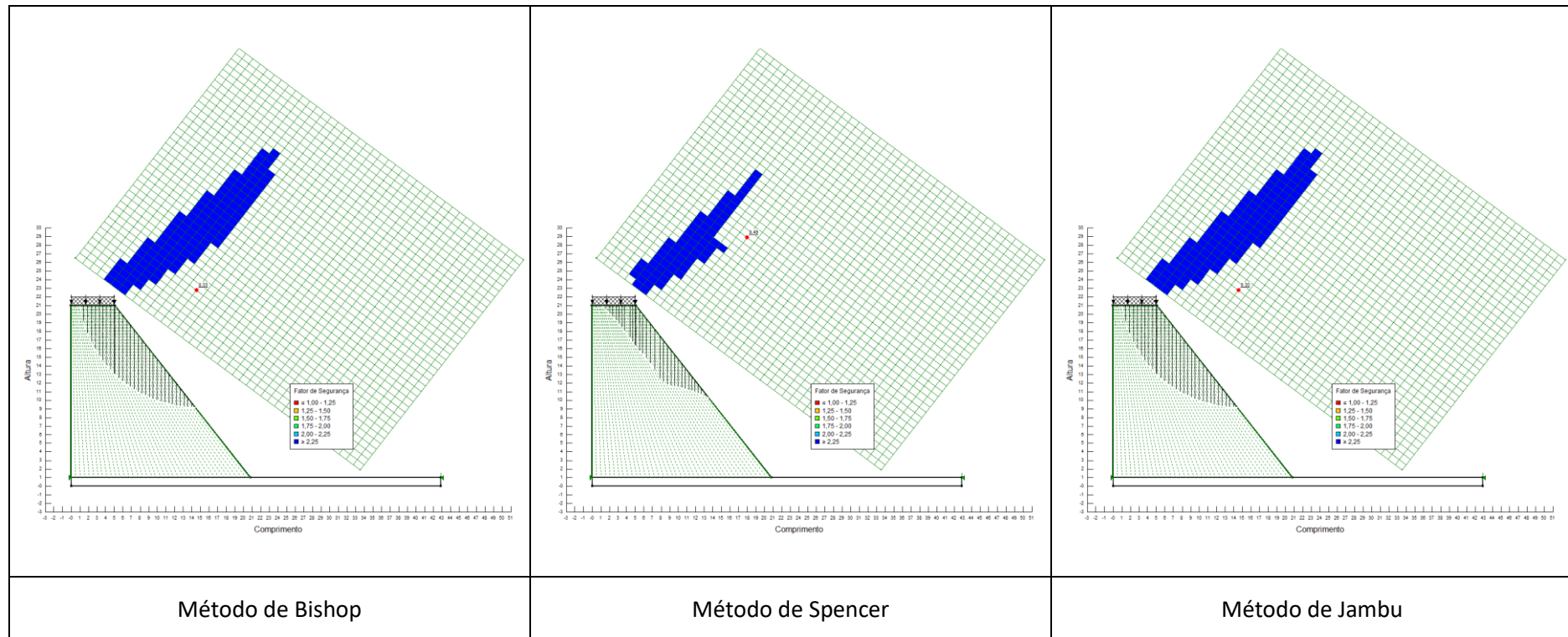
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

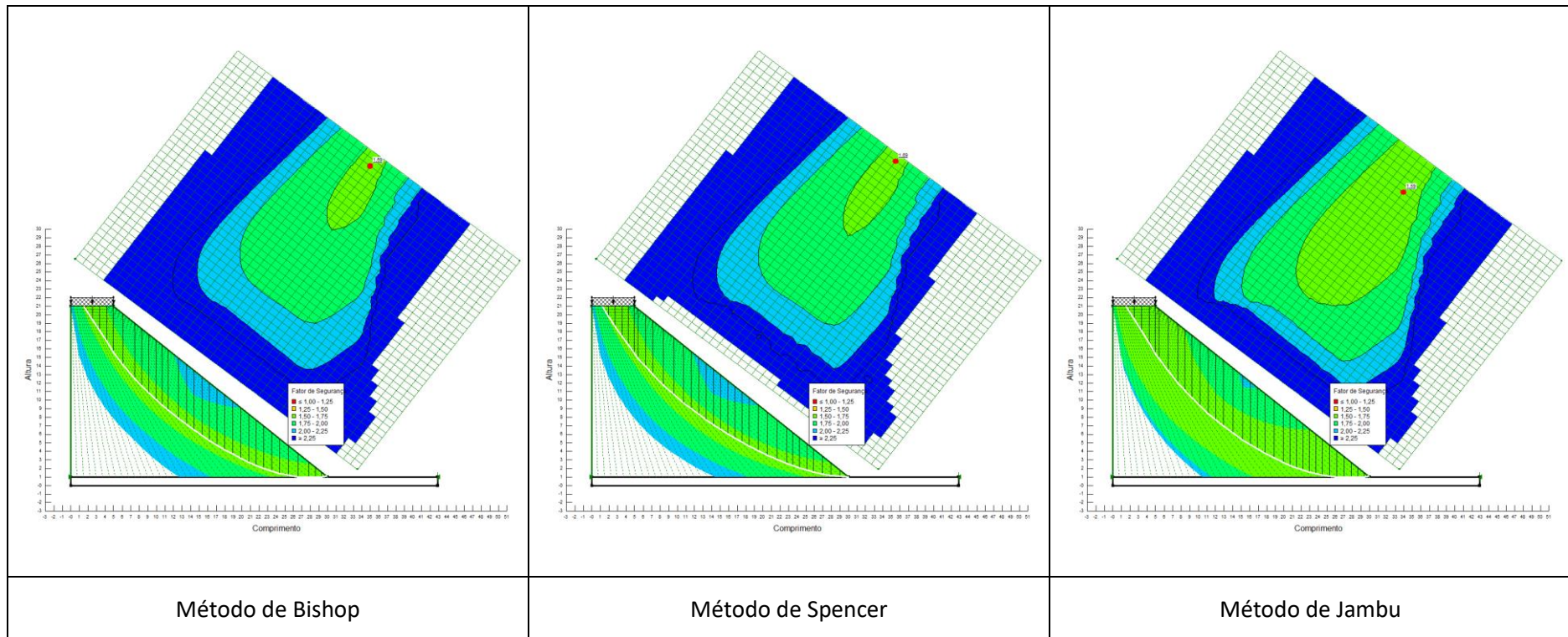
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

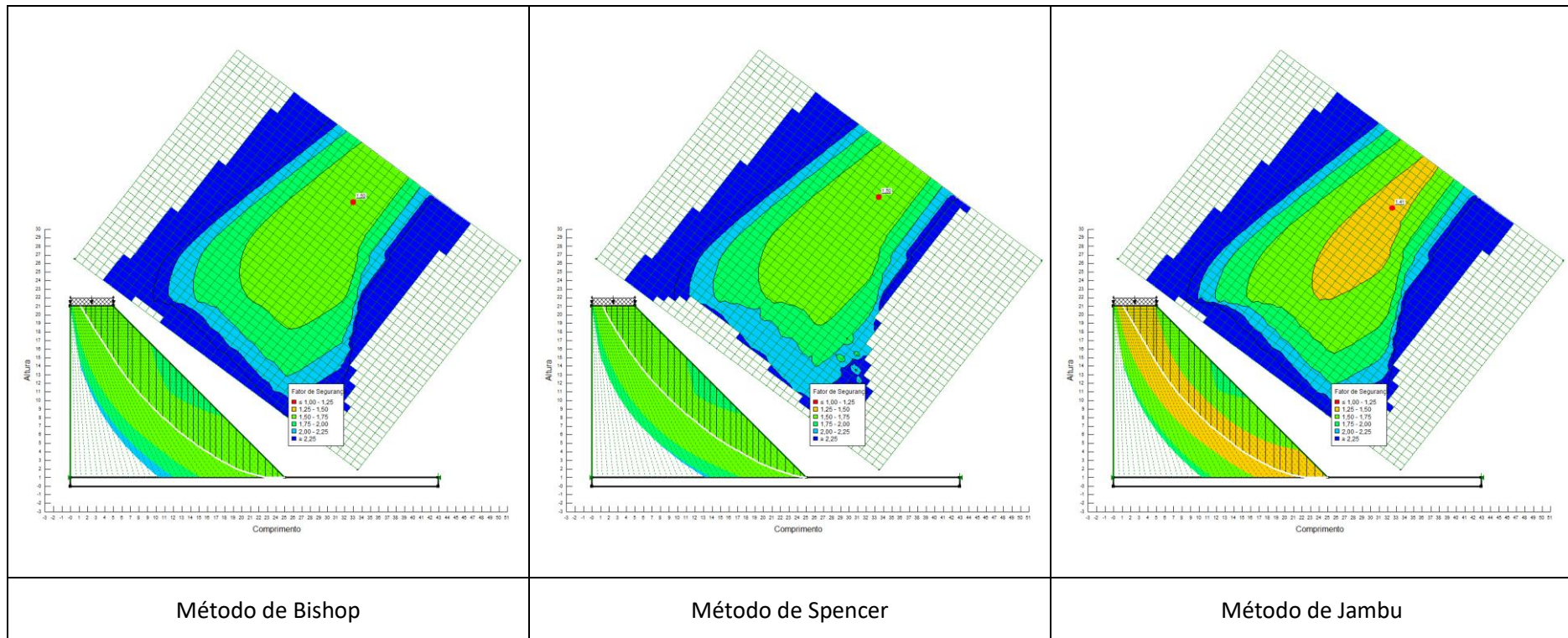
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

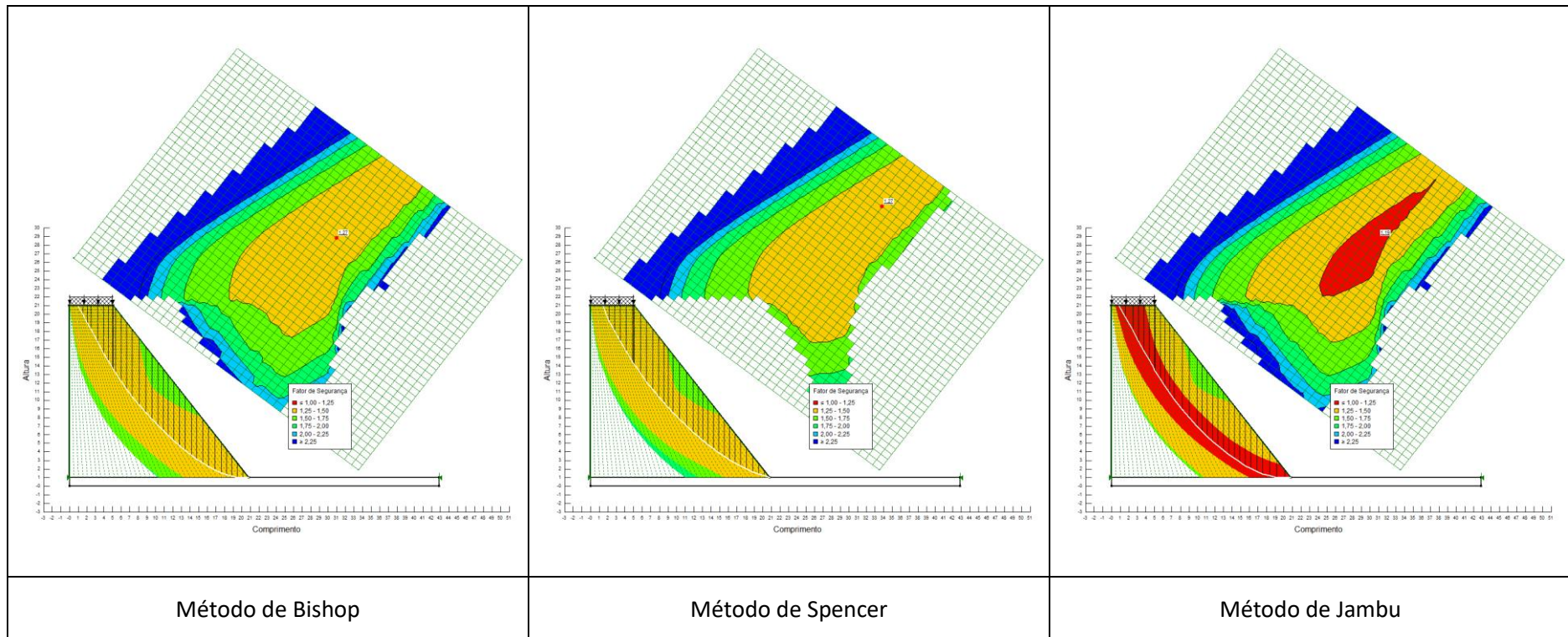
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

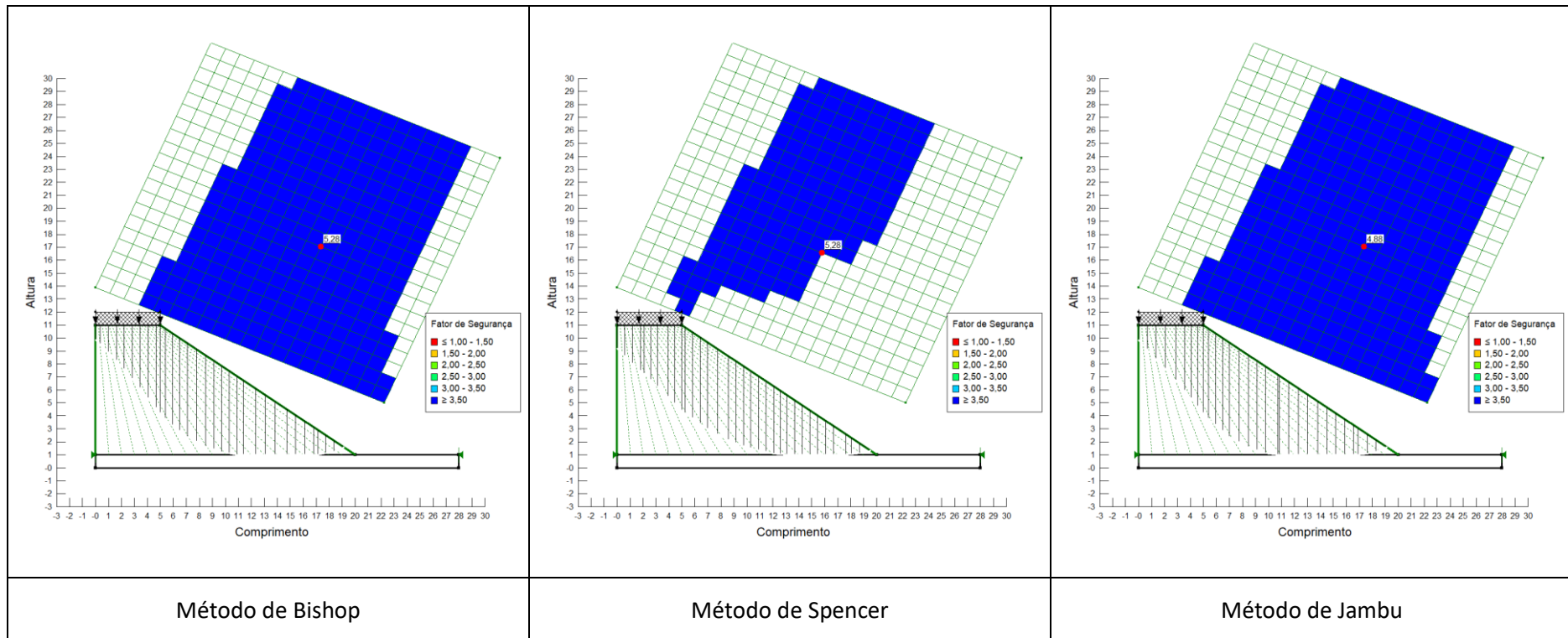
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

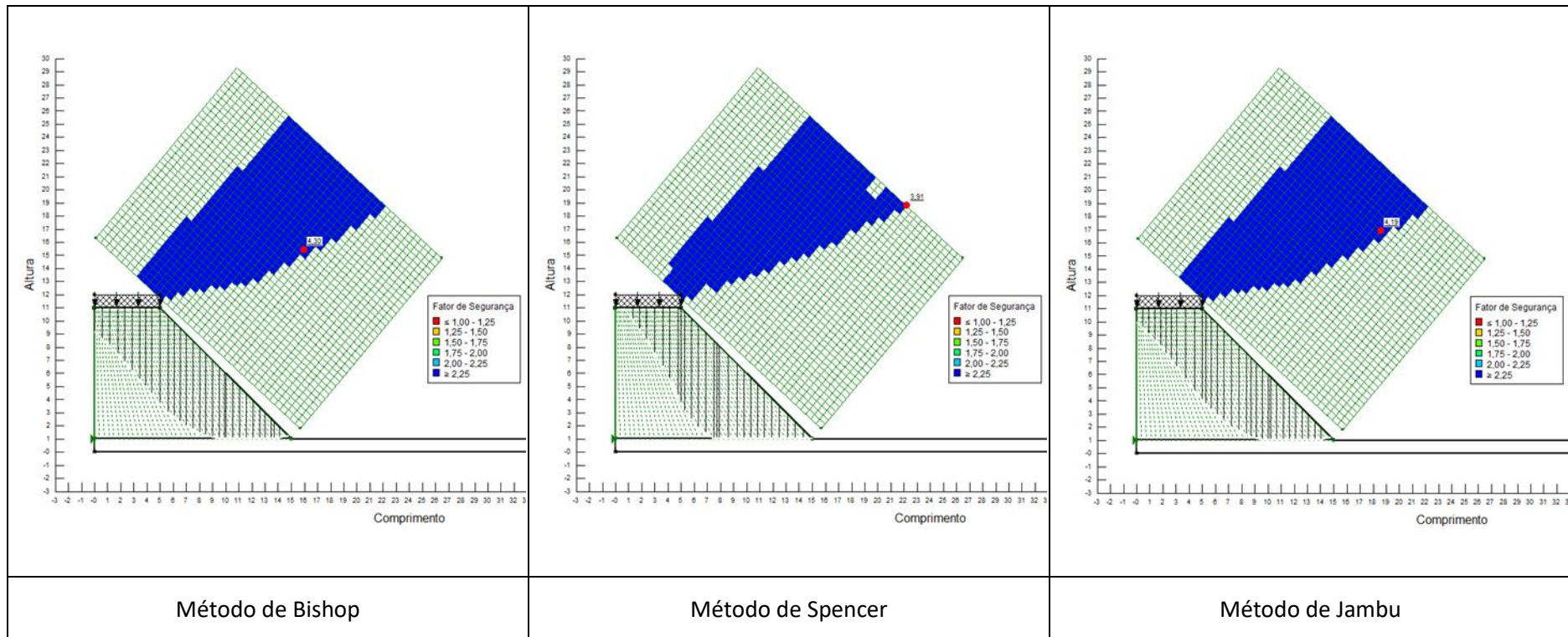
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

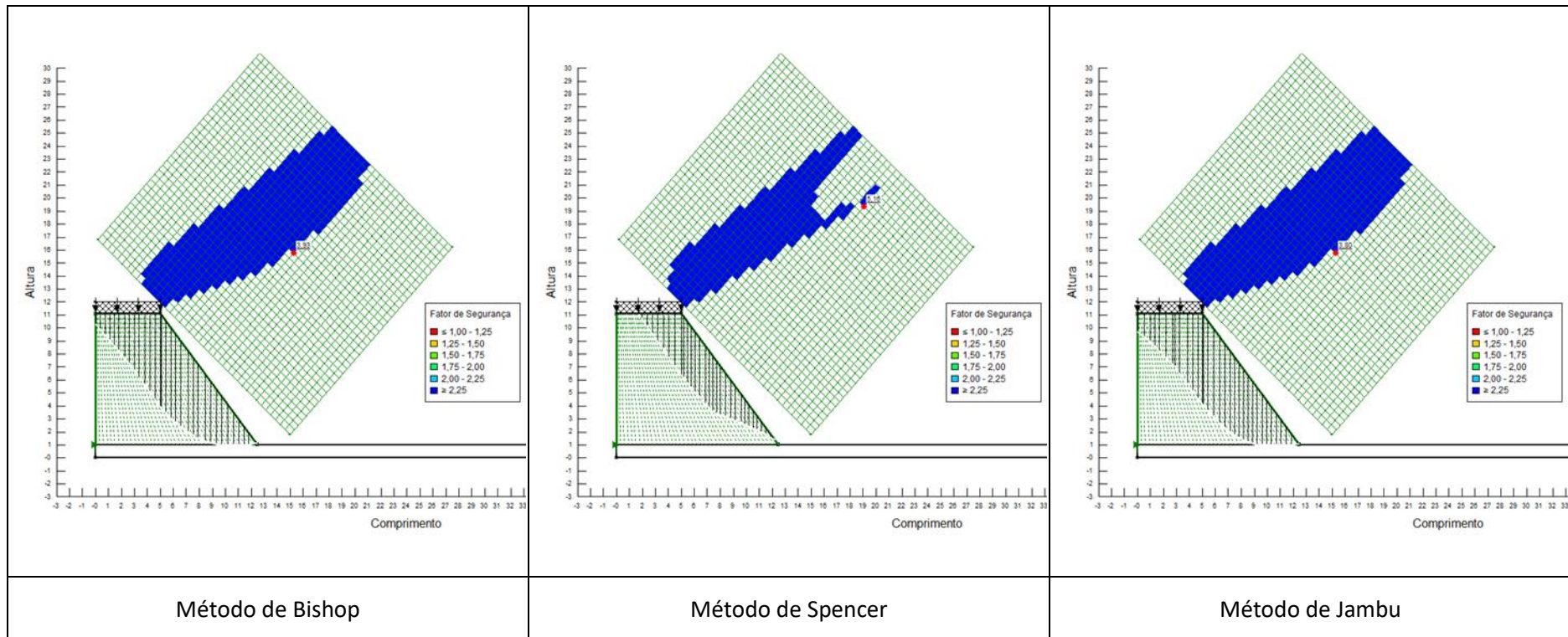
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

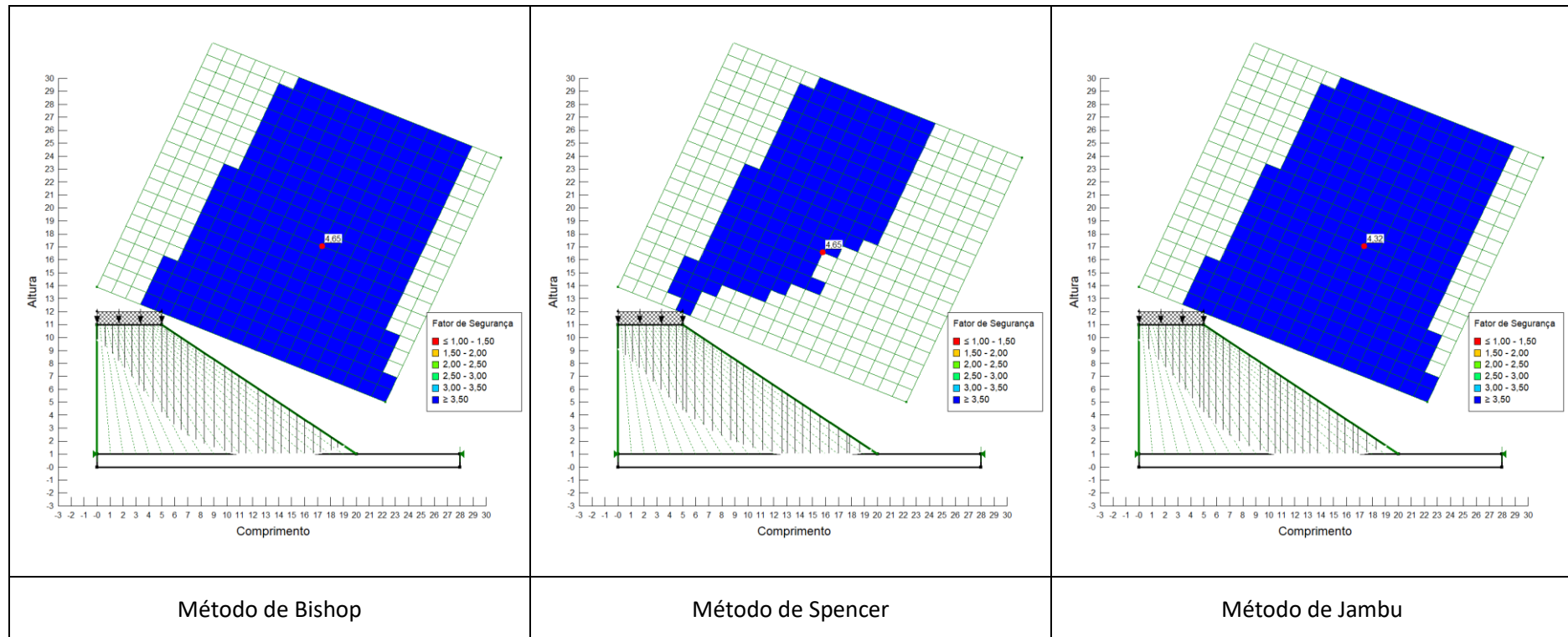
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

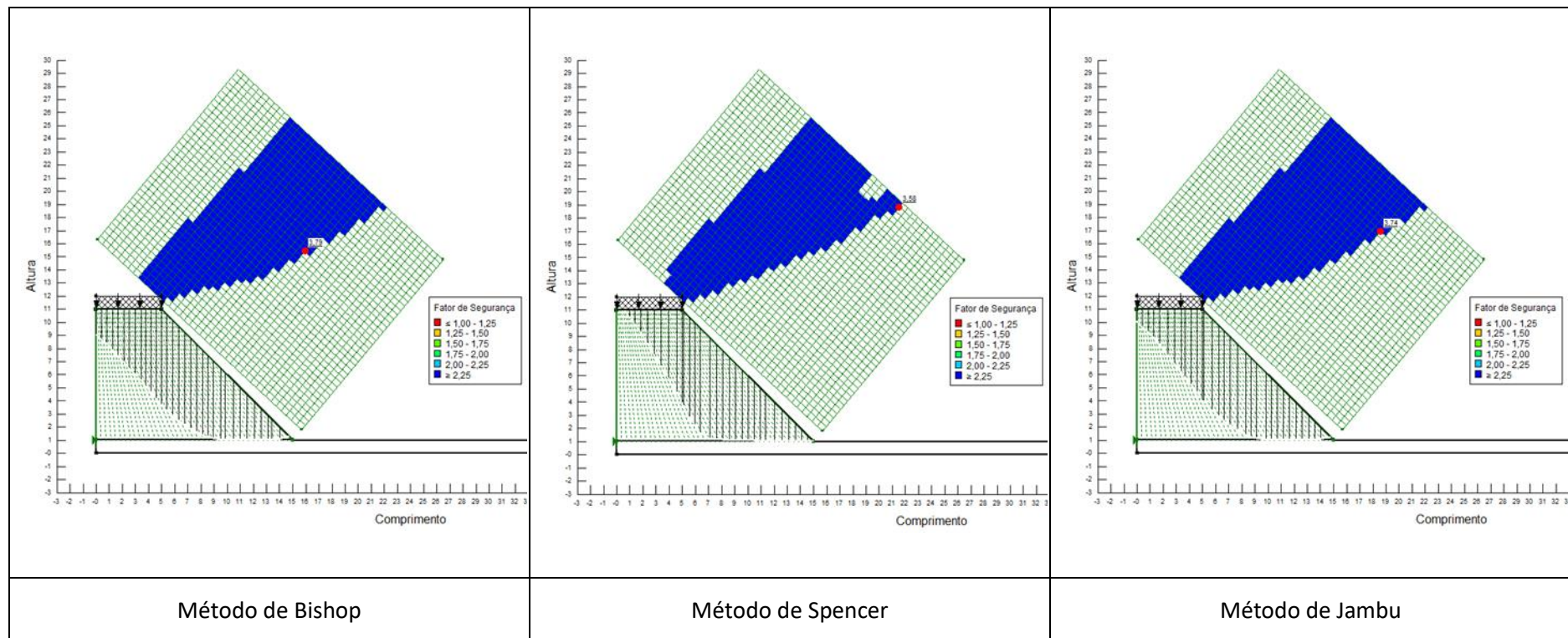
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

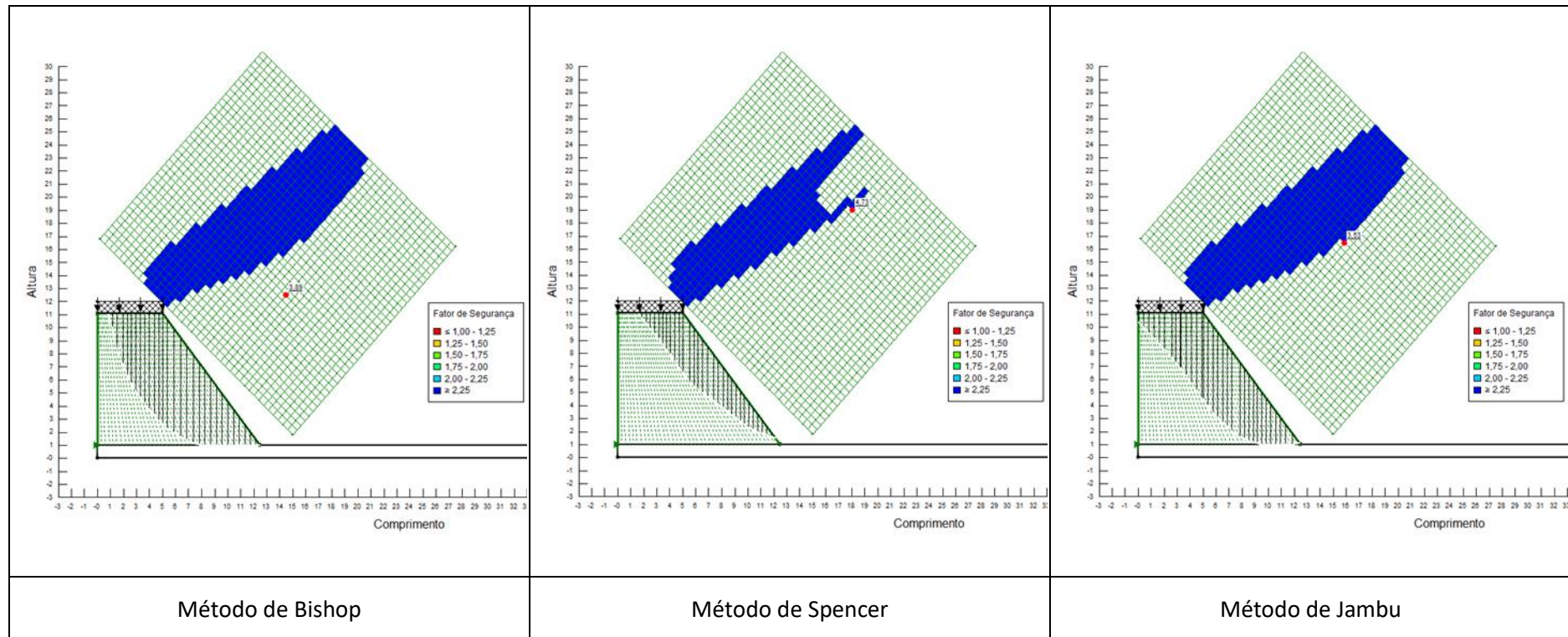
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

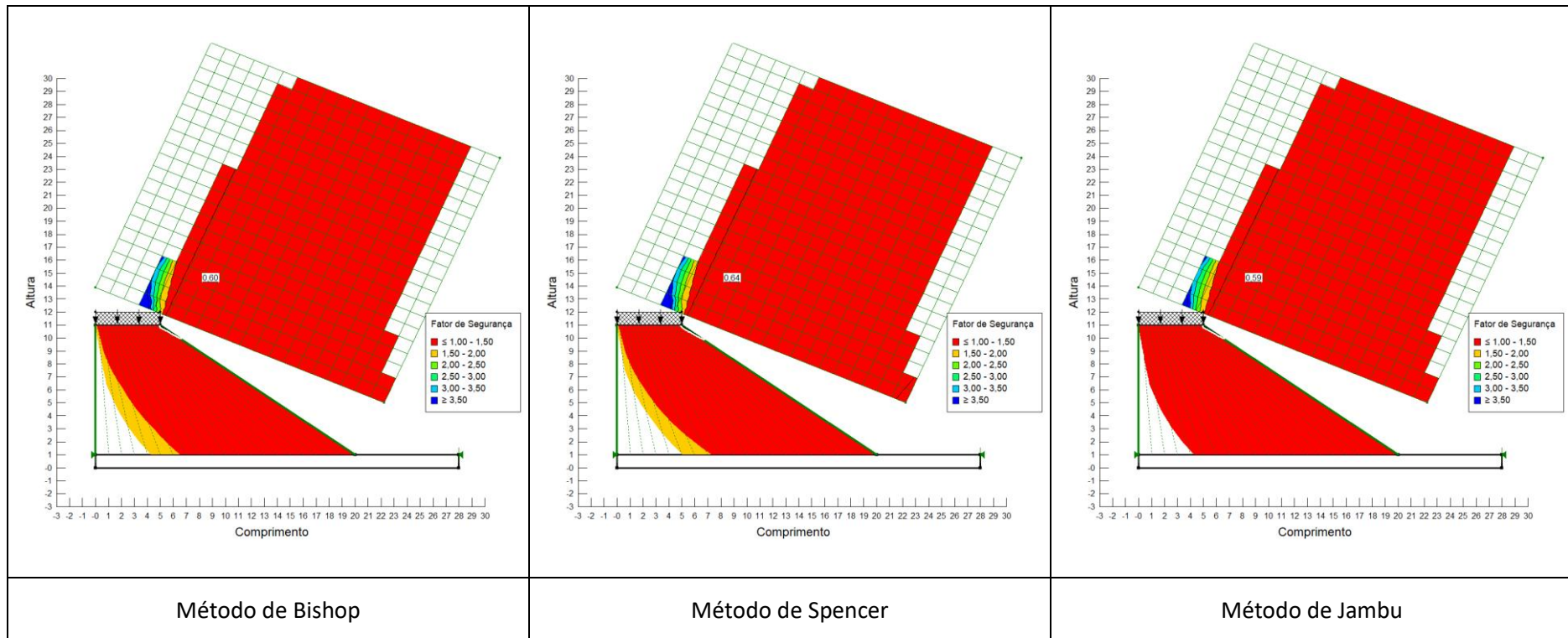
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

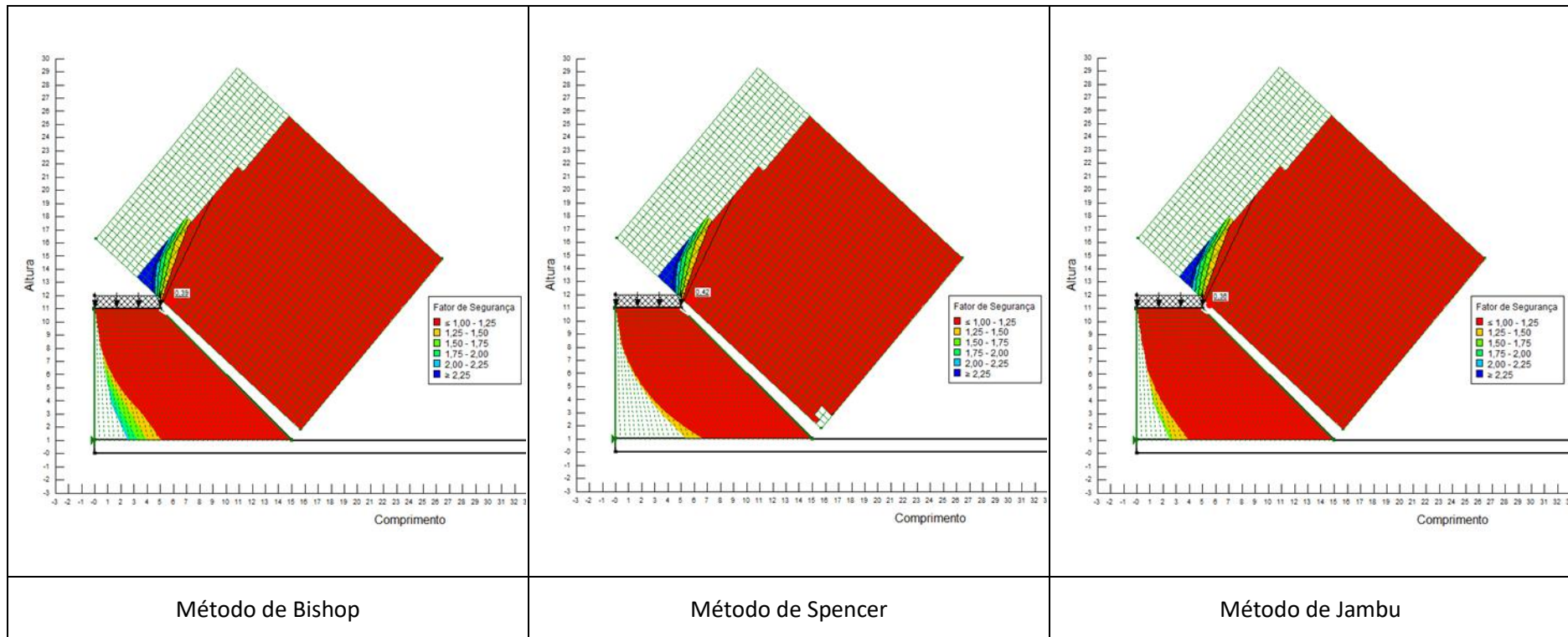
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

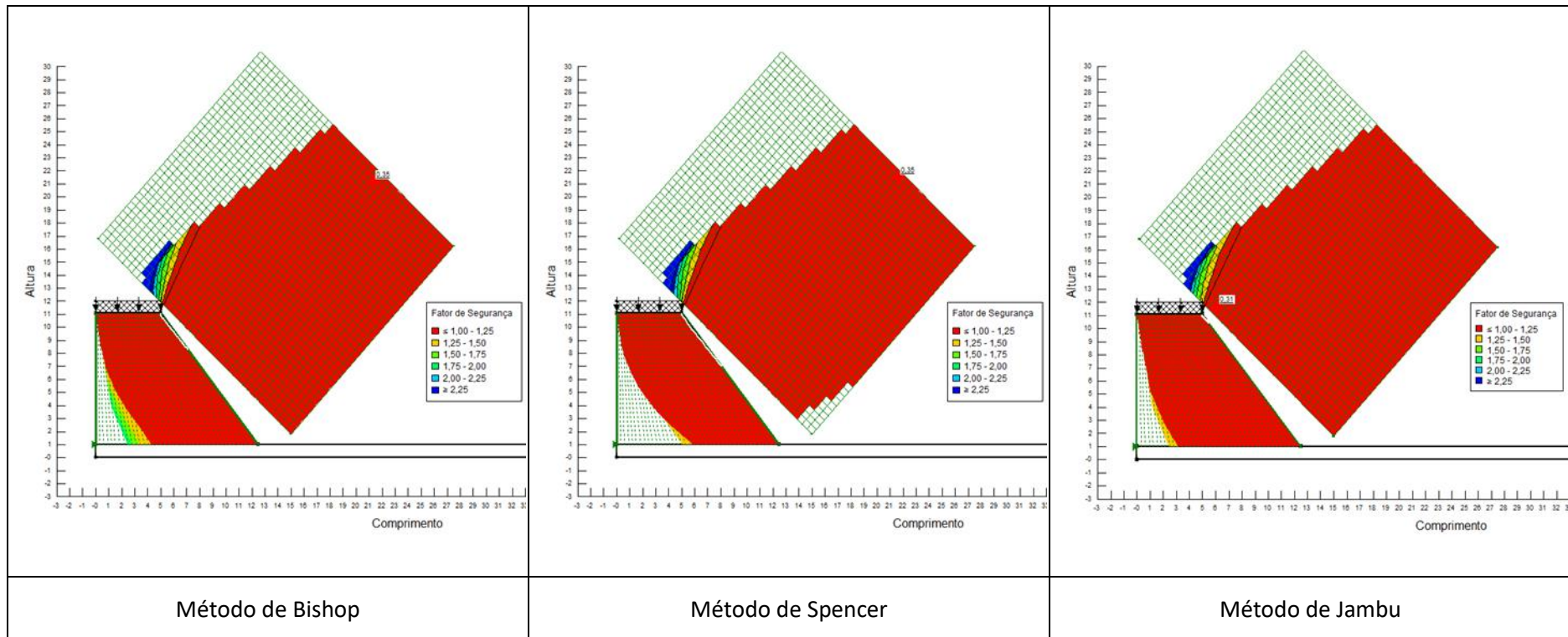
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

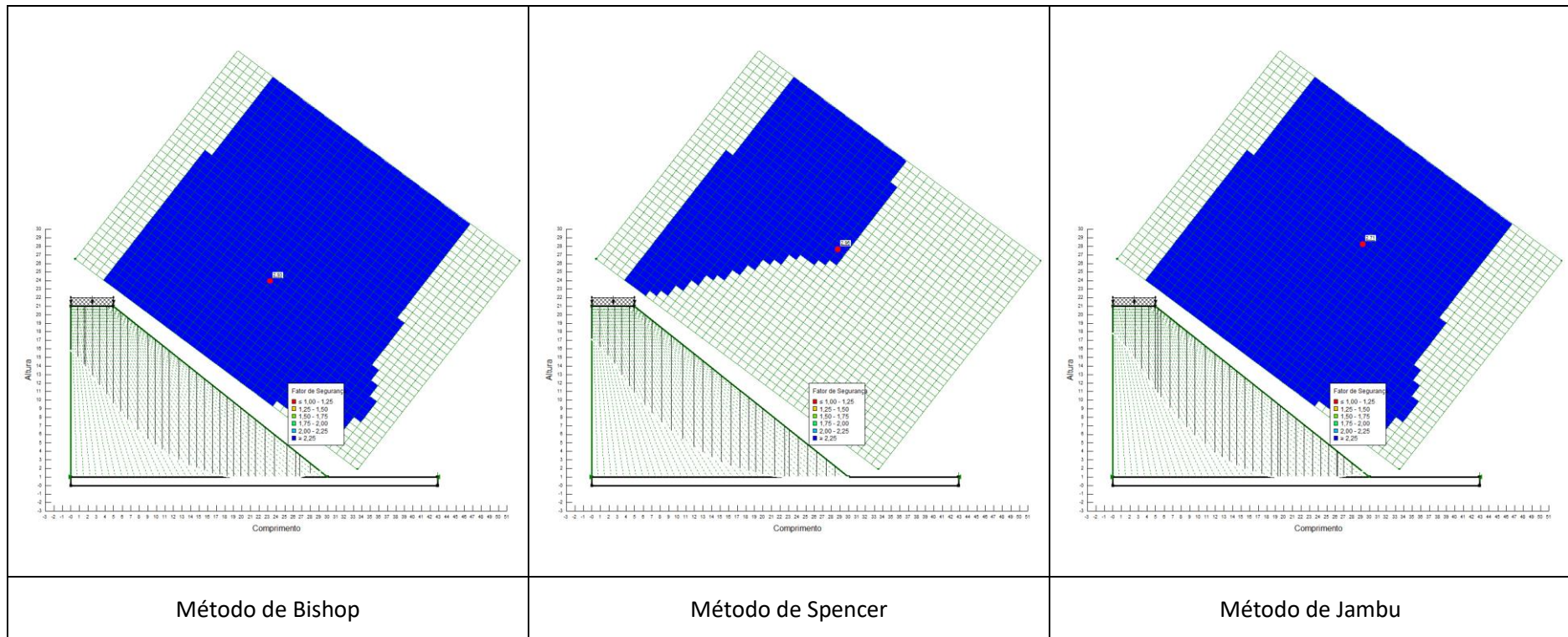
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

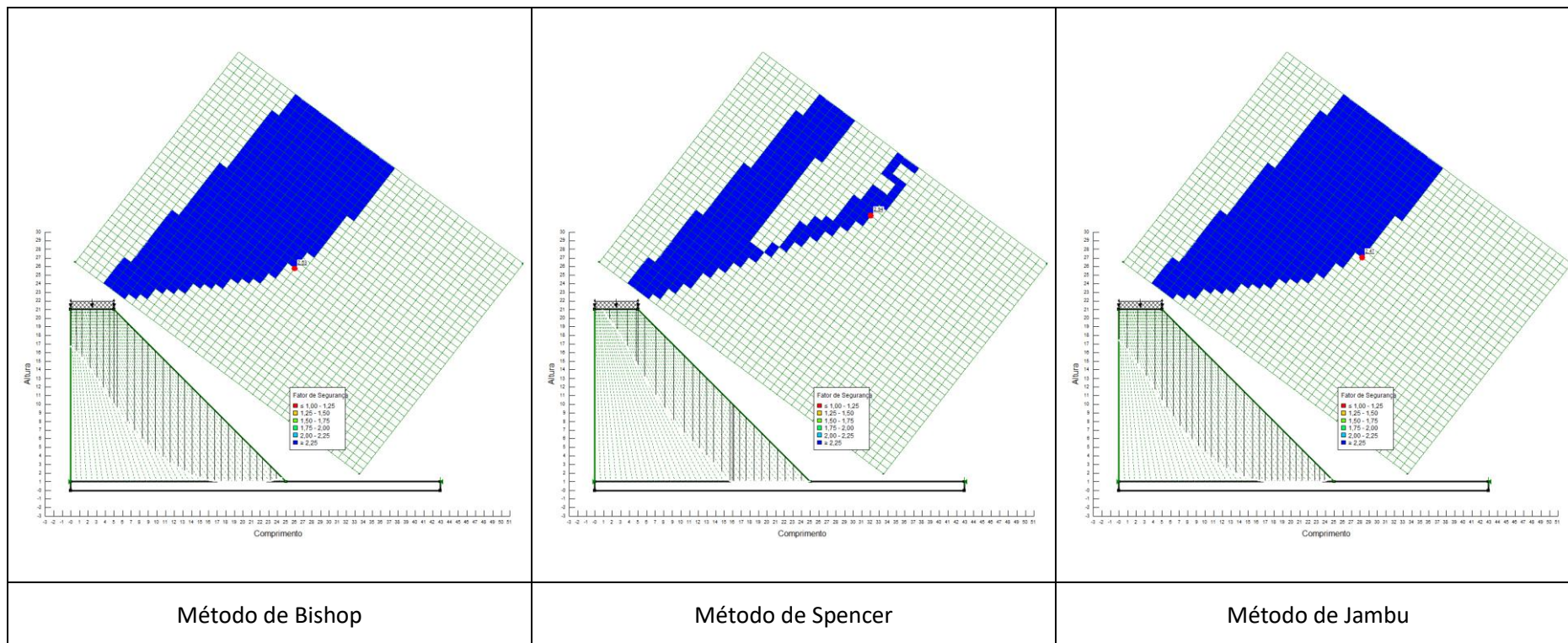
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

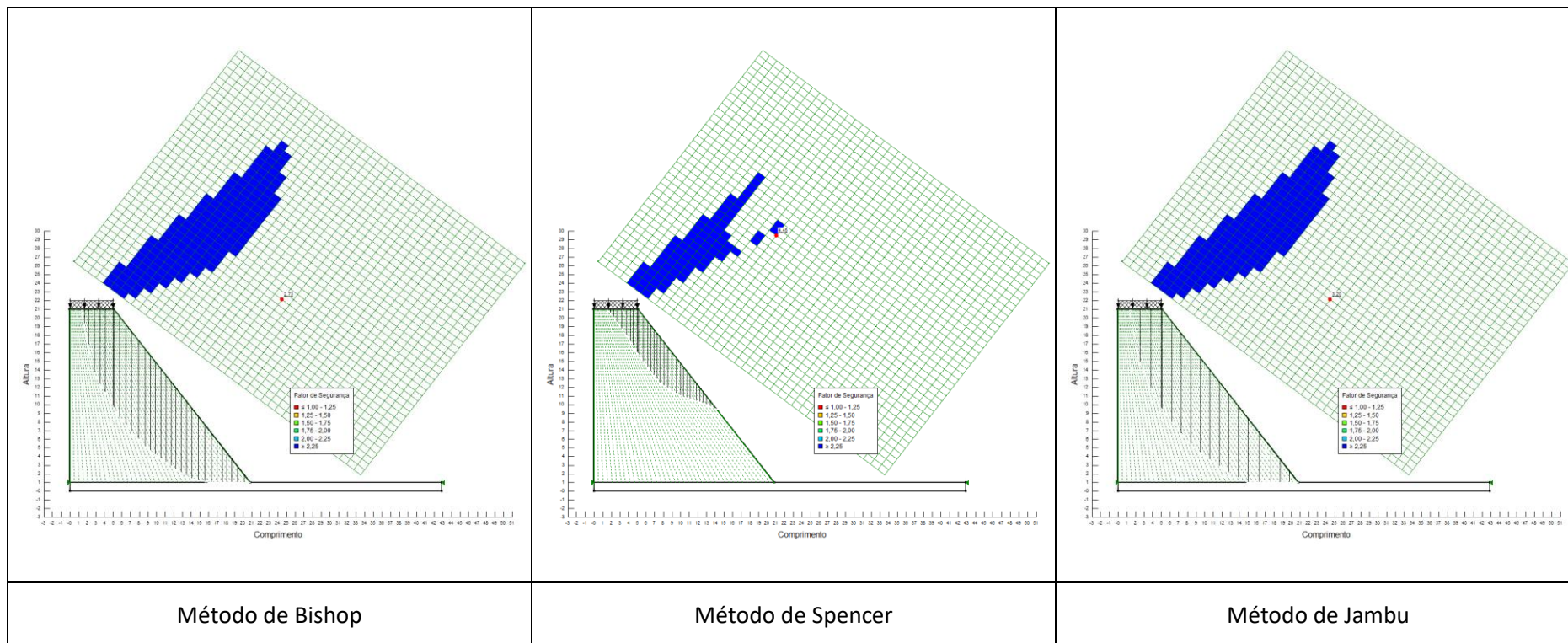
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

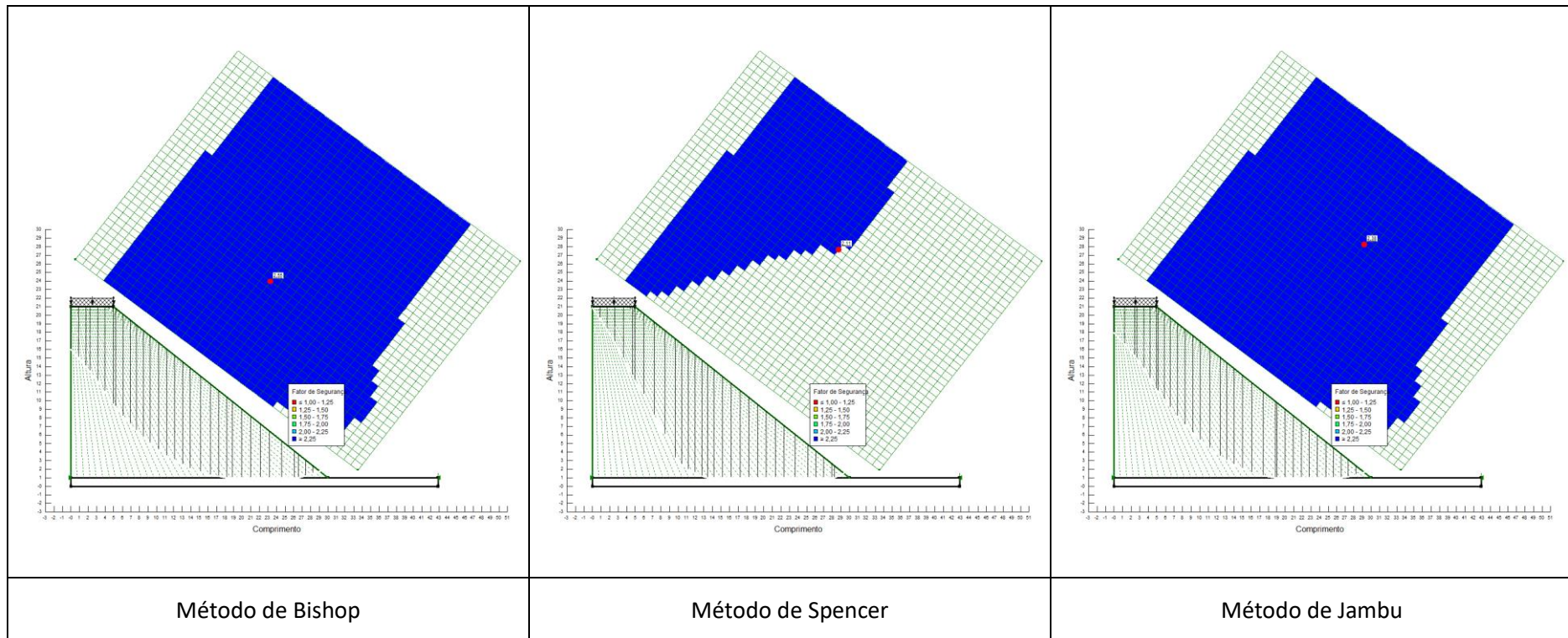
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

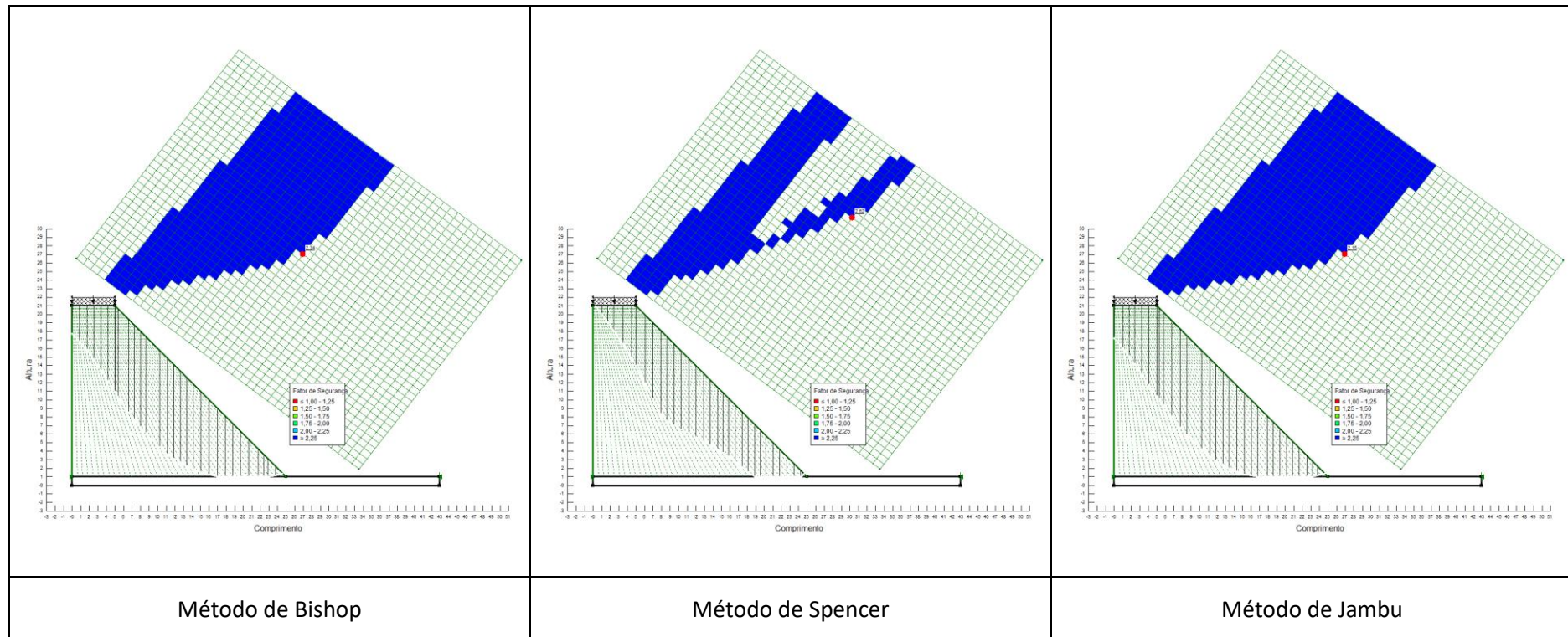
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

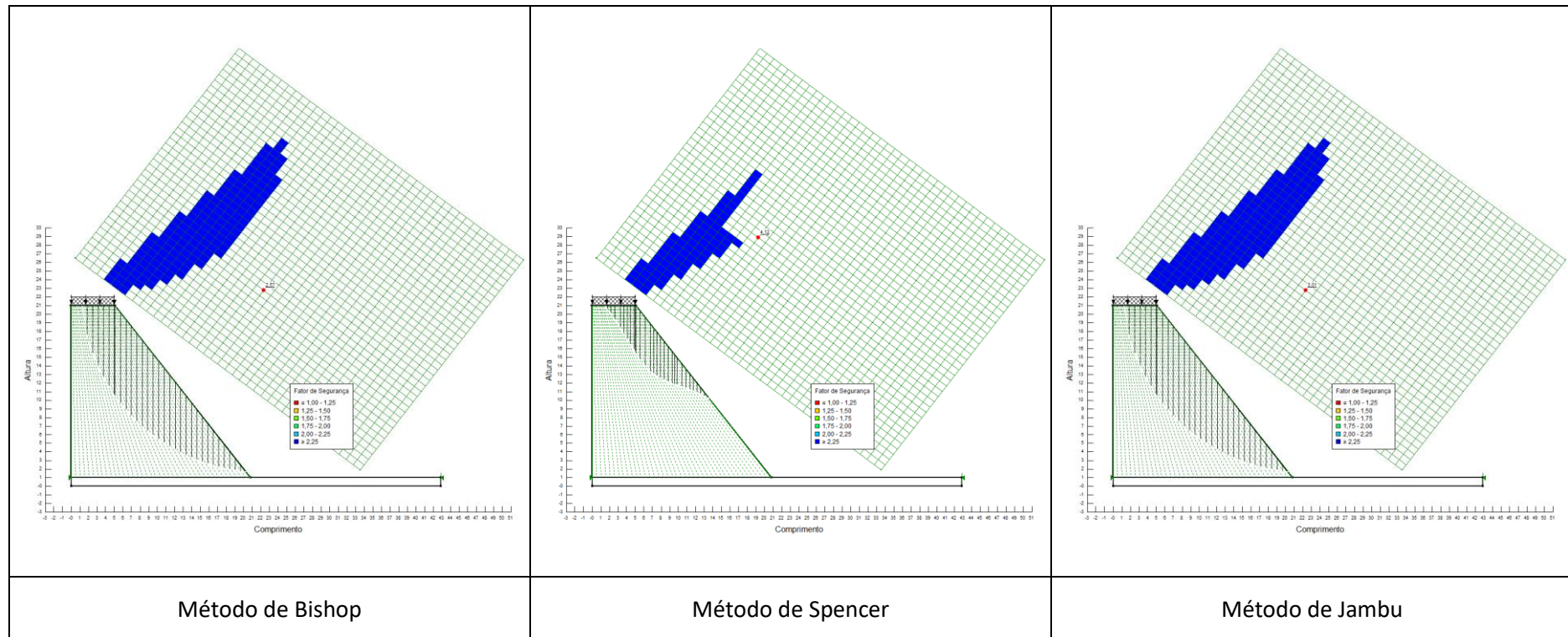
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

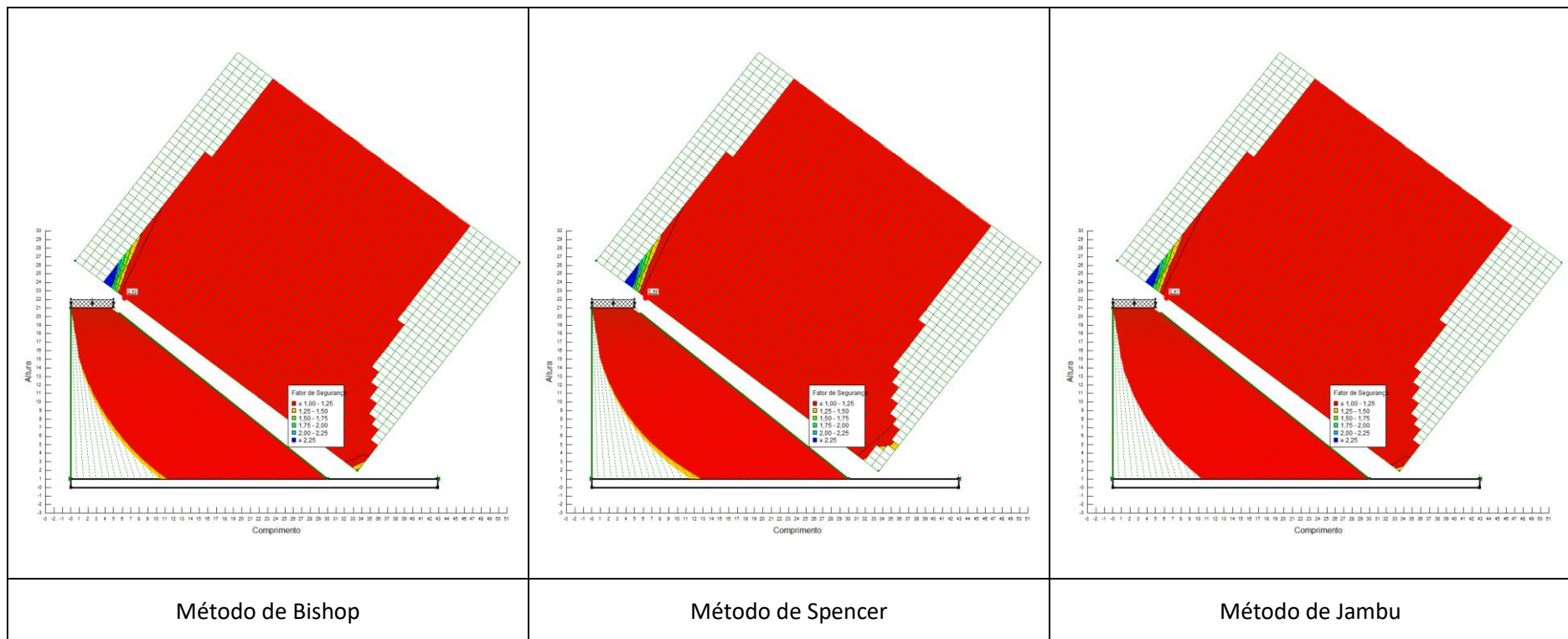
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

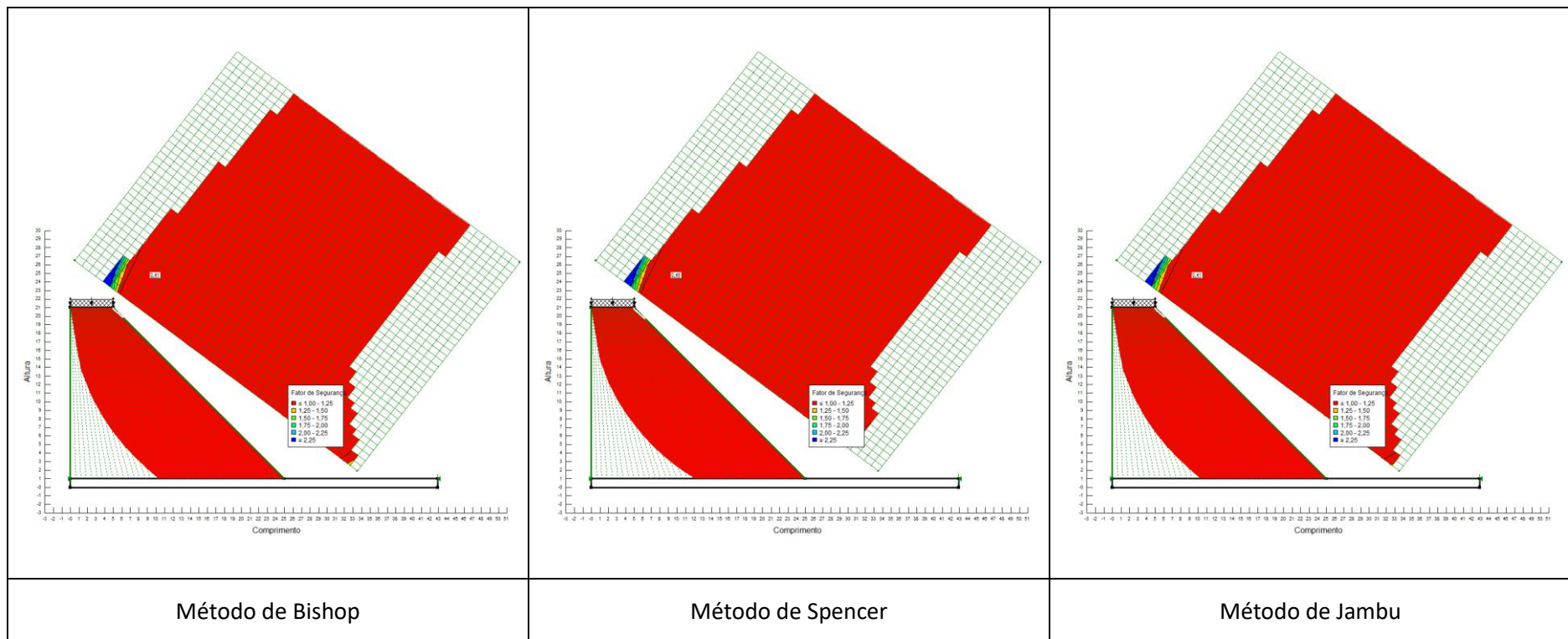
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

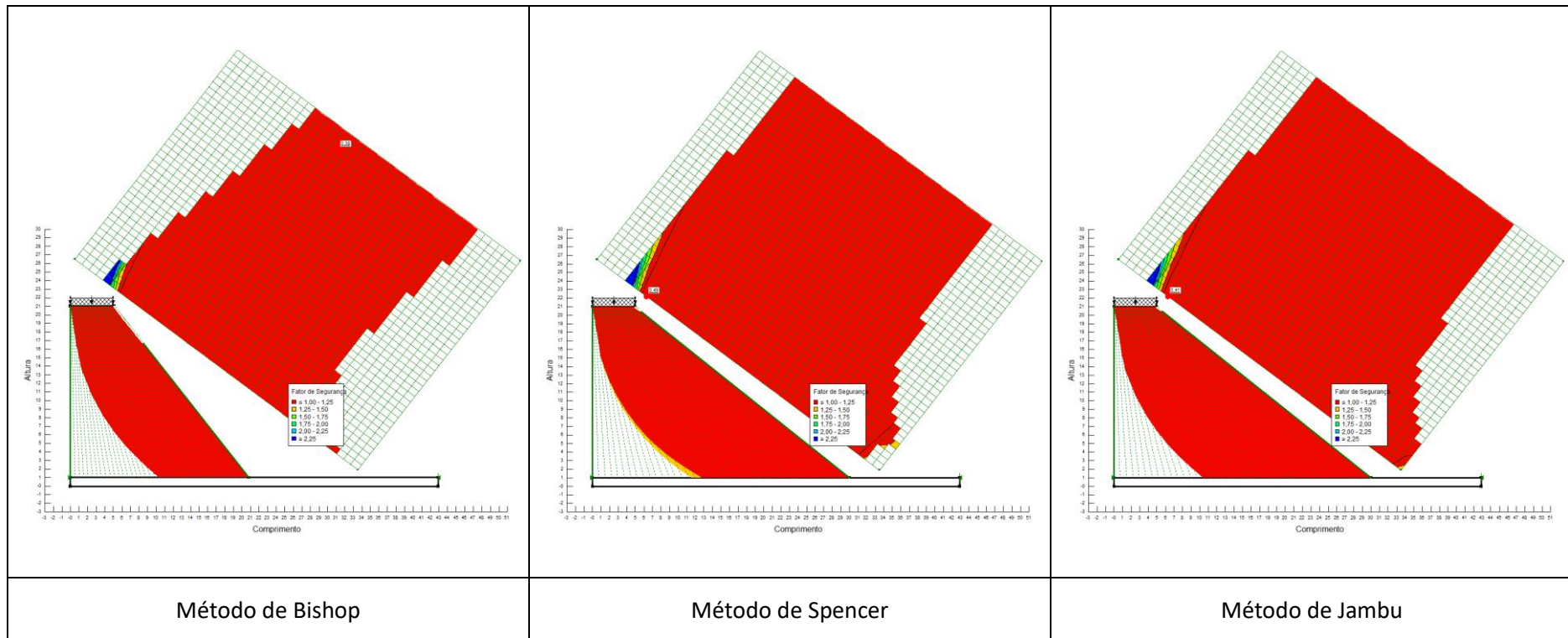
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z4 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75

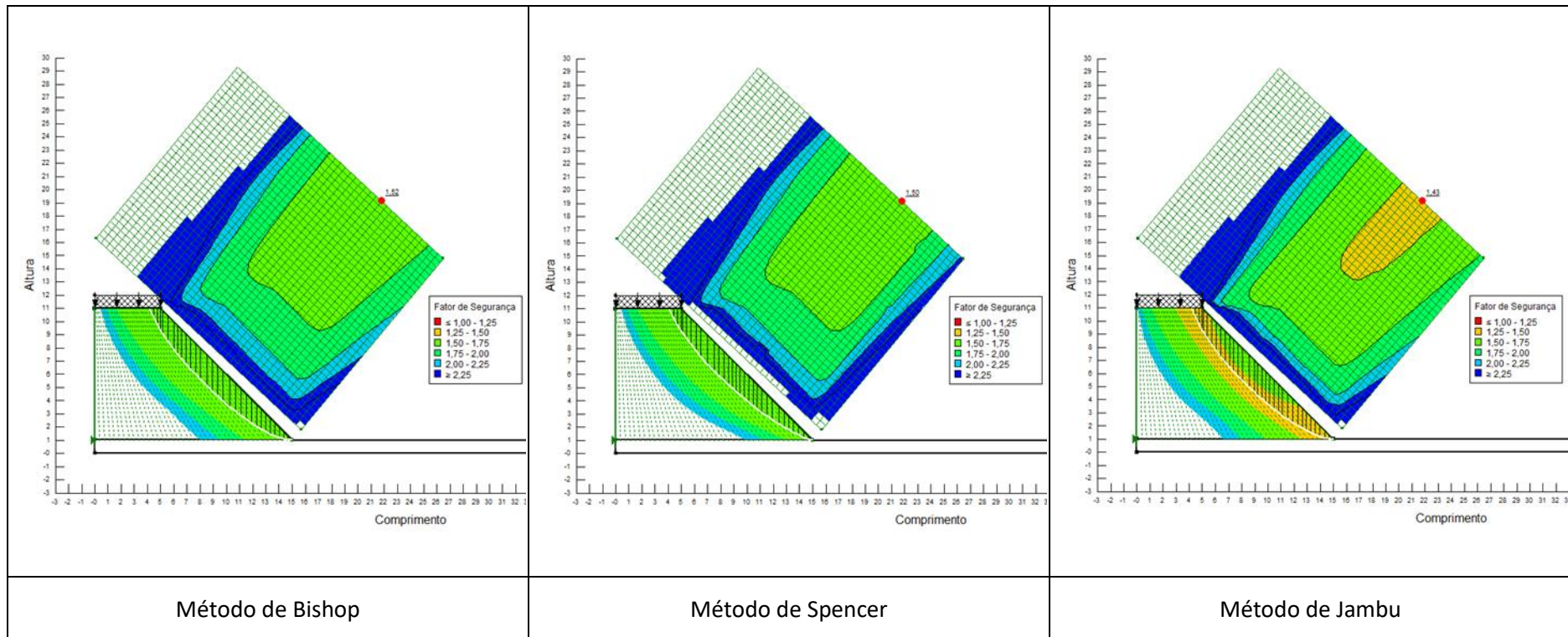


SOLO Z5

SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

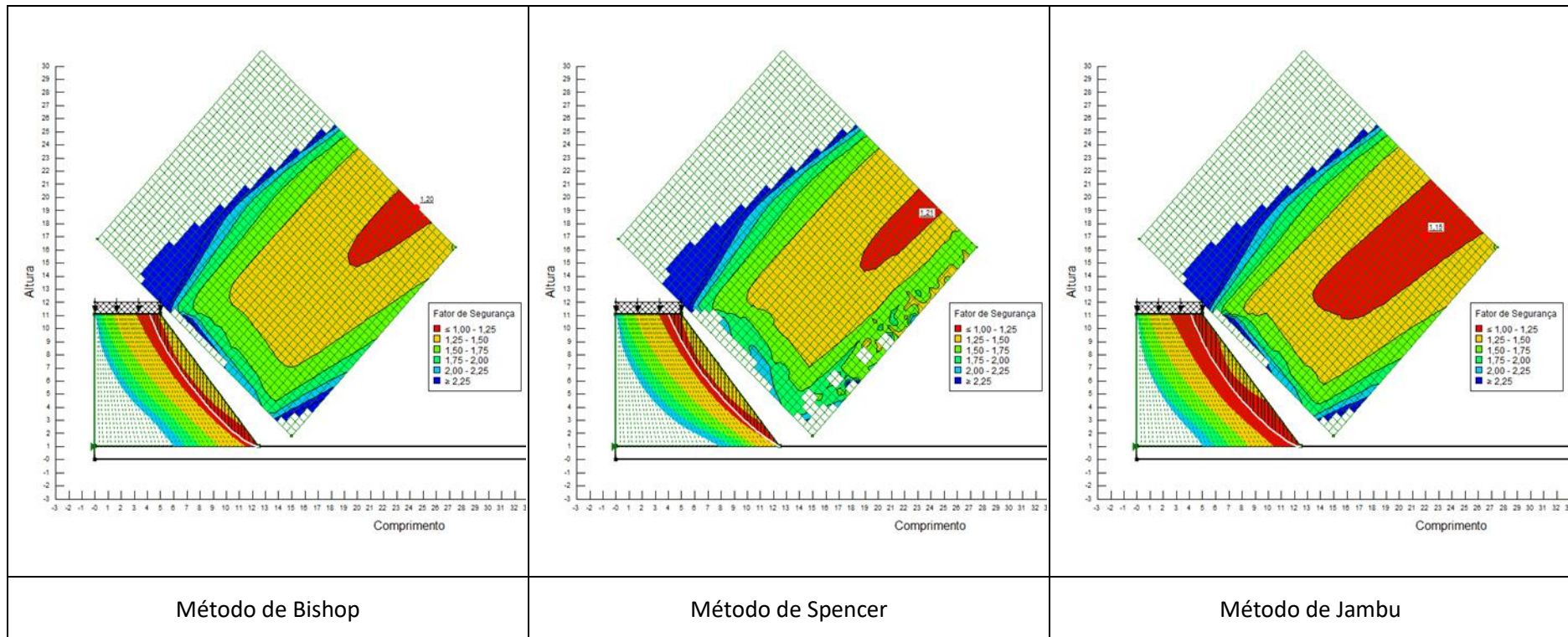
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

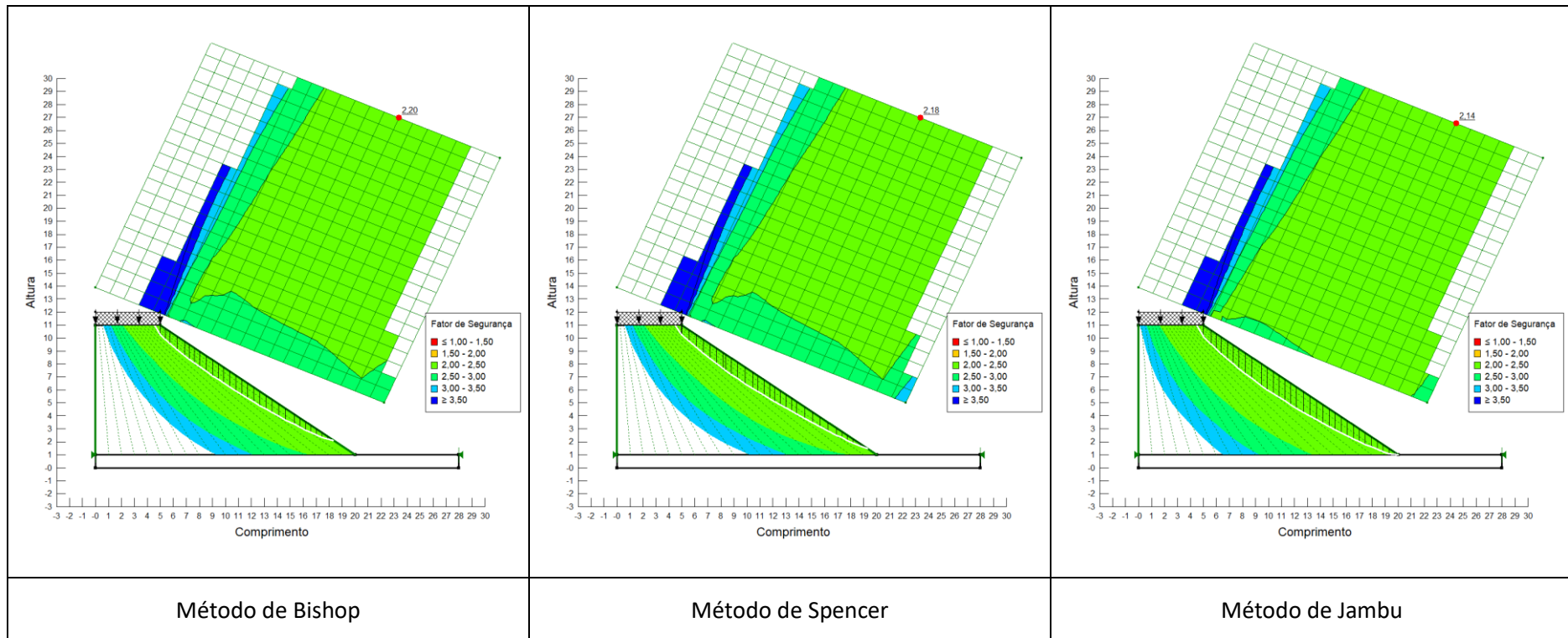
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

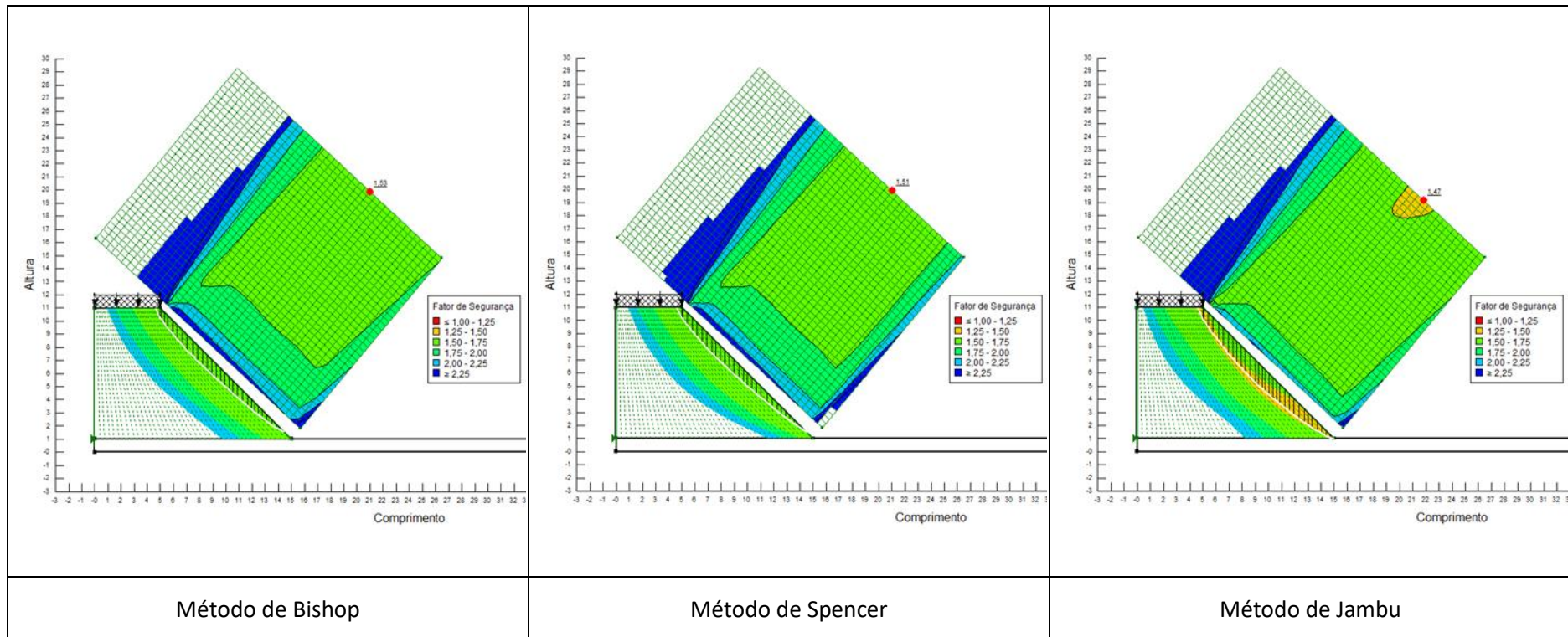
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

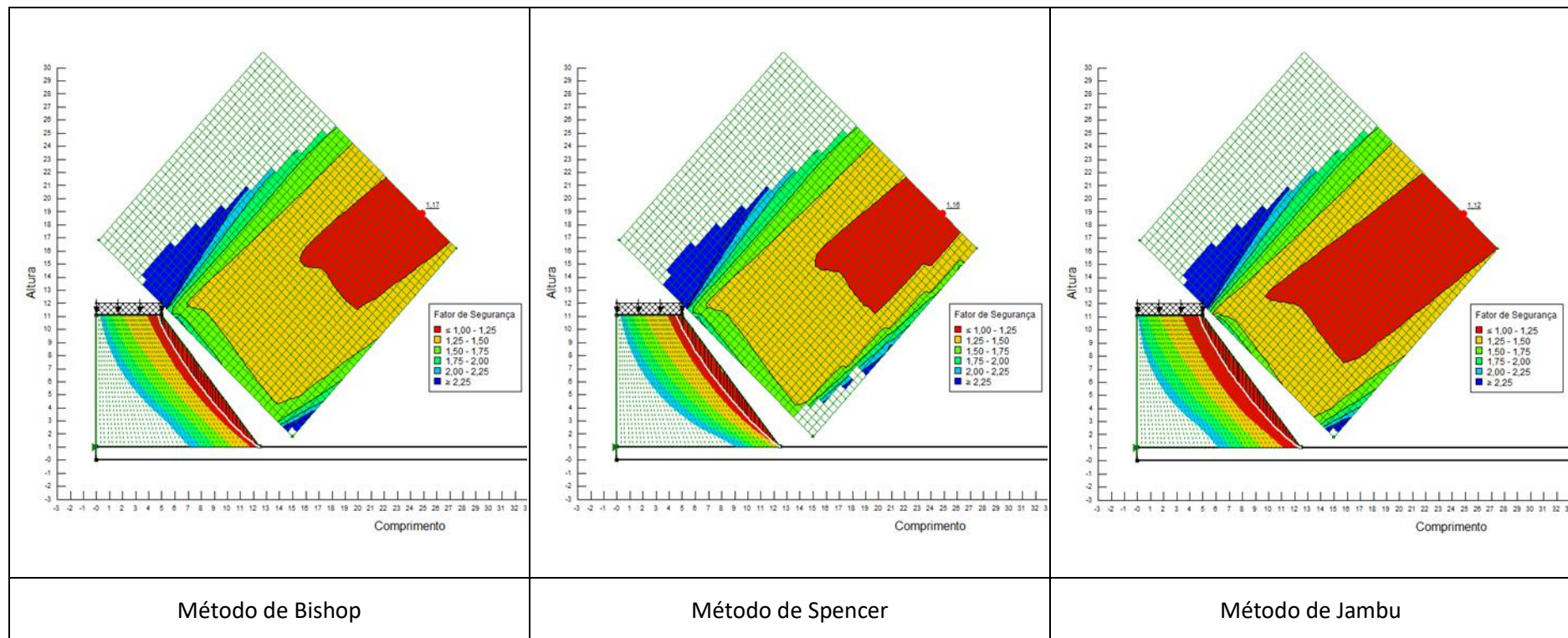
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

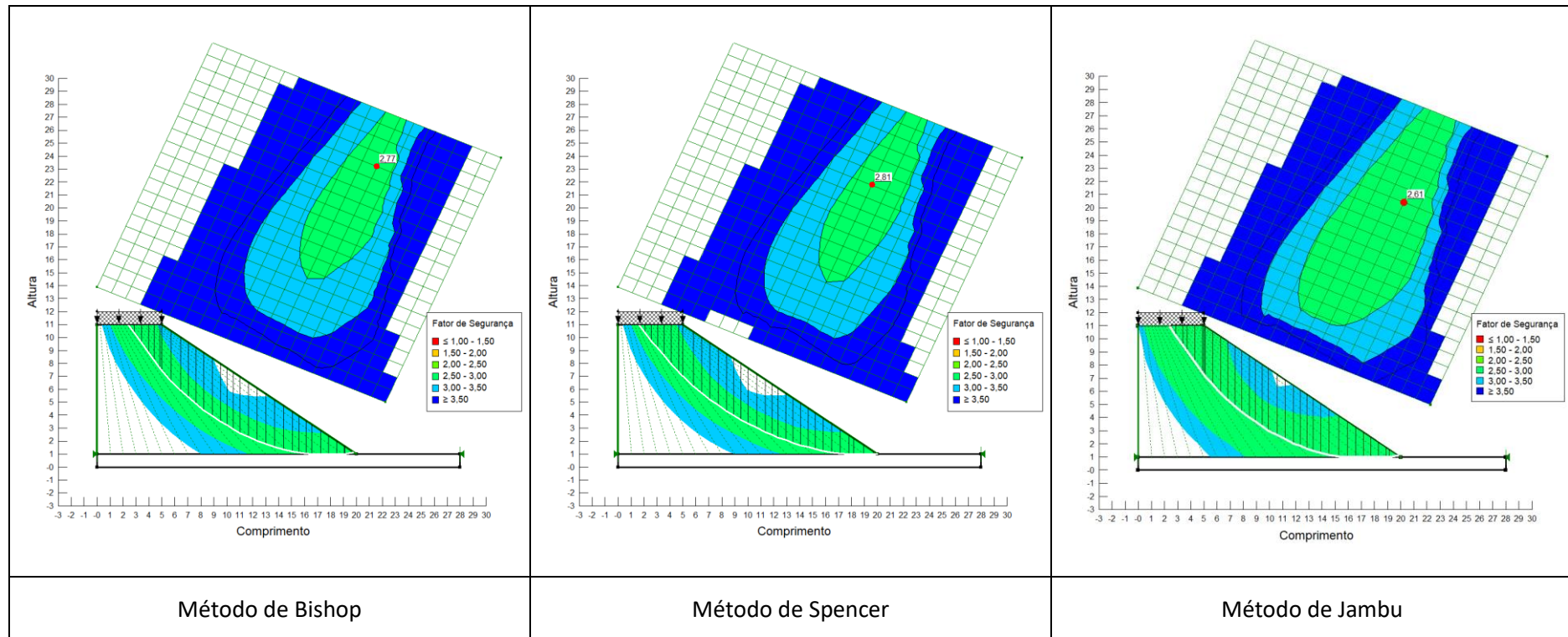
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

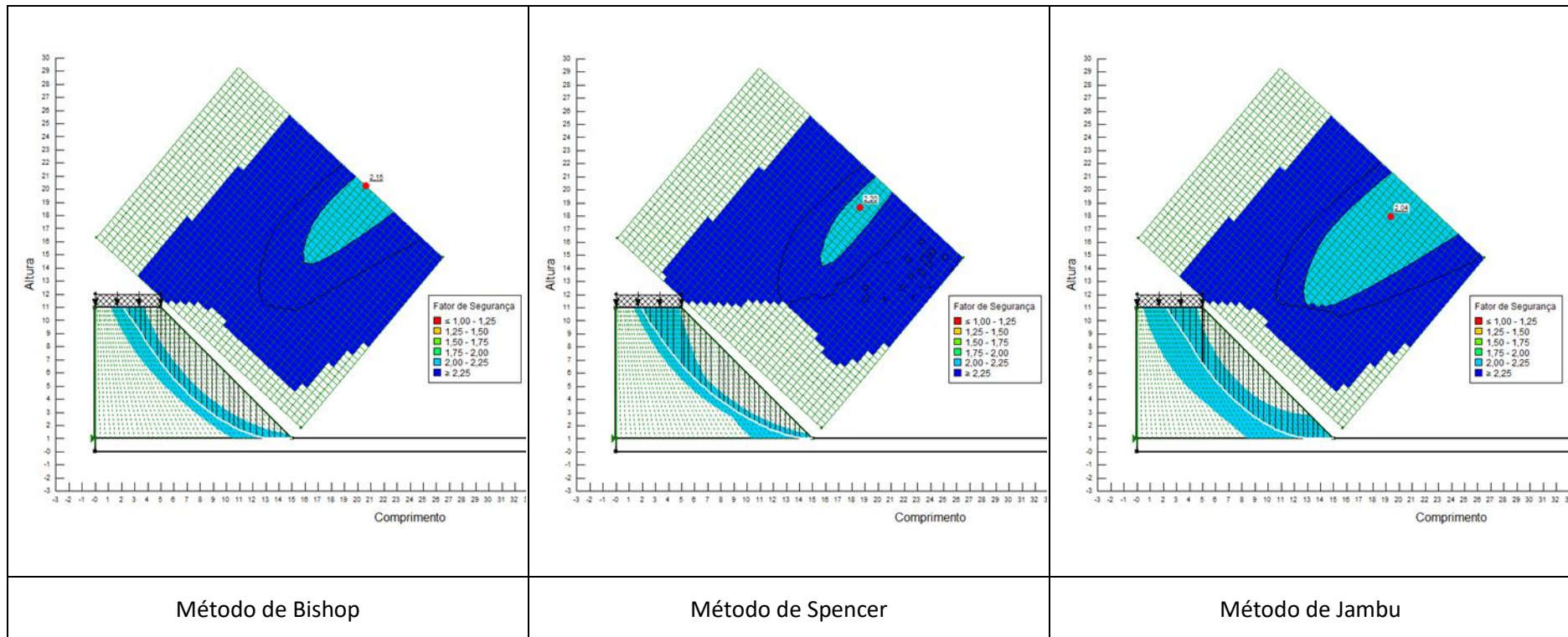
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

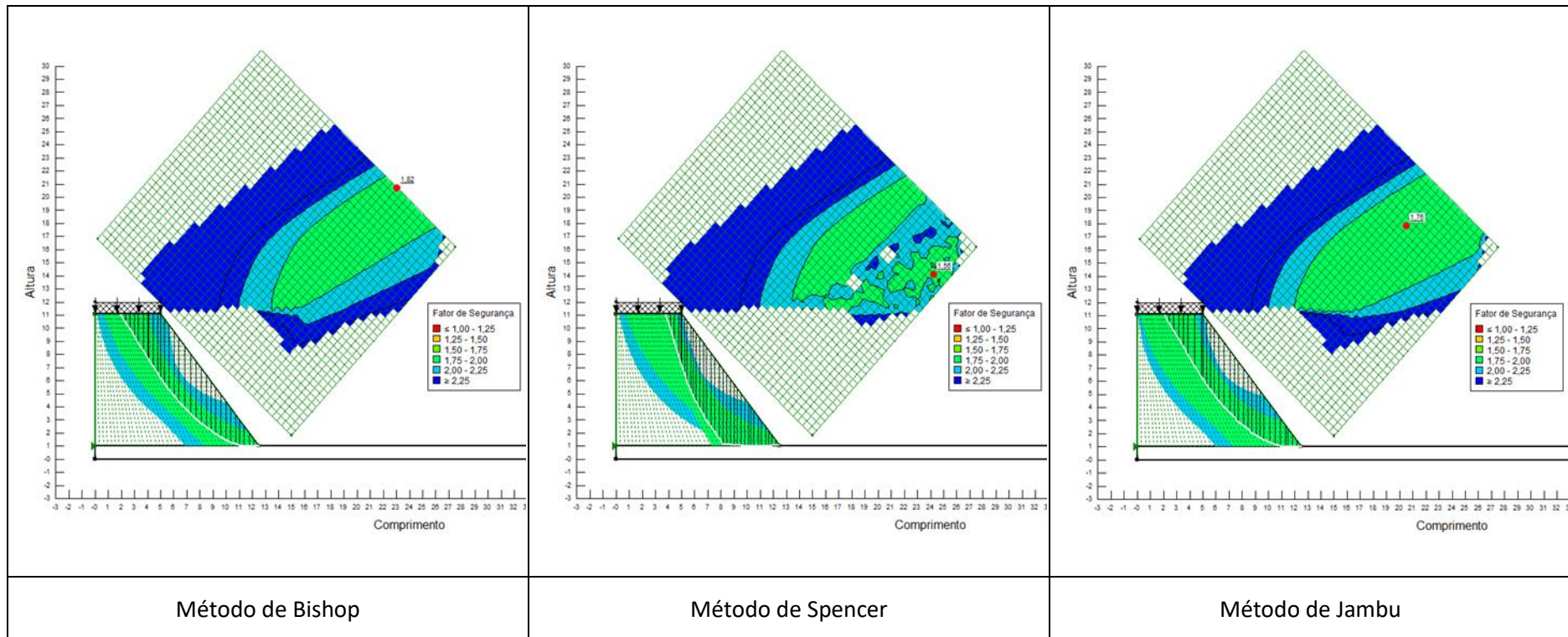
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

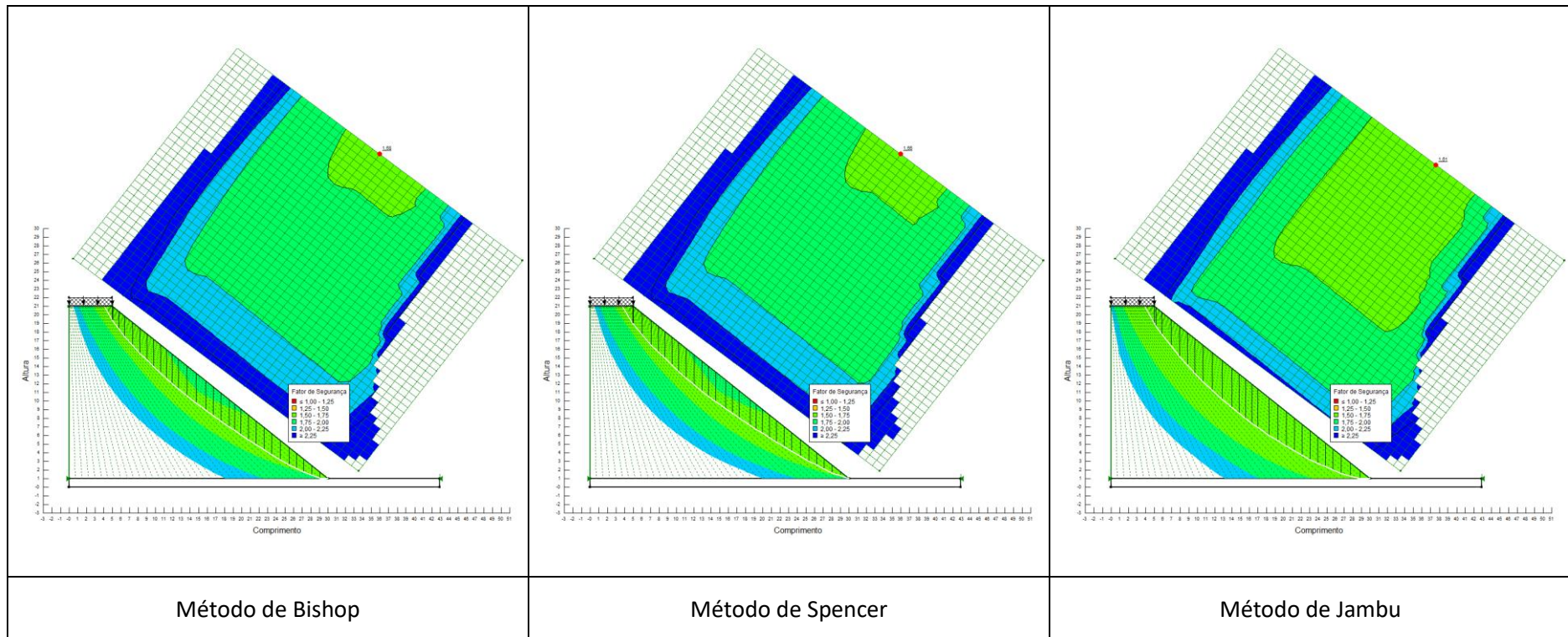
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

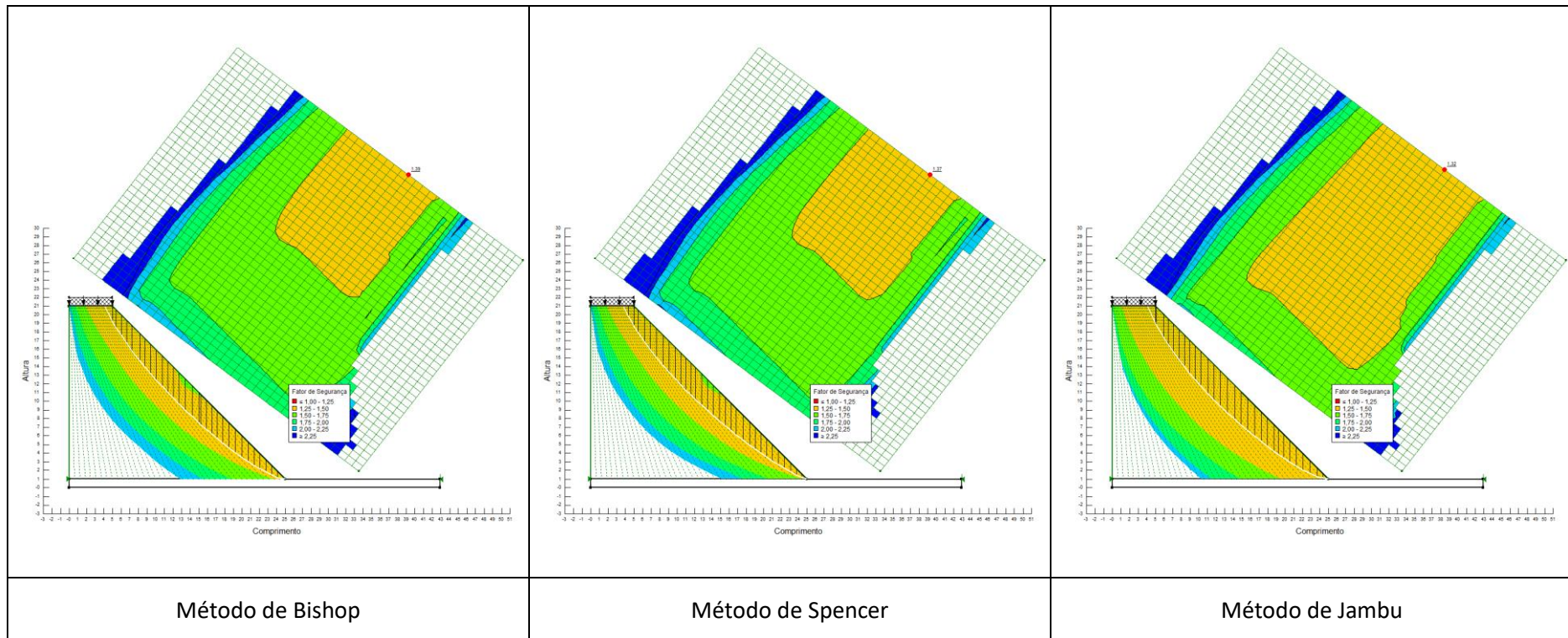
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

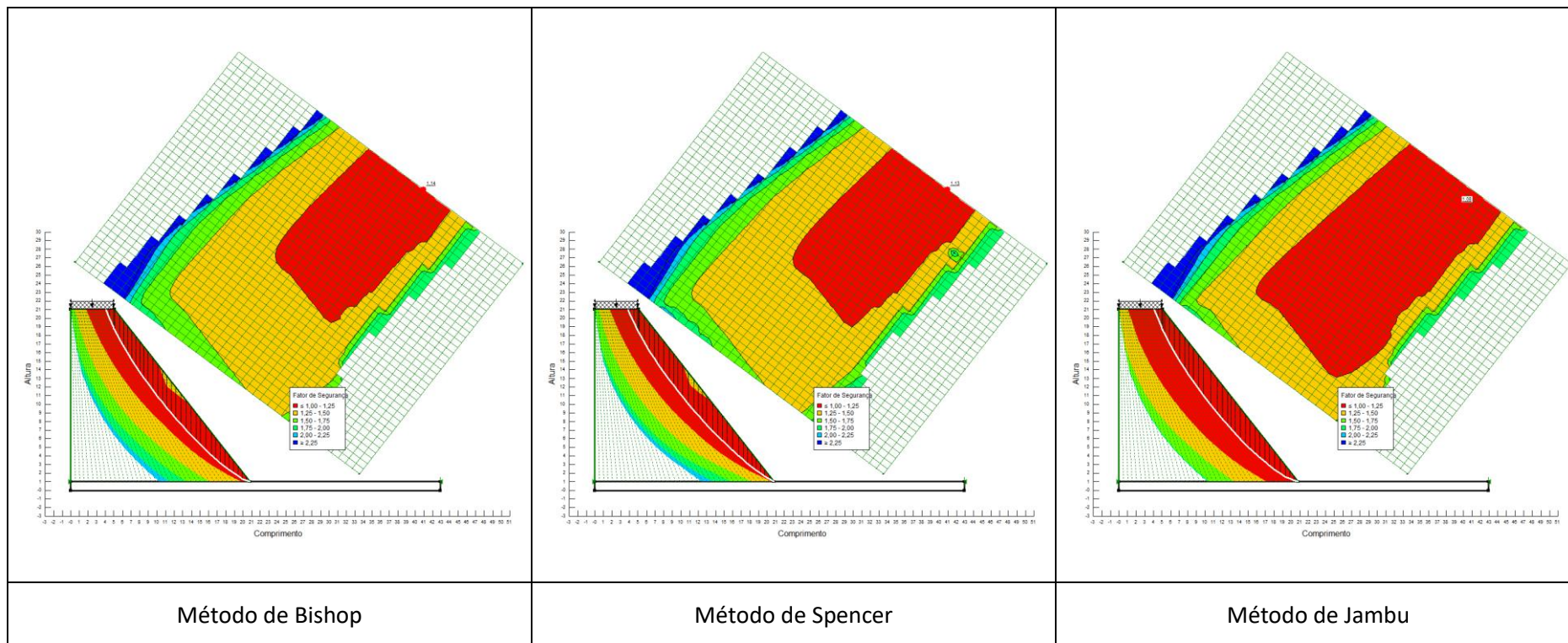
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

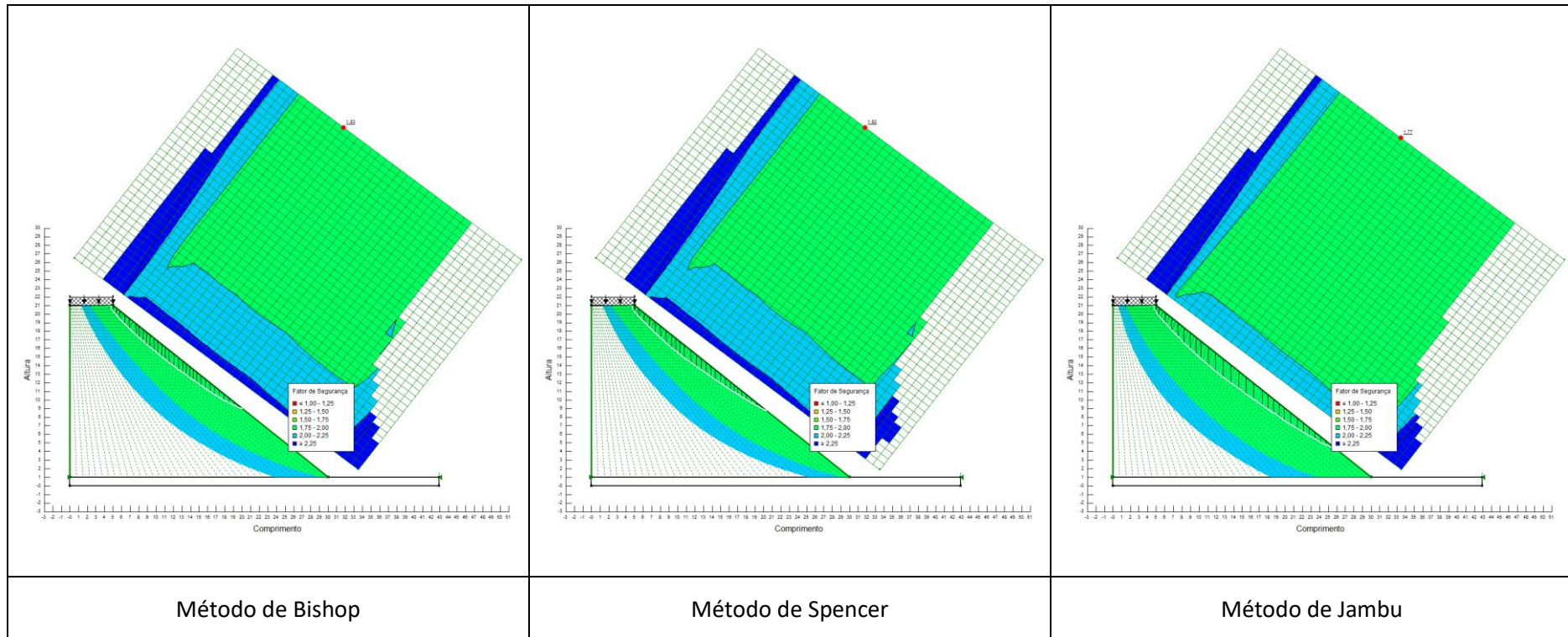
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

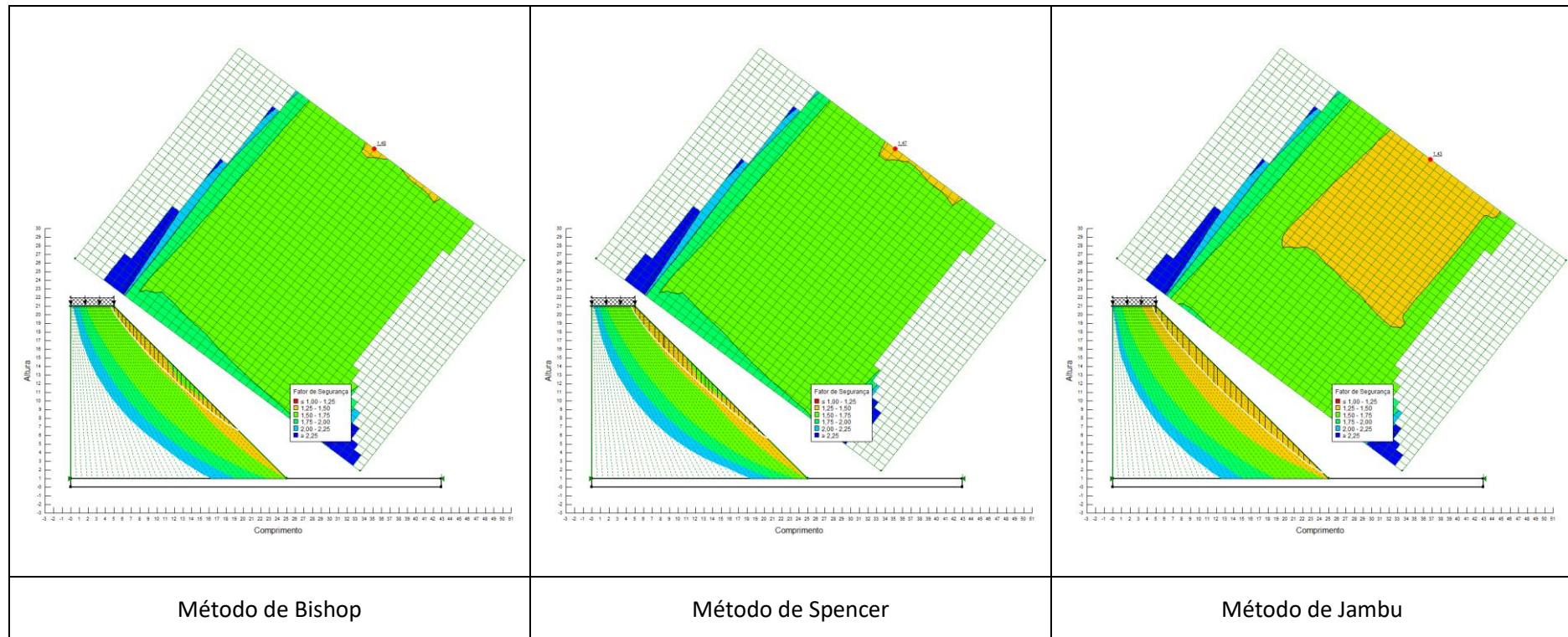
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

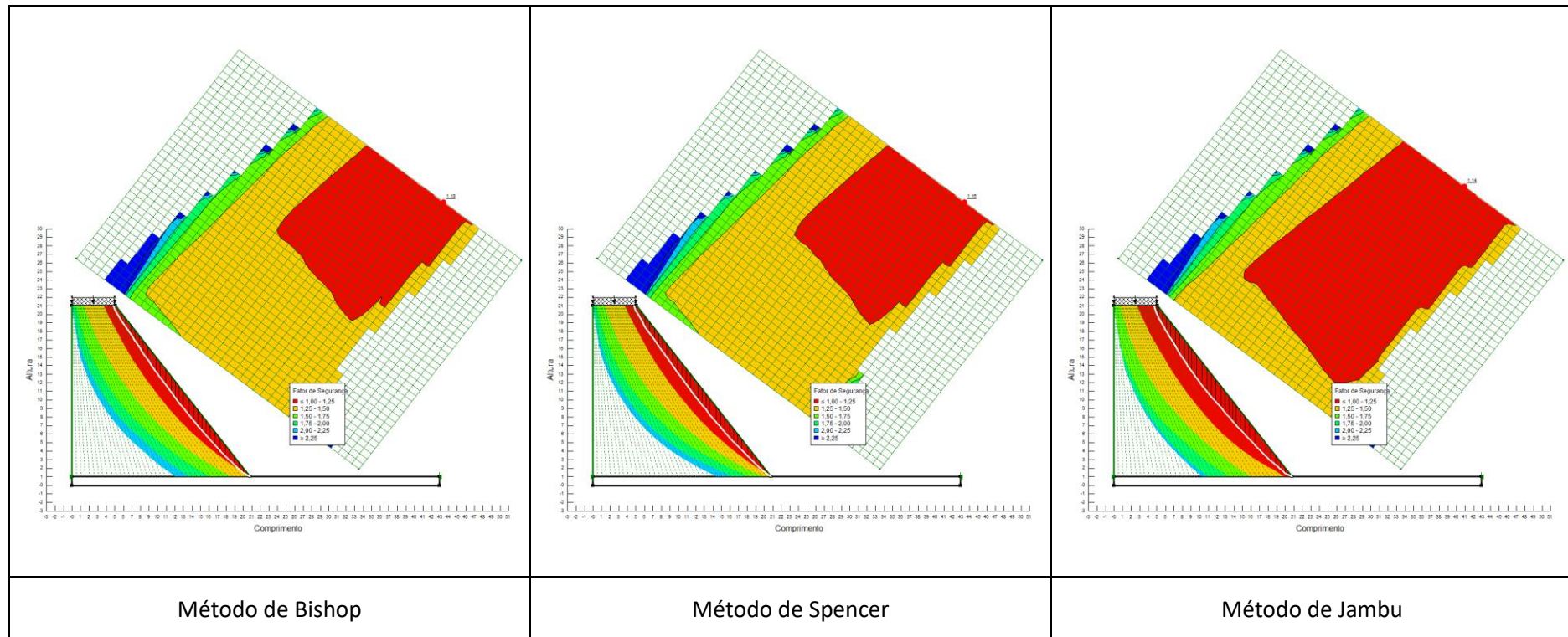
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

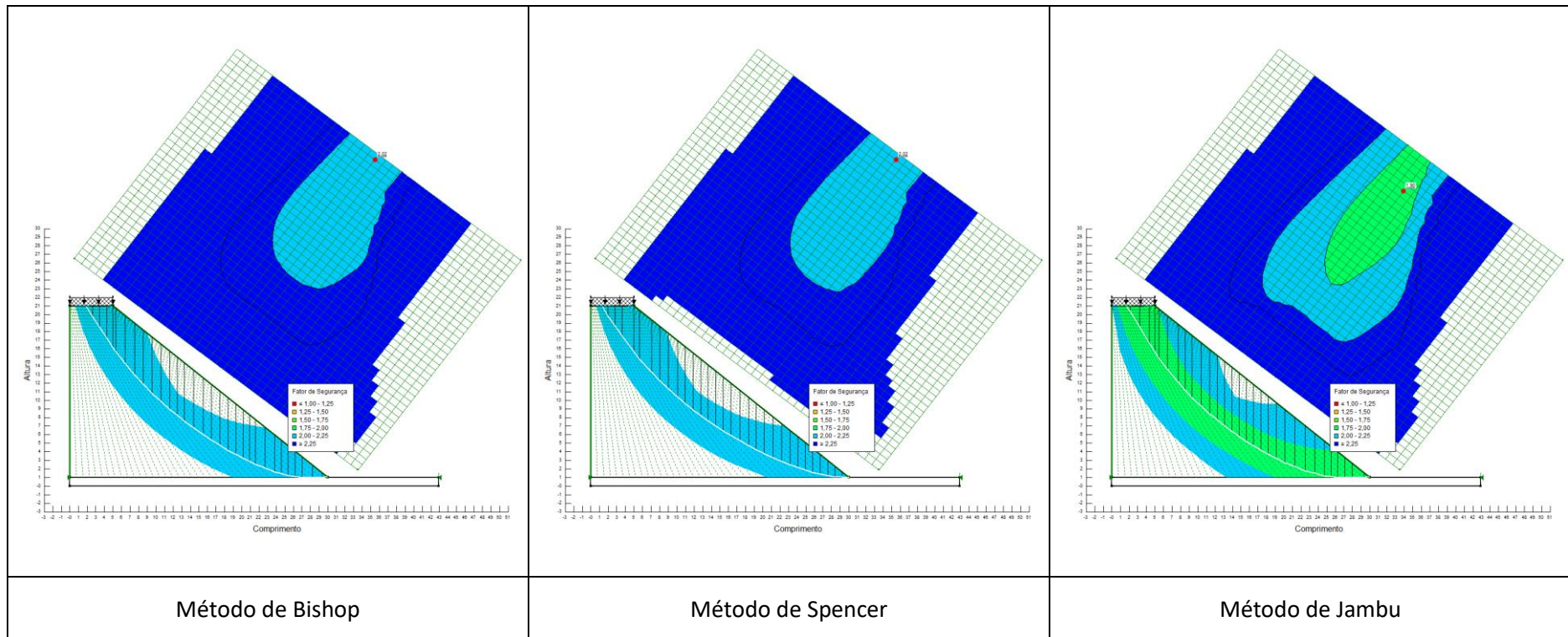
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

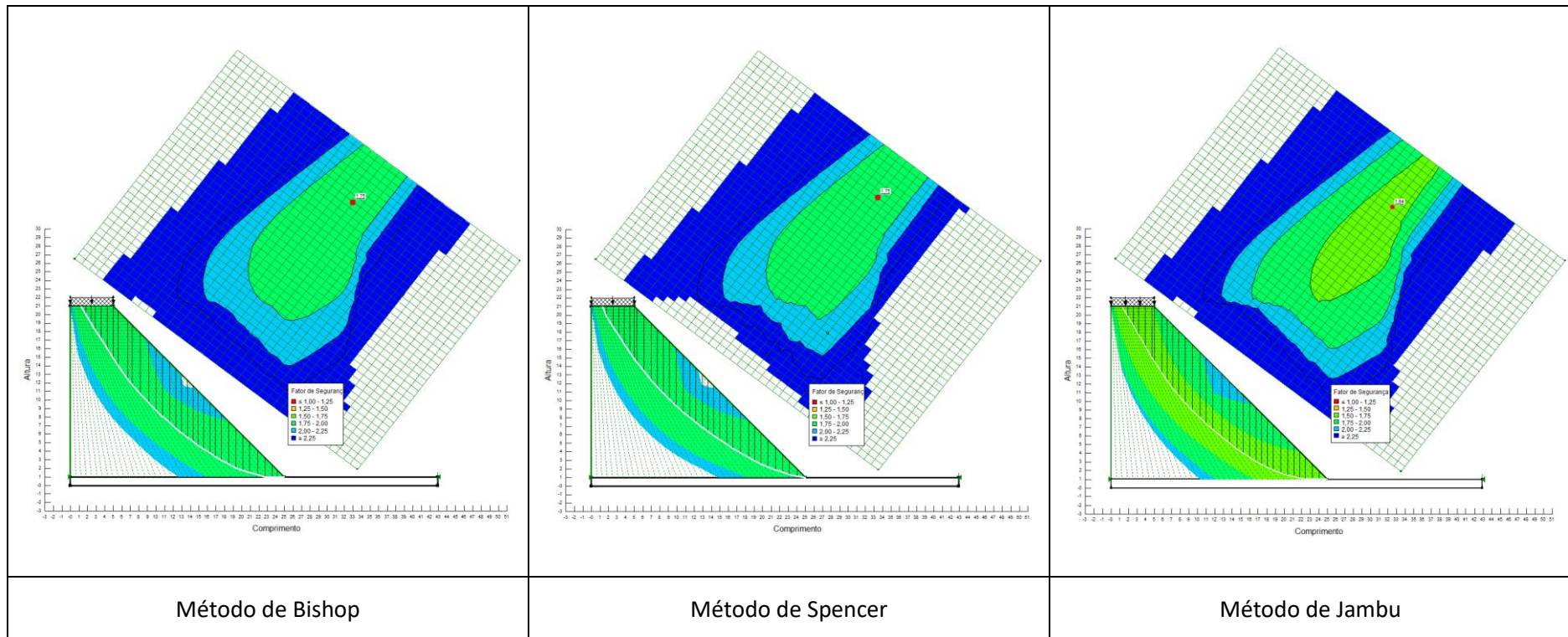
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

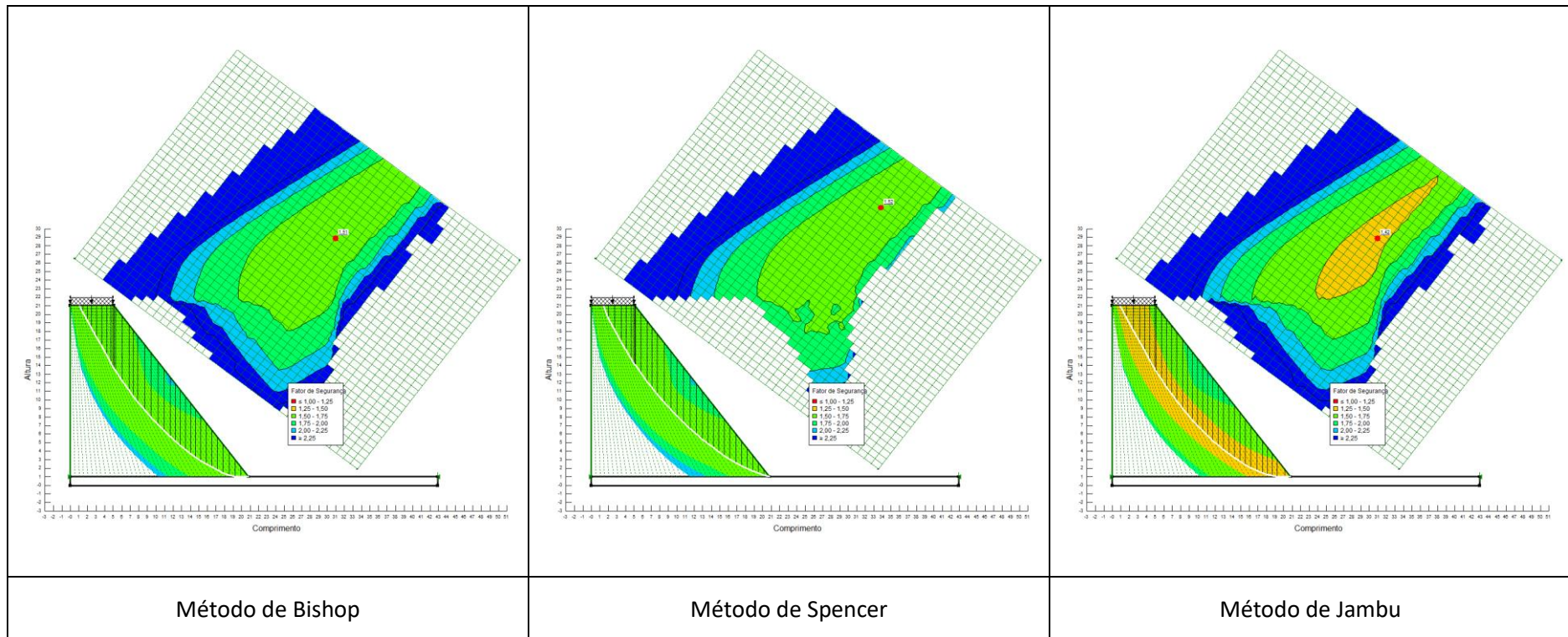
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

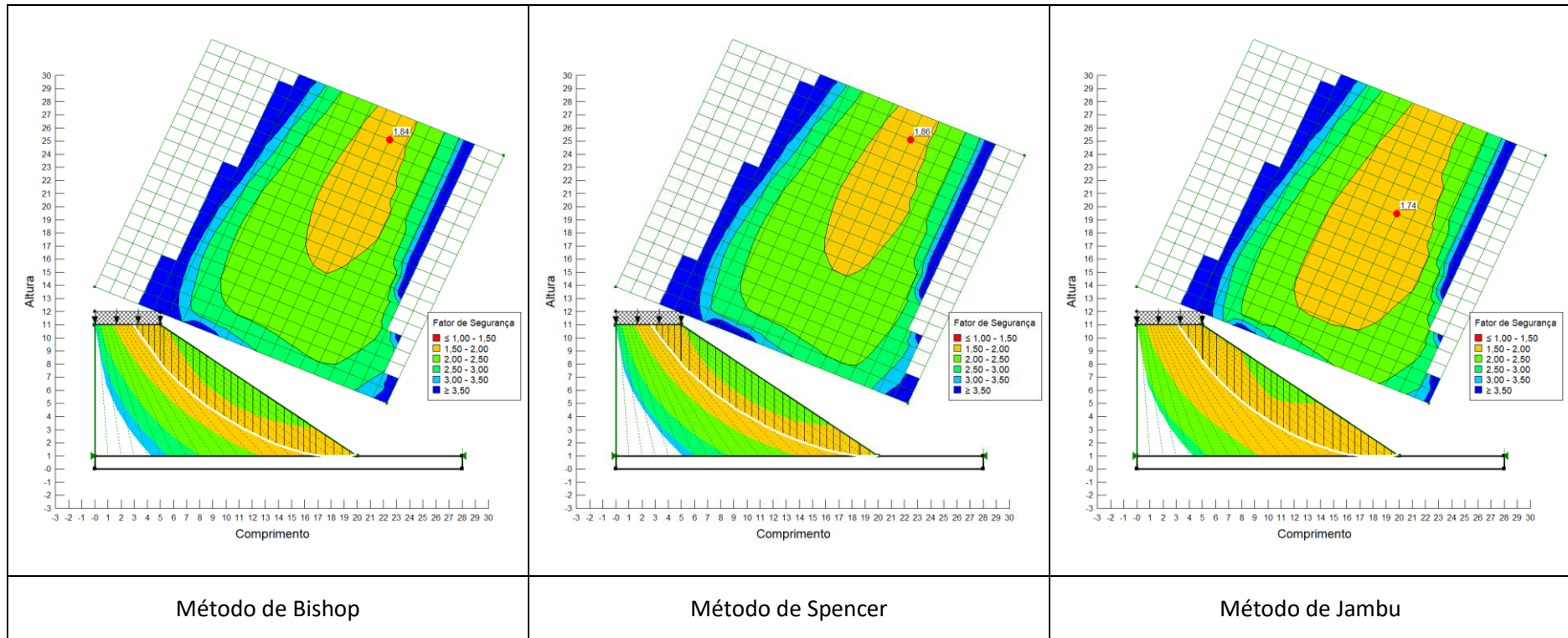
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CD;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

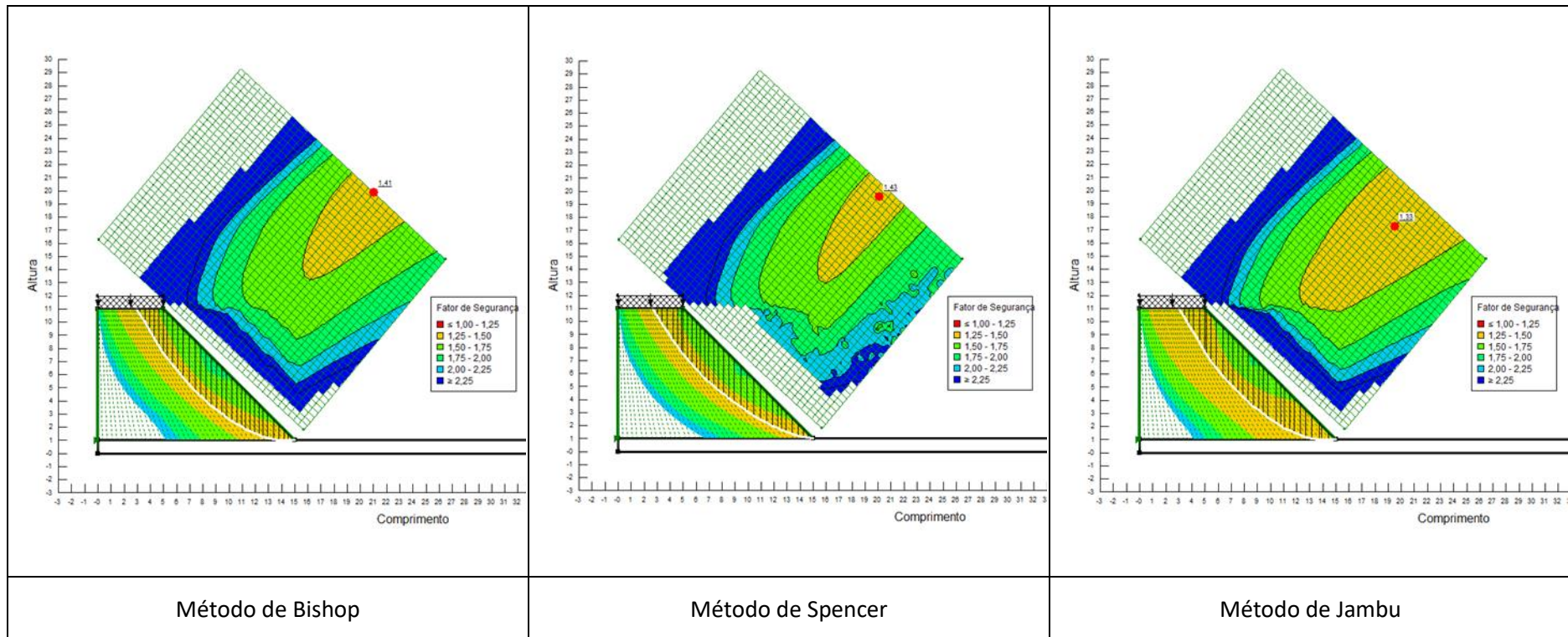
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

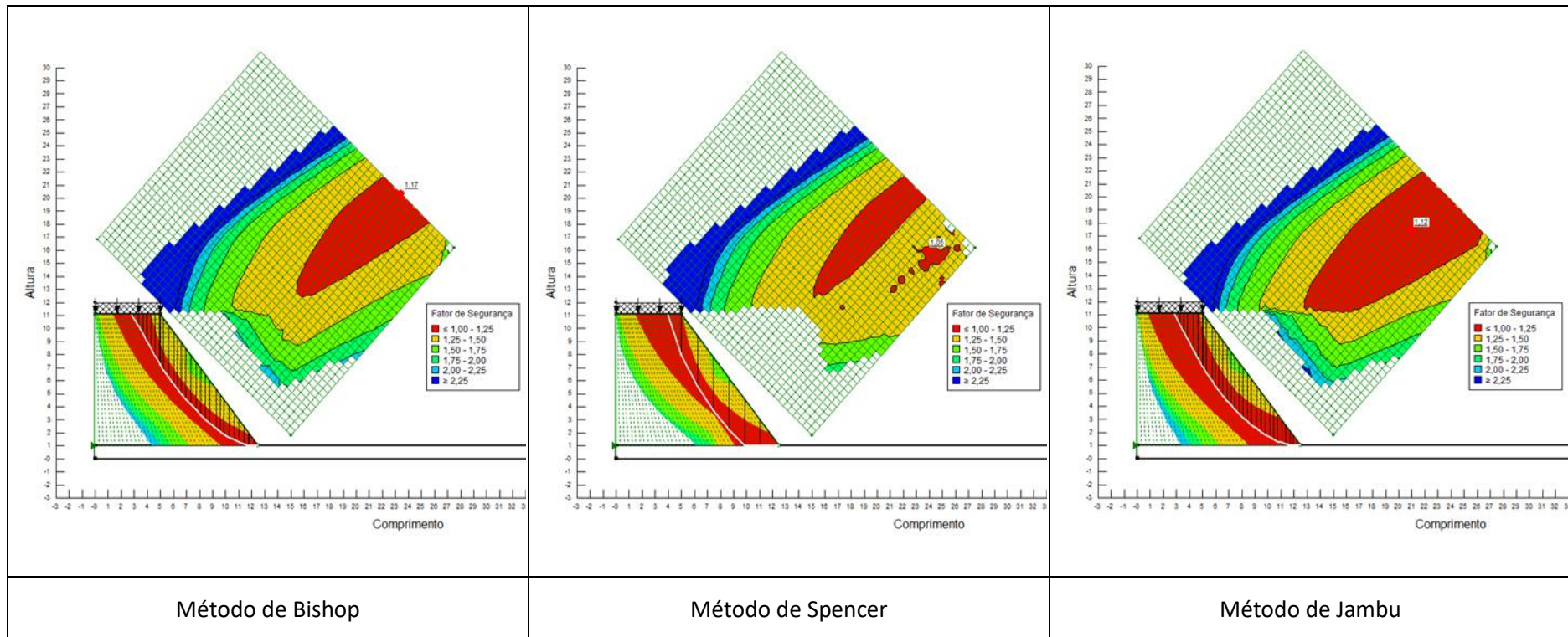
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

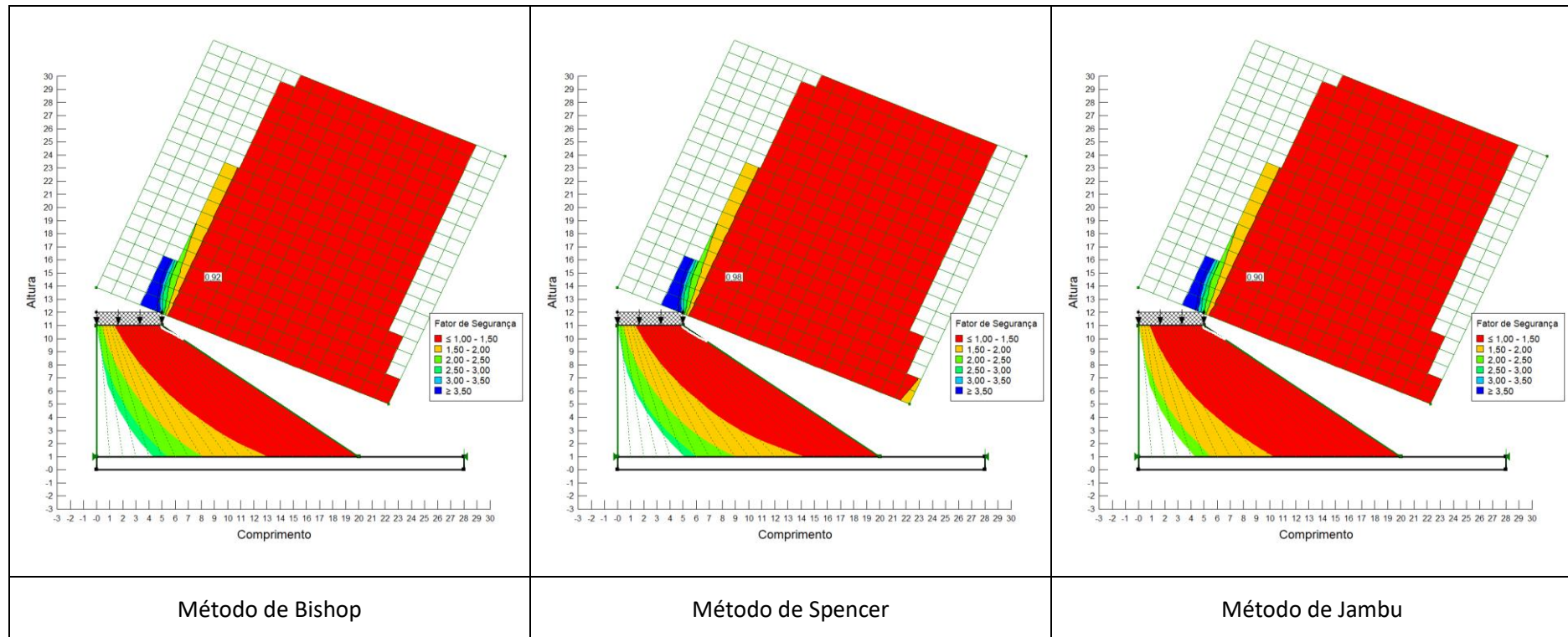
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

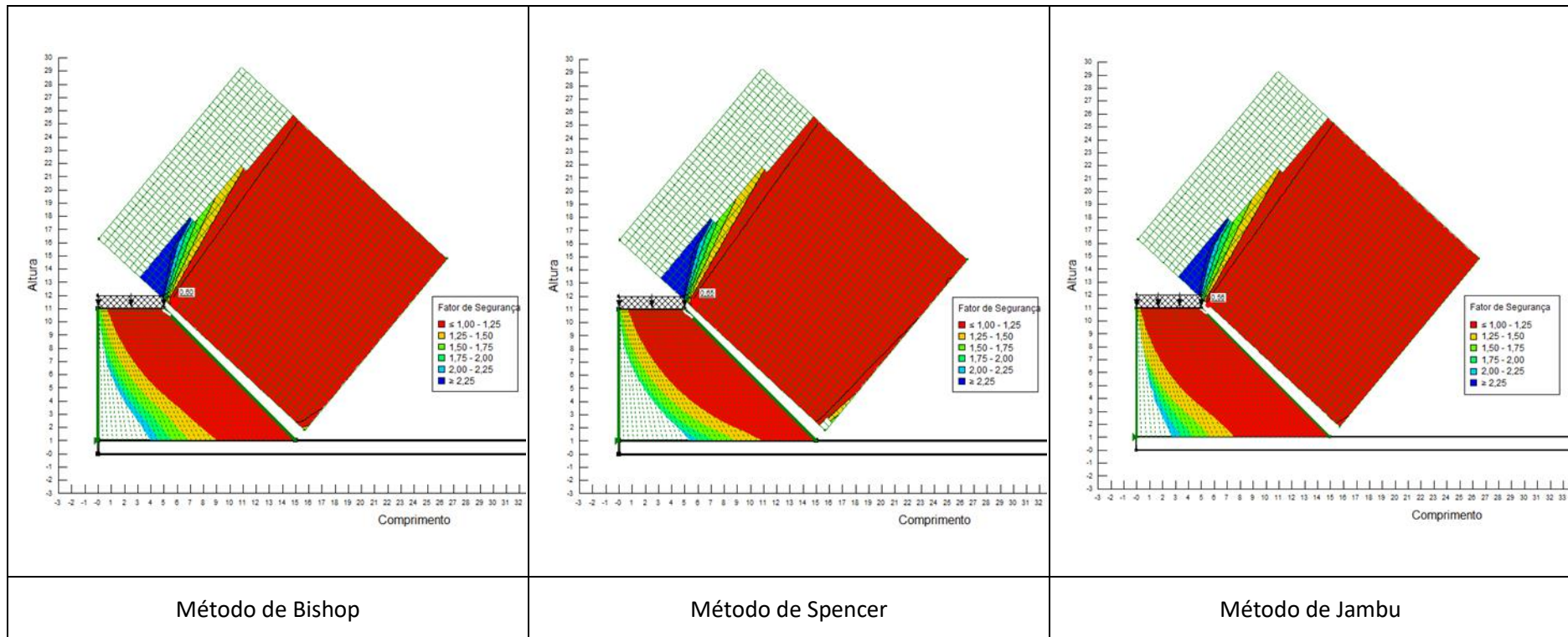
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

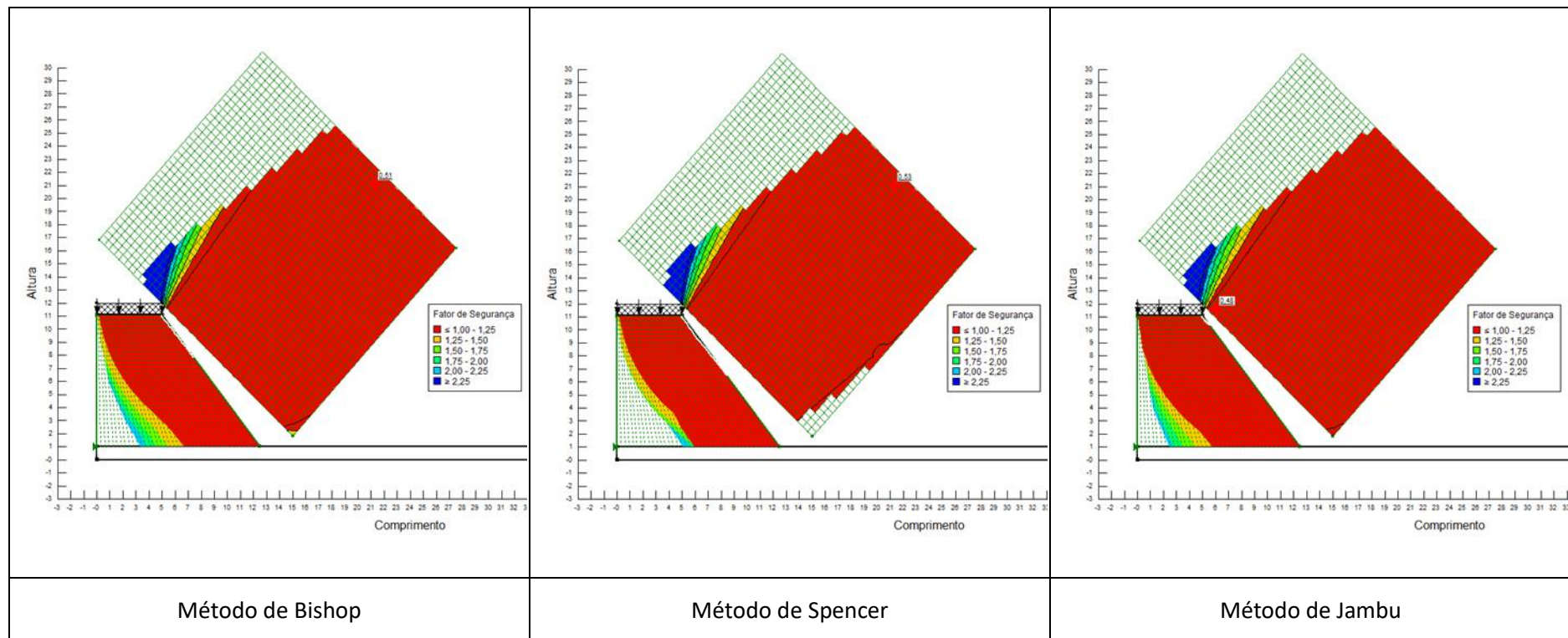
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

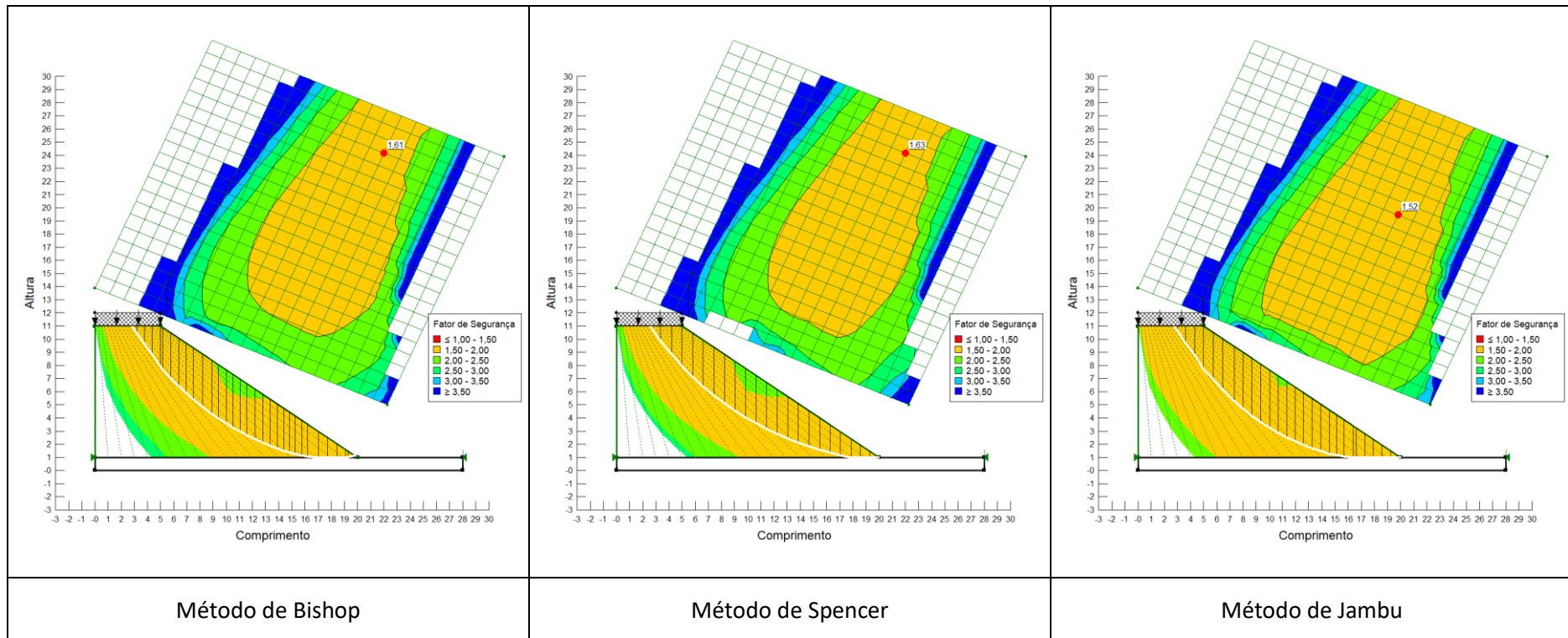
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

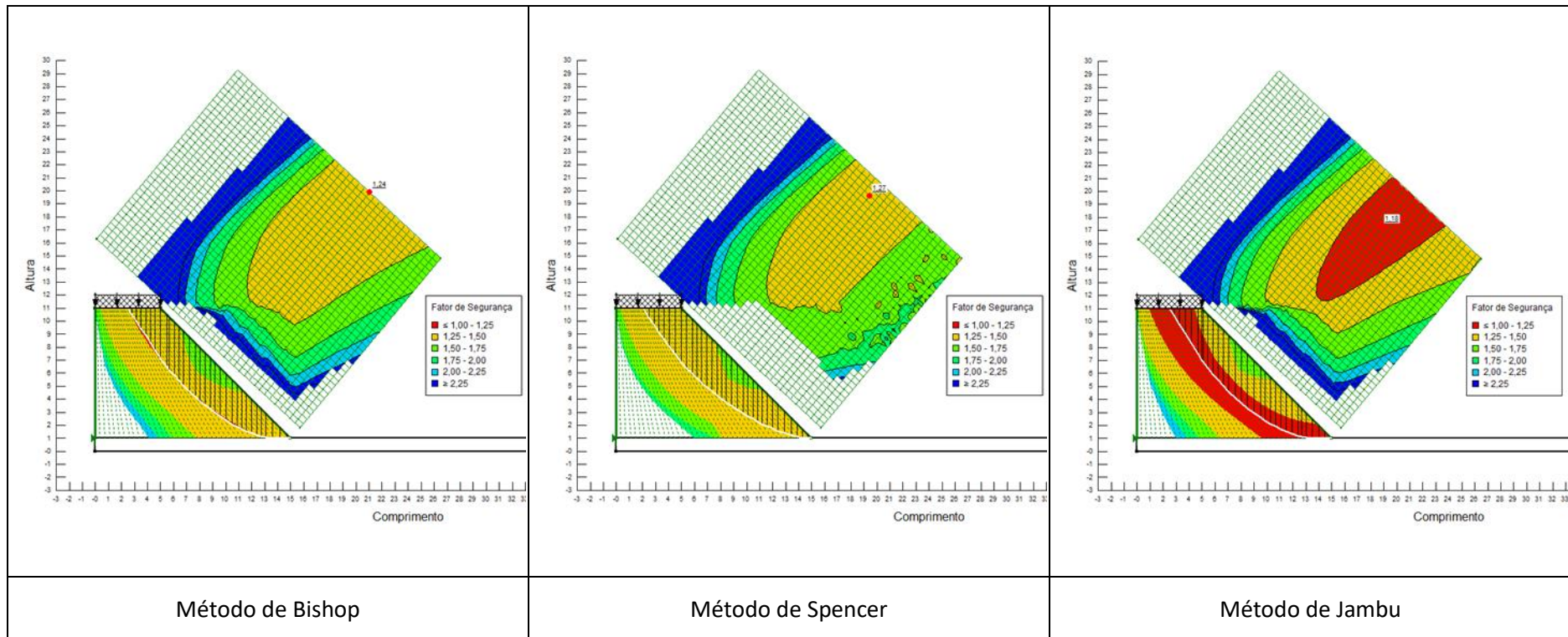
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

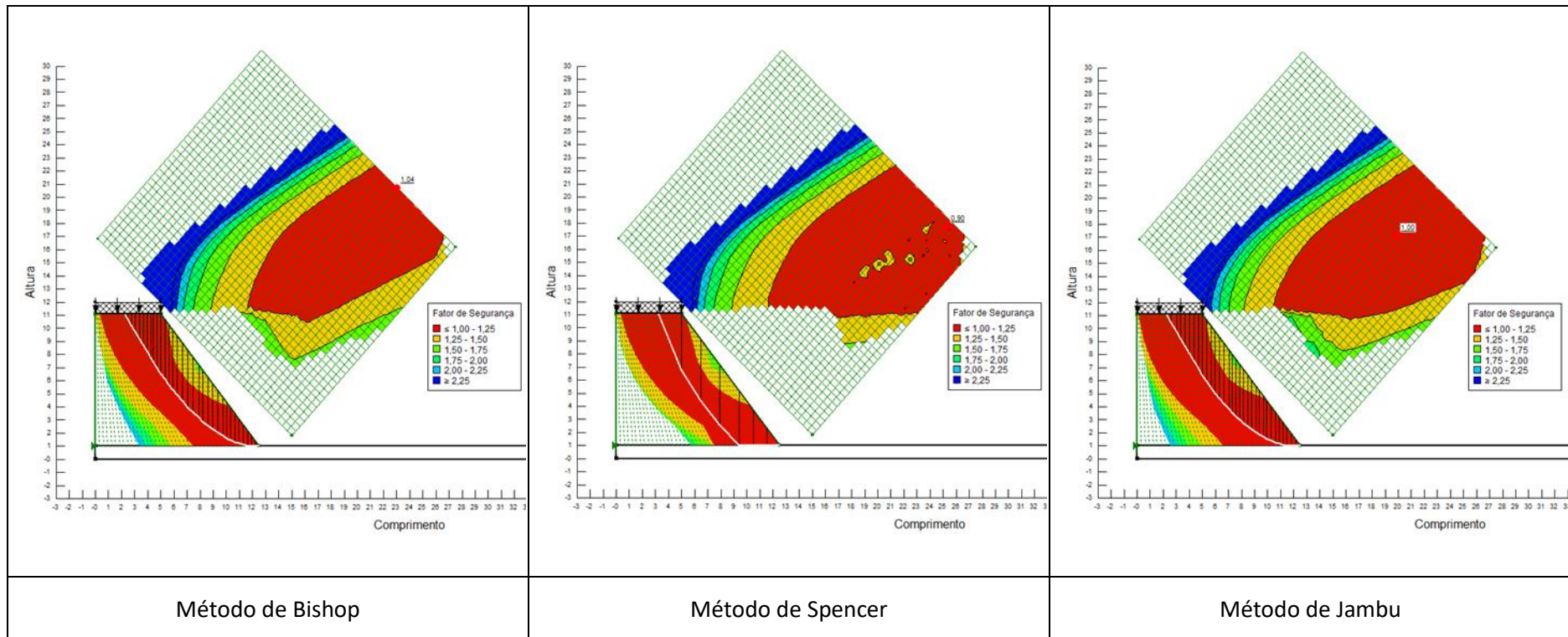
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

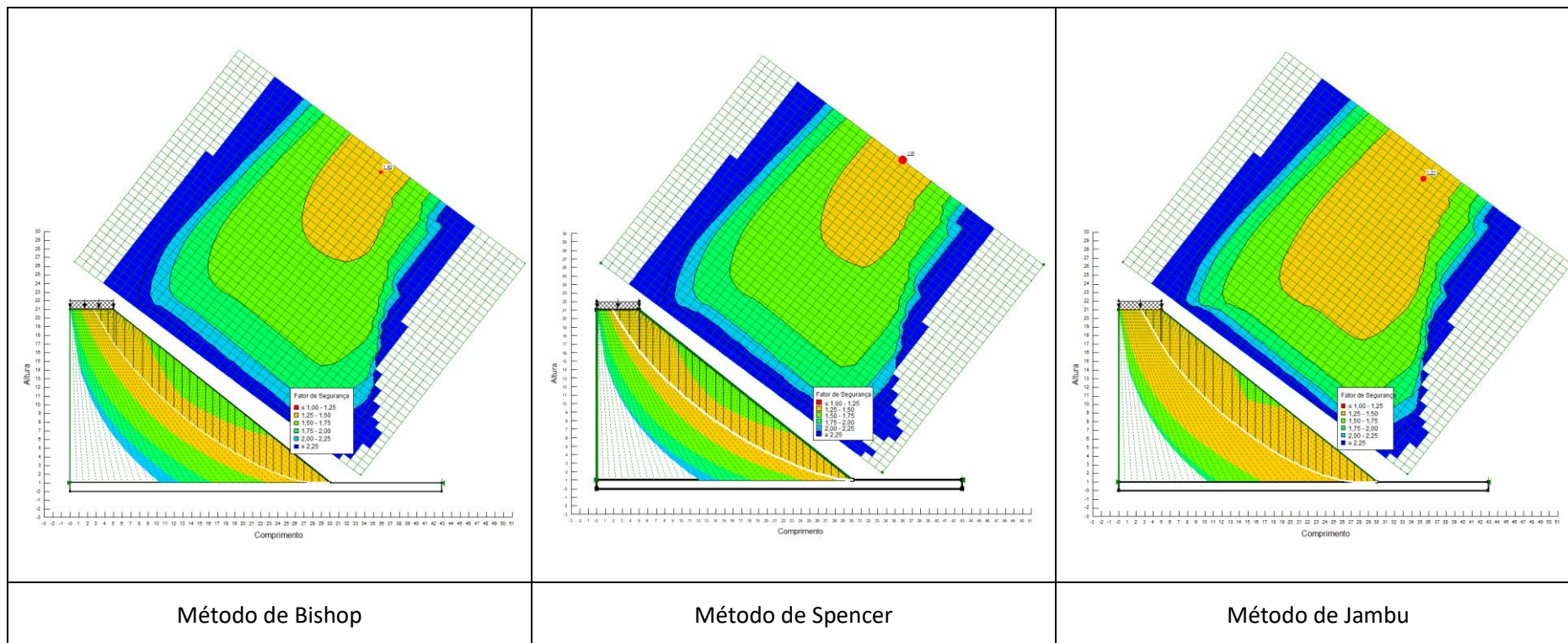
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 10 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

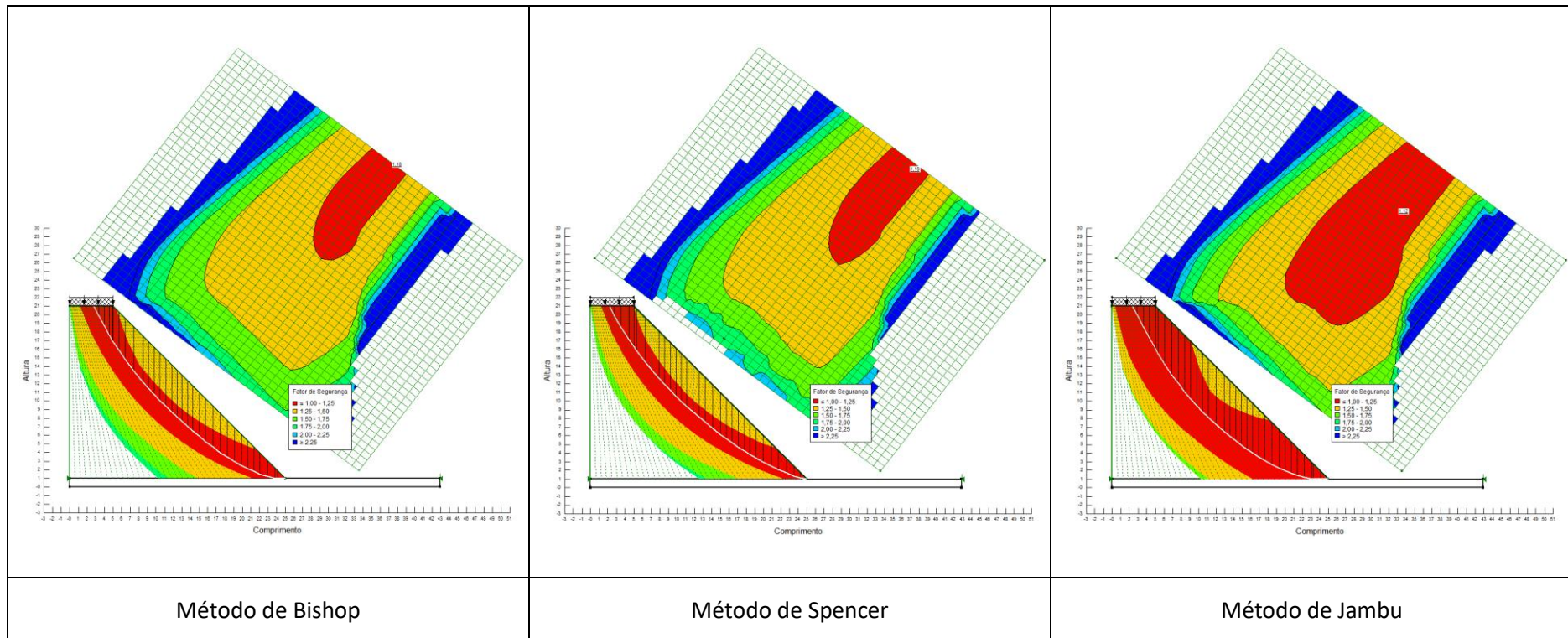
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

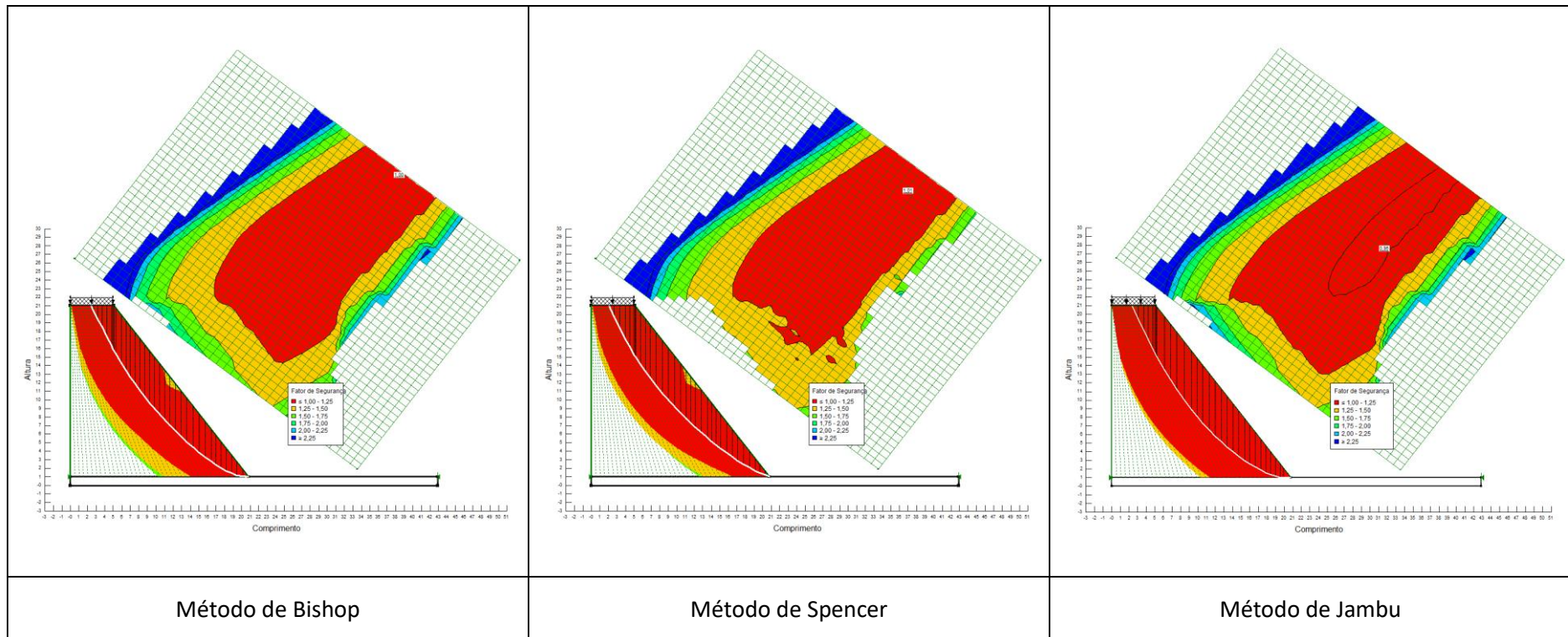
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A -3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

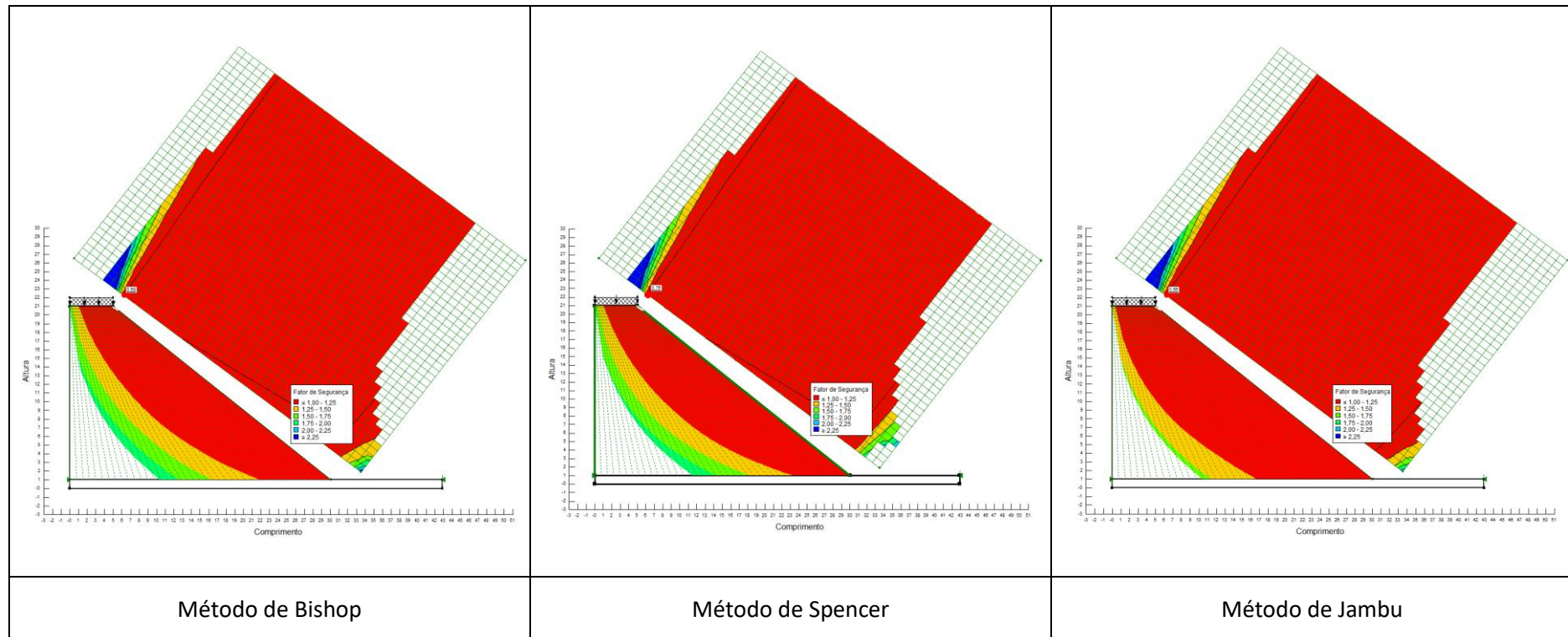
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

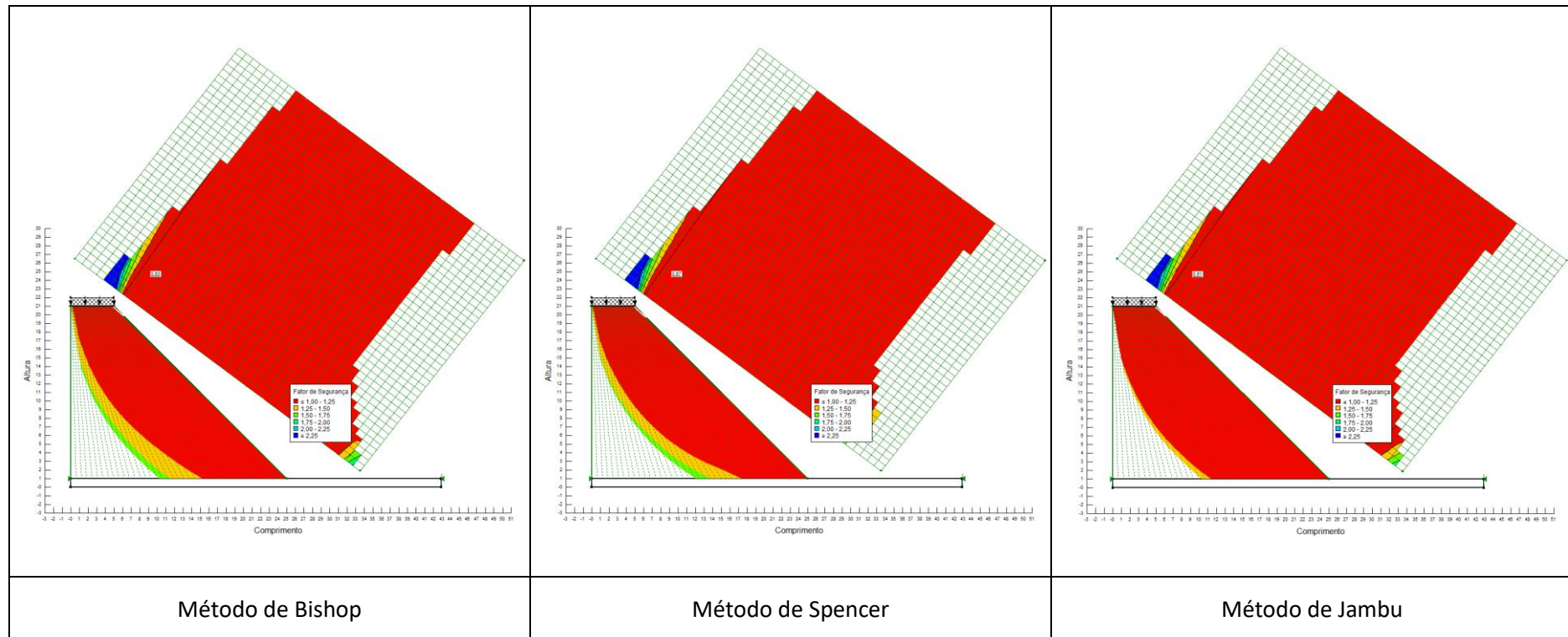
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

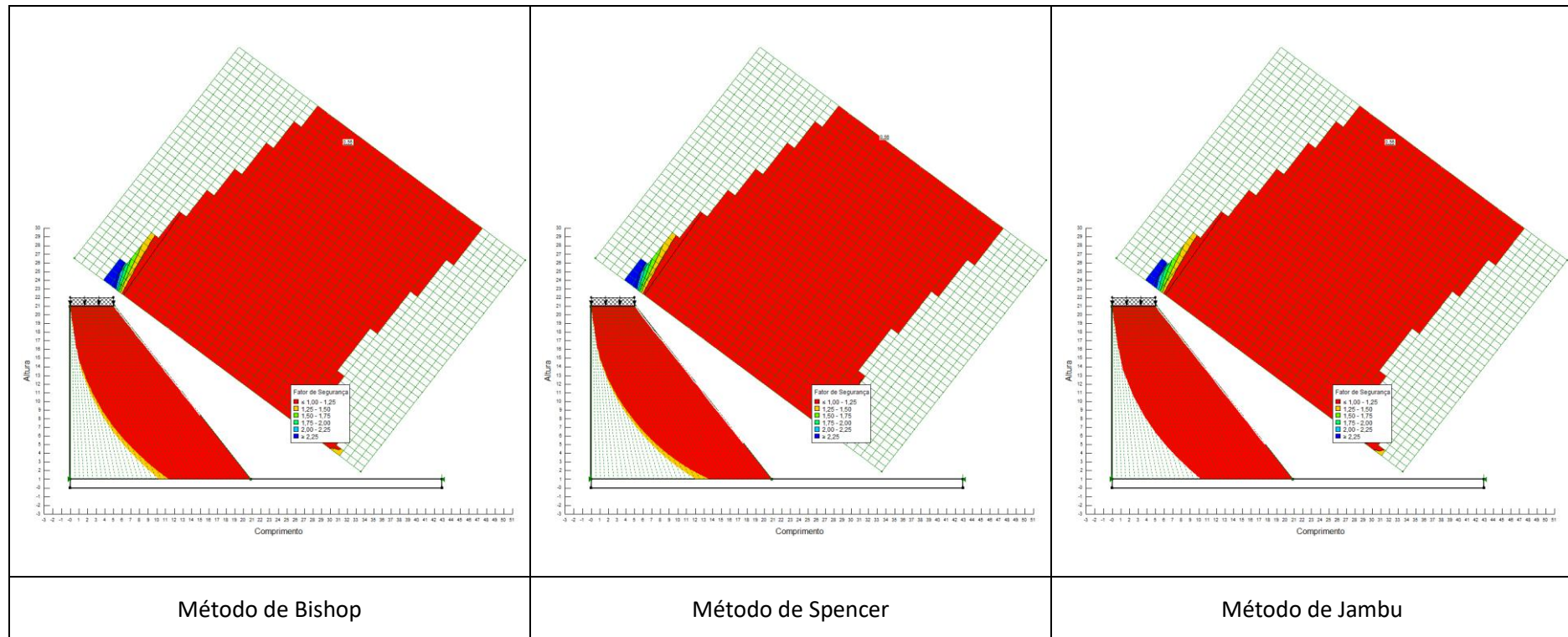
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO COM O TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

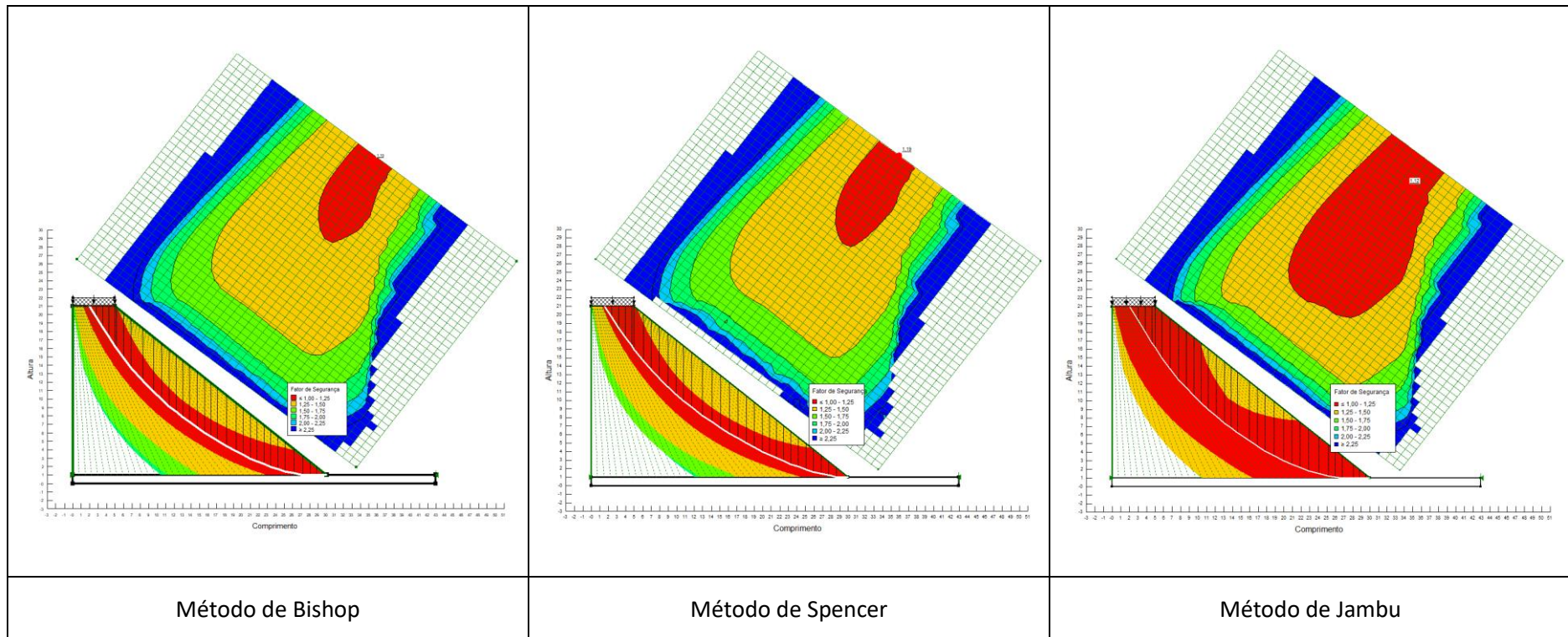
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

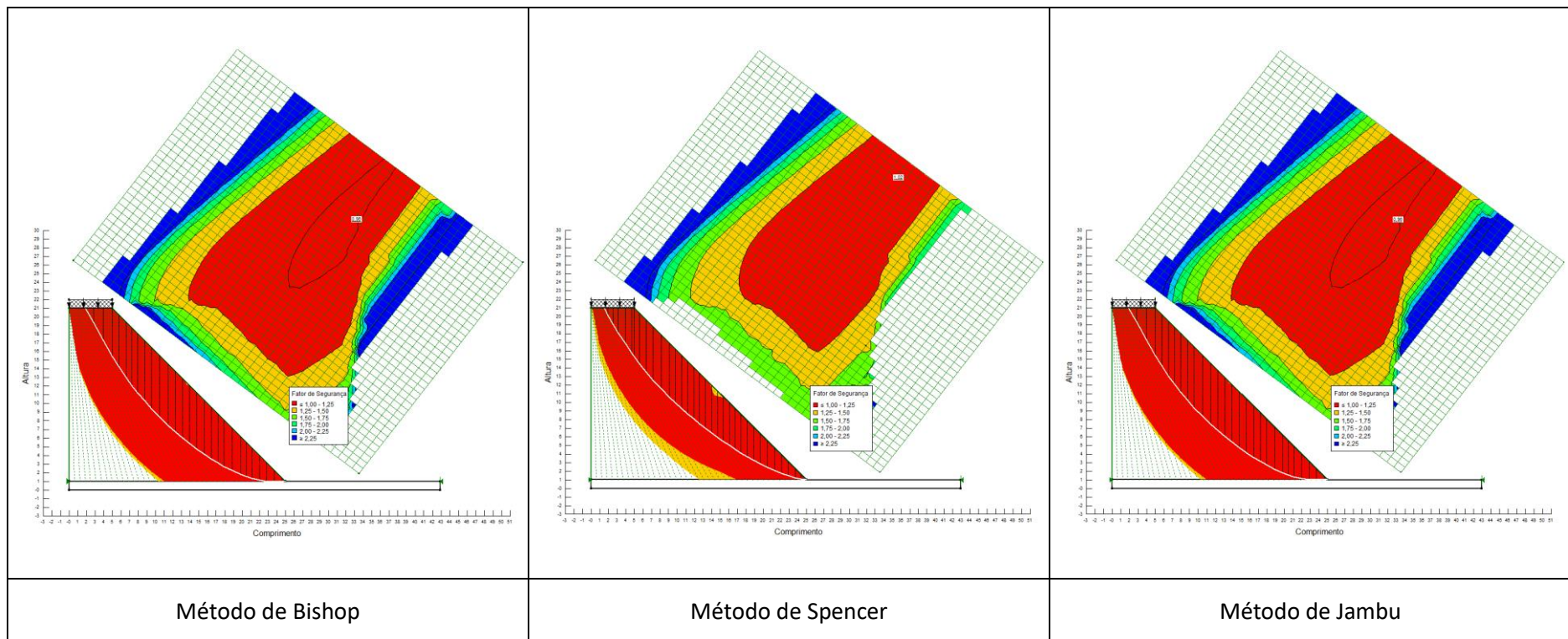
- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1,5



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:1



SOLO Z5 COMPACTADO A +3% DO TEOR ÓPTIMO DE COMPACTAÇÃO

Condições de cálculo:

- Parâmetros de corte obtidos no ensaio CDR;
- Geometria do aterro: altura = 20 m e inclinação 1:0,75

