

**LEONARDO DA SILVA MACHADO**

**ESTABILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO FILTRADOS COM USO DE  
ADITIVOS PARA DISPOSIÇÃO EM PILHAS COMPACTADAS (*DRY STACKING*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes  
Marques

Coorientador: Roberto Lopes Ferraz

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M149e  
2022 Machado, Leonardo da Silva, 1996-  
Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com  
uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (dry  
stacking) / Leonardo da Silva Machado. – Viçosa, MG, 2022.  
1 dissertação eletrônica (289 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Referências bibliográficas: f. 196-205.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.011>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Segurança nas minas. 2. Rejeitos (Metalurgia) - Secagem.  
3. Minérios de ferro. 4. Barragens de rejeitos - Brasil.  
I. Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 622.8

**LEONARDO DA SILVA MACHADO**

**ESTABILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO FILTRADOS COM USO DE  
ADITIVOS PARA DISPOSIÇÃO EM PILHAS COMPACTADAS (*DRY STACKING*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

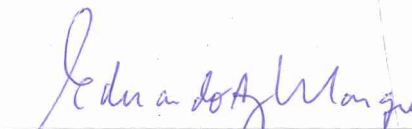
APROVADA: 12 de dezembro de 2022

Assentimento:



---

Leonardo da Silva Machado  
Autor



---

Eduardo Antonio Gomes Marques  
Orientador

*Dedico este trabalho à minha família e todos que estiveram ao meu lado, me apoiando e me incentivando a buscar o meu melhor.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela vida, pelas bênçãos e pelas oportunidades que tive de ter chegado até aqui. Sou grato pelos momentos de felicidade e pelos momentos de desafios, que nos servem de grande aprendizado e provação neste mundo.

Agradeço também à minha família, que sempre me incentivou a estudar e buscar o meu melhor. Em especial à minha avó, Delurdes, minha primeira professora e grande incentivadora na busca do conhecimento.

Obrigado também à minha irmã, Gabriela, por ser inspiração de força, de vontade e por ser toda ouvidos quando estou empolgado por ter adquirido novos conhecimentos.

À minha mãe, Liliane, agradeço por ser exemplo de amor e cuidado. Obrigado por sempre me apoiar nos meus estudos e por estar aqui me auxiliando.

À Amanda, agradeço por ser exemplo de muita dedicação e pelos momentos de apoio, amor e companheirismo.

Também sou extremamente grato ao meu avô, Geraldo, que infelizmente não está mais entre nós. Vô, obrigado por ter sido pai e por ter sido exemplo de homem. Obrigado também por ter sido o principal motivador da minha escolha pela Engenharia Civil. Lembro de quando era criança e te ajudava nas pinturas, nas dosagens de massa, nos rebocos e em carregar os materiais de construção para arrumarmos a casa da vó.

Ao professor e orientador Eduardo Marques, agradeço por sempre estar disposto a sanar minhas dúvidas e repassar os seus conhecimentos. Agradeço também por ser um grande exemplo de profissional.

Ao professor e coorientador Roberto Ferraz, obrigado pelo apoio, pelo primor na realização de ensaios de laboratório e pelas reuniões tarde da noite para conversarmos sobre algum assunto da dissertação. Obrigado por ser exemplo, professor.

Aos professores de Geotecnia do DEC/UFV agradeço por todo o conhecimento transmitido por vocês.

Ao órgão de fomento à pesquisa, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, que incentivou a realização deste trabalho.

À mineradora e aos meus colegas de trabalho, obrigado pelo incentivo na pesquisa. Com certeza o apoio de vocês fizera com que eu chegasse até aqui.

Enfim, agradeço a todos que de certa forma, puderam contribuir para este momento.

## RESUMO

MACHADO, Leonardo da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2022. **Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (*dry stacking*)**. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Roberto Lopes Ferraz.

Com os acidentes catastróficos ocorridos nos últimos anos, decorrentes do rompimento de barragens de mineração de ferro no Brasil, surgiram legislações mais restritivas à utilização de estruturas de barramento para a disposição dos rejeitos, o que proporcionou maior segurança à população, porém restringiu a utilização deste tipo de estrutura pela indústria da mineração. Sendo assim, a comunidade geotécnica, empresas mineradoras e empresas projetistas, necessitaram identificar outras metodologias de disposição de rejeitos como alternativas à substituição das barragens. Deste modo, somando-se ao avanço das tecnologias de filtragens de rejeitos, foi observada grande oportunidade nos empilhamentos a seco (*dry stacking*) de rejeitos compactados de minério de ferro. Diferentemente da disposição em barragens, onde ocorre geralmente o espigotamento de rejeito em polpa nos reservatórios, a disposição em pilhas ocorre similarmente a obras de terraplanagem, na qual são necessários muitos equipamentos para a compactação do material na umidade ótima, no grau de compactação adequado e na espessura especificada, de modo que a estrutura formada por taludes e bermas seja construída. Esta pesquisa visa a identificação de aditivos para estabilização de rejeito de minério de ferro que proporcionem ganhos geotécnicos com a sua aplicação em pilhas. Foram utilizados percentuais variados de bentonita, cimento, cal, agregado siderúrgico e estéril para a realização das misturas. Após a realização de ensaios de caracterização, compactação, resistência à compressão simples (RCS) e triaxial CIU<sub>SAT</sub>, foi possível identificar as misturas mais efetivas. Dentre elas, o rejeito com 2% de cimento, o rejeito com 2% de cal, o rejeito com 6% de agregado siderúrgico e a mistura com 80% de rejeito com 20% de estéril. As estabilizações com bentonita apresentaram redução dos parâmetros de resistência. Após a identificação dos percentuais ótimos, foram realizadas análises de estabilidade de uma pilha hipotética, na qual foram avaliadas diversas metodologias de utilização das misturas no empilhamento. Após as análises, pôde-se identificar que a estabilização de rejeito com 2% de cal apresentou as maiores médias de ganhos dos Fatores de Segurança (FS), 18,64%, possibilitando inclusive a otimização de ângulos de face geral dos taludes (em 11°), aumento da altura da pilha e, conseqüentemente, aumento da capacidade de volumétrica da estrutura. Por fim, também foram realizadas análises de estabilidade para verificação da otimização dos ângulos de face geral dos taludes da mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril (em 4°), o

que também proporcionou ganhos quanto à capacidade volumétrica da estrutura, porém com maiores vantagens econômicas de utilização (em relação a cal).

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro. *Dry stacking*. Parâmetros de resistência. Aditivos no rejeito. Otimização de empilhamentos a seco de rejeitos.



## ABSTRACT

MACHADO, Leonardo da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2022. **Stabilization of filtered iron ore tailings with the use of additives for disposal in compacted piles (dry stacking)**. Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Roberto Lopes Ferraz.

With the catastrophic accidents that have occurred in recent years, resulting from the rupture of iron mining dams in Brazil, more restrictive legislation has been approved, related to the use of dam structures for tailings disposal, which provided greater safety to the population, but restricted the use of this type of structure by the mining industry. Therefore, the geotechnical community, mining companies and design companies needed to identify other tailings disposal methodologies as alternatives to the replacement of dams. Thus, in addition to the advancement of tailings filtering technologies, a great opportunity was observed in dry stacking of iron ore compacted tailings. Differently from the disposal in dams, where the tailings slurry is released in the reservoirs, the disposal in piles occurs similarly to earthworks, where a lot of equipment is necessary for the compaction of the material in the optimal humidity, in the adequate degree of compaction and in the specified thickness, so that the structure formed by slopes and berms is built. This research aims to identify additives for the stabilization of iron ore tailings that provide geotechnical gains with their application in piles. Varying percentages of bentonite, cement, lime, steel and sterile aggregate were used to produce the mixtures. After carrying out characterization, compaction, simple compressive strength (SCS) and  $CIU_{SAT}$  triaxial tests, it was possible to identify the most effective mixtures. Among them, the tailings with 2% of cement, with 2% of lime, with 6% of steel aggregate and 80% of tailings with 20% of sterile were the best. Stabilizations with bentonite showed a reduction in strength parameters. After identifying the optimal percentages, stability analyzes of a hypothetical pile were performed, where different methodologies for using the mixtures in the pile were evaluated. After the analyses, it was possible to identify that the tailings stabilization with 2% lime presented the highest average gains of the Safety Factors (SF), 18.64%, even allowing the optimization of general face angles of the slopes (in  $11^\circ$ ), increase in the height of the pile and consequently increase in the volumetric capacity of the structure. Finally, stability analyzes were also carried out to verify the optimization of the general face angles of the slopes of the mixture of 80% of tailings with 20% of sterile (at  $4^\circ$ ), which also provided gains in the volumetric capacity of the structure, but with greater economic advantages of use (in relation to lime).

Keywords: Iron ore tailings. Dry stacking. Resistance parameters. Additives in tailings.

Optimization of tailings dry stacking.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Produção de minério de ferro histórica do Brasil e do mundo.....	37
Figura 2 – Processo típico de beneficiamento mineral.....	38
Figura 3 – a) Mapa infográfico das barragens de rejeito nos estados brasileiros; b) Disposição espacial das barragens de rejeito no Brasil.....	40
Figura 4 – Distribuição das metodologias construtivas de barragens de rejeito empregadas no território brasileiro.....	41
Figura 5 – Barragem – Alçamento a montante.....	42
Figura 6 – Barragem – Alçamento a jusante.....	42
Figura 7 – Barragem – Alçamento por linha de centro.....	43
Figura 8 – Seção típica de um empilhamento drenado.....	44
Figura 9 – Barragem de aterro hidráulico utilizando ciclones para separação dos rejeitos em underflow e overflow.....	44
Figura 10 – Disposição compartilhada de rejeitos e estéril: (a) células de rejeitos em depósito de estéril; (b) camadas alternadas de estéril e rejeitos; (c) injeção de rejeitos em depósito de estéril.....	45
Figura 11 – Formação de cone sobre o rejeito depositado na Mina de Bulanhanhu.....	46
Figura 12 – Disposição em cava exaurida.....	47
Figura 13 – Detalhes da disposição de pasta em torres, formando três finas camadas sobrepostas.....	47
Figura 14 - Fluxograma geral de uma filtragem de rejeitos.....	48
Figura 15 – Pilha de rejeitos filtrados e compactados.....	49
Figura 16 – Tratamento de camadas de rejeitos nas pilhas.....	50
Figura 17 – Compactação de camadas de rejeitos nas pilhas.....	50
Figura 18 – Empilhamento de rejeito filtrado e compactado.....	53
Figura 19 – Soluções alternativas de sequenciamento do empilhamento dos rejeitos filtrados e compactados.....	53
Figura 20 - Tipos de estabilização de solos.....	55
Figura 21 – Estabilização química dos rejeitos com uso de cal hidratada.....	56
Figura 22 – Análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados e compactados através dos cálculos de equilíbrio-limite.....	59
Figura 23 – Fluxograma de trabalho da pesquisa.....	67
Figura 24 – Detalhe da moldagem dos corpos de prova para os ensaios CIU <sub>SAT</sub> .....	72

Figura 25 – Exemplo de gráfico de trajetória de tensões efetivas (Trajetórias A e B – Comportamento Dilatante; e Trajetórias C, D e E – Comportamento Contrátil).....	73
Figura 26 – Pilha de rejeitos hipotética (142 m) – Estudo de caso – Seção BB.....	78
Figura 27 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (142 m) – Rejeito .....	78
Figura 28 – Pilha de rejeitos filtrado hipotética (172 m) – Estudo de caso – Seção BB.....	79
Figura 29 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (172 m) – Rejeito .....	79
Figura 30 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (172 m) – Rejeito aditivado .....	80
Figura 31 – Seção BB – Pilha de rejeitos filtrado hipotética (172 m) – Face com rejeito aditivado .....	80
Figura 32 – Curvas granulométricas dos materiais utilizados das misturas .....	82
Figura 33 – Difração de raios-X do rejeito de minério de ferro puro.....	83
Figura 34 – Curva de compactação do rejeito puro.....	84
Figura 35 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito puro.....	85
Figura 36 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS do rejeito puro.....	86
Figura 37 – Comportamento de material compactados. Os pontos 1 e 2 indicam material com umidades abaixo da ótima. O ponto 3 apresenta material na umidade ótima. Os pontos 4, 5 e 6 apresentam o material acima da umidade ótima.....	87
Figura 38 – Tipos classificação dos tipos de ruptura do solo de acordo com o comportamento tensão-deformação do material.....	88
Figura 39 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> com o rejeito puro) .....	88
Figura 40 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> com o rejeito puro).....	89
Figura 41 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> com o rejeito puro).....	89
Figura 42 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> com o rejeito puro) .....	90
Figura 43 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> – Rejeito puro) 90	
Figura 44 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> – Rejeito puro).....	91
Figura 45 – Variação da permeabilidade do rejeito puro .....	92
Figura 46 – Curva de compactação do rejeito + 2% de bentonita.....	93
Figura 47 – Curva de compactação do rejeito + 4% de bentonita.....	94
Figura 48 – Curva de compactação do rejeito + 6% de bentonita.....	95

Figura 49 – Curva de compactação do rejeito + 8% de bentonita.....	96
Figura 50 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com bentonita .....	97
Figura 51 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de bentonita.....	97
Figura 52 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de bentonita.....	98
Figura 53 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de bentonita.....	99
Figura 54 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de bentonita.....	100
Figura 55 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de bentonita.....	100
Figura 56 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de bentonita.....	101
Figura 57 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de bentonita.....	102
Figura 58 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de bentonita.....	103
Figura 59 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com bentonita .....	104
Figura 60 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita).....	105
Figura 61 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita) .....	105
Figura 62 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita).....	106
Figura 63 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita).....	106
Figura 64 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita) .....	107
Figura 65 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 4% de bentonita).....	107
Figura 66 – Variação da permeabilidade do rejeito com 4% de bentonita.....	108
Figura 67 – Curva de compactação do rejeito + 2% de cimento.....	110

Figura 68 – Curva de compactação do rejeito + 4% de cimento.....	111
Figura 69 – Curva de compactação do rejeito + 6% de cimento.....	112
Figura 70 – Curva de compactação do rejeito + 8% de cimento.....	113
Figura 71 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com cimento .....	114
Figura 72 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cimento .....	114
Figura 73 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de cimento.....	115
Figura 74 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cimento.....	116
Figura 75 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de cimento.....	117
Figura 76 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cimento.....	117
Figura 77 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de cimento.....	118
Figura 78 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cimento.....	119
Figura 79 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de cimento.....	120
Figura 80 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com cimento .....	121
Figura 81 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	122
Figura 82 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	122
Figura 83 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	123
Figura 84 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	123
Figura 85 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	124
Figura 86 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 2% de cimento).....	124

Figura 87 – Variação da permeabilidade do rejeito com 2% de cimento.....	126
Figura 88 – Curva de compactação do rejeito + 2% de cal .....	127
Figura 89 – Curva de compactação do rejeito + 4% de cal .....	128
Figura 90 – Curva de compactação do rejeito + 6% de cal .....	129
Figura 91 – Curva de compactação do rejeito + 8% de cal .....	130
Figura 92 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com cal.....	131
Figura 93 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cal .....	132
Figura 94 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de cal .....	133
Figura 95 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cal .....	133
Figura 96 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de cal.....	134
Figura 97 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cal .....	135
Figura 98 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de cal.....	136
Figura 99 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cal .....	136
Figura 100 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de cal.....	137
Figura 101 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com cal	138
Figura 102 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal) .....	139
Figura 103 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal) .....	140
Figura 104 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)	140
Figura 105 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal) .....	141
Figura 106 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal) .....	141
Figura 107 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal) .....	142

Figura 108 – Variação da permeabilidade do rejeito com 2% de cal .....	143
Figura 109 – Curva de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico .....	144
Figura 110 – Curva de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico .....	145
Figura 111 – Curva de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico .....	146
Figura 112 – Curva de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico .....	147
Figura 113 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com agregado siderúrgico .....	148
Figura 114 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico .....	148
Figura 115 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de agregado siderúrgico .....	149
Figura 116 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico .....	150
Figura 117 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de agregado siderúrgico .....	151
Figura 118 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico .....	152
Figura 119 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de agregado siderúrgico .....	153
Figura 120 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico .....	153
Figura 121 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de agregado siderúrgico .....	154
Figura 122 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com agregado siderúrgico.....	155
Figura 123 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 6% de agregado siderúrgico) .....	156
Figura 124 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 6% de agregado siderúrgico).....	157
Figura 125 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 6% de agregado siderúrgico) .....	157
Figura 126 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial $CIU_{SAT}$ de rejeito com 6% de agregado siderúrgico) .....	158



Figura 127 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico) .....	158
Figura 128 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico) .....	159
Figura 129 – Variação da permeabilidade do rejeito com 6% de agregado siderúrgico .....	160
Figura 130 – Curva de compactação de 90% de rejeito com 10% de estéril .....	161
Figura 131 – Curva de compactação de 80% de rejeito com 20% de estéril .....	162
Figura 132 – Curva de compactação de 70% de rejeito com 30% de estéril .....	163
Figura 133 – Curva de compactação de 60% de rejeito com 40% de estéril .....	164
Figura 134 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com estéril.....	165
Figura 135 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 90% de rejeito + 10% de estéril .....	166
Figura 136 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 90% de rejeito + 10% de estéril.....	167
Figura 137 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 80% de rejeito + 20% de estéril .....	167
Figura 138 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 80% de rejeito + 20% de estéril.....	168
Figura 139 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 70% de rejeito + 30% de estéril .....	169
Figura 140 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 70% de rejeito + 30% de estéril.....	170
Figura 141 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 60% de rejeito + 40% de estéril .....	170
Figura 142 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 60% de rejeito + 40% de estéril.....	171
Figura 143 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com estéril .....	172
Figura 144 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril) .....	173
Figura 145 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril) .....	174
Figura 146 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril) .....	174

Figura 147 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril).....	175
Figura 148 – Tensão desvio versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril).....	175
Figura 149 – Excesso de poropressão versus deformação axial (Ensaio triaxial CIU <sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril).....	176
Figura 150 – Variação da permeabilidade de 80% de rejeito com 20% de estéril.....	177
Figura 151 – Comparativo ensaio de compactação pelo método de Proctor.....	179
Figura 152 – Comparativo das envoltórias de resistência efetivas (delimitadas pela máxima tensão desenvolvida nos ensaios).....	180
Figura 153 – Comparativo da permeabilidade.....	181
Figura 154 – Variação dos resultados dos ensaios.....	182
Figura 155 – Análise comparativa das análises de estabilidade.....	190
Figura 156 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática normal – Talude direito.....	206
Figura 157 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	207
Figura 158 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática crítica – Talude direito.....	208
Figura 159 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	209
Figura 160 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Pseudoestática – Talude direito.....	210
Figura 161 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	211
Figura 162 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática normal – Talude direito.....	212
Figura 163 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	213
Figura 164 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática crítica – Talude direito.....	214
Figura 165 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	215

Figura 166 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Pseudoestática – Talude direito.....	216
Figura 167 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	217
Figura 168 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito.....	218
Figura 169 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	219
Figura 170 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito.....	220
Figura 171 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	221
Figura 172 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito.....	222
Figura 173 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	223
Figura 174 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito.....	224
Figura 175 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	225
Figura 176 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito.....	226
Figura 177 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	227
Figura 178 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito.....	228
Figura 179 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	229
Figura 180 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito.....	230
Figura 181 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	231
Figura 182 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito.....	232

Figura 183 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo .....	233
Figura 184 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito .....	234
Figura 185 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	235
Figura 186 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito.....	236
Figura 187 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	237
Figura 188 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito.....	238
Figura 189 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	239
Figura 190 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito.....	240
Figura 191 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	241
Figura 192 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito .....	242
Figura 193 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo .....	243
Figura 194 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito .....	244
Figura 195 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo .....	245
Figura 196 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito .....	246
Figura 197 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	247
Figura 198 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito.....	248
Figura 199 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	249

Figura 200 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito.....	250
Figura 201 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	251
Figura 202 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito.....	252
Figura 203 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	253
Figura 204 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito.....	254
Figura 205 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	255
Figura 206 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito .....	256
Figura 207 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo .....	257
Figura 208 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito .....	258
Figura 209 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	259
Figura 210 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito ..	260
Figura 211 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo	261
Figura 212 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito ...	262
Figura 213 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo	263
Figura 214 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito .....	264
Figura 215 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	265
Figura 216 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito.....	266

Figura 217 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	267
Figura 218 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito .....	268
Figura 219 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo .....	269
Figura 220 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito .....	270
Figura 221 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	271
Figura 222 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito .....	272
Figura 223 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo .....	273
Figura 224 – Análise de estabilidade – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito .....	274
Figura 225 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	275
Figura 226 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito .....	276
Figura 227 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo .....	277
Figura 228 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito.....	278
Figura 229 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo.....	279
Figura 230 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito.....	280
Figura 231 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	281

Figura 232 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito.....	282
Figura 233 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	283
Figura 234 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito .....	284
Figura 235 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo .....	285
Figura 236 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito.....	286
Figura 237 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo.....	287
Figura 238 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito.....	288
Figura 239 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo.....	289

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração .....	62
Tabela 2 – Fatores de Segurança mínimo para projetos de pilhas de rejeitos filtrados e compactados (dry stacking) .....	63
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização .....	81
Tabela 4 – Pontos da curva de compactação do rejeito puro.....	84
Tabela 5 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito puro.....	85
Tabela 6 – Permeabilidade do rejeito puro de acordo com os níveis de tensões de adensamento .....	92
Tabela 7 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de bentonita.....	93
Tabela 8 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de bentonita.....	94
Tabela 9 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de bentonita.....	95
Tabela 10 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de bentonita.....	96
Tabela 11 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de bentonita.....	98
Tabela 12 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de bentonita.....	99
Tabela 13 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de bentonita.....	101
Tabela 14 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de bentonita.....	102
Tabela 15 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima .....	104
Tabela 16 – Permeabilidade do rejeito + 4% de bentonita de acordo com os níveis de tensões de adensamento.....	109
Tabela 17 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de cimento.....	110
Tabela 18 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de cimento.....	111
Tabela 19 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de cimento.....	112
Tabela 20 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de cimento.....	113
Tabela 21 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cimento.....	115
Tabela 22 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cimento.....	116



Tabela 23 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cimento.....	118
Tabela 24 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cimento.....	119
Tabela 25 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima .....	121
Tabela 26 – Permeabilidade do rejeito + 2% de cimento de acordo com os níveis de tensões de adensamento.....	126
Tabela 27 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de cal.....	127
Tabela 28 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de cal.....	128
Tabela 29 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de cal.....	129
Tabela 30 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de cal.....	130
Tabela 31 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cal.....	132
Tabela 32 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cal.....	134
Tabela 33 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cal.....	135
Tabela 34 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cal.....	137
Tabela 35 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima .....	139
Tabela 36 – Permeabilidade do rejeito + 2% de cal de acordo com os níveis de tensões de adensamento .....	143
Tabela 37 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico.....	144
Tabela 38 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico.....	145
Tabela 39 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico.....	146
Tabela 40 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico.....	147
Tabela 41 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico.....	149
Tabela 42 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico.....	150
Tabela 43 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico.....	152
Tabela 44 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico.....	154

Tabela 45 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima .....	156
Tabela 46 – Permeabilidade do rejeito + 6% de agregado siderúrgico de acordo com os níveis de tensões de adensamento .....	160
Tabela 47 – Pontos da curva de compactação de 90% de rejeito com 10% de estéril .....	161
Tabela 48 – Pontos da curva de compactação de 80% de rejeito com 20% de estéril .....	162
Tabela 49 – Pontos da curva de compactação de 70% de rejeito com 30% de estéril .....	163
Tabela 50 – Pontos da curva de compactação de 60% de rejeito com 40% de estéril .....	164
Tabela 51 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 90% de rejeito + 10% de estéril .....	166
Tabela 52 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 80% de rejeito + 20% de estéril .....	168
Tabela 53 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 70% de rejeito + 30% de estéril .....	169
Tabela 54 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 60% de rejeito + 40% de estéril .....	171
Tabela 55 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima .....	173
Tabela 56 – Permeabilidade de 80% de rejeito + 20% de estéril de acordo com os níveis de tensões de adensamento.....	177
Tabela 57 – Principais resultados dos ensaios.....	182
Tabela 58 – Resultados das análises de estabilidade – Variação da altura da pilha.....	184
Tabela 59 – Resultados das análises de estabilidade – Referência.....	184
Tabela 60 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita.....	185
Tabela 61 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento.....	186
Tabela 62 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cal .....	187
Tabela 63– Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico.....	188
Tabela 64 – Resultados das análises de estabilidade – 80% de Rejeito + 20% de estéril .....	189
Tabela 65 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização da inclinação geral dos taludes (11°).....	191
Tabela 66 – Resultados das análises de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização da inclinação geral dos taludes (4°) .....	192

## Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

ANM	Agência Nacional da Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\varphi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\varphi$	Ângulo de atrito total
$\alpha$	Ângulo da trajetória de tensões totais
$\alpha'$	Ângulo da trajetória de tensões efetivas
Ac	Atividade de Skempton
CH	Cal hidratada
CP II	Cimento Portland II
Classe V	Classe do maciço, neste caso, maciço rochoso muito fraco
$k$	Coefficiente de permeabilidade
$c'$	Coesão efetiva
$c$	Coesão total
CP	Corpo de prova
$D_{particula}$	Diâmetro da partícula
CPTU	Ensaio de piezocone
RCS	Ensaio de resistência à compressão simples
CID	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente e drenado
CIU	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente e não drenado
CIU <sub>sat</sub>	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente, não drenado e saturado
$\lambda$	Fator de função utilizado nas análises de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price
$f_o$	Fator empírico para análises de estabilidade pelo método de Janbu simplificado
FS	Fator de segurança
FS <sub>mín</sub>	Fator de segurança mínimo
$\tau_{resistentes}$	Forças cisalhantes resistentes
$\tau_{instabilizantes}$	Forças cisalhantes instabilizantes
$F_{resistentes}$	Forças resistentes
$F_{instabilizantes}$	Forças instabilizantes
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente

$R_1$	Grau da qualidade da rocha, neste caso o material desagrega-se com golpe firme do bico do martelo de geólogo
$W_5$	Grau de alteração de maciços rochosos, neste caso o maciço apresenta-se completamente friável com comportamento de solo
$S_r$	Grau de saturação
Hm	Hematita
H	Horizontal
IP	Índice de plasticidade
$d$	Intercepto da trajetória de tensões totais
$d'$	Intercepto da trajetória de tensões efetivas
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LL	Limite de liquidez
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos
$M_{S_{Adit}}$	Massa seca do aditivo
$M_{S_{Rej}}$	Massa seca do rejeito
$M_{S_{Total}}$	Massa seca total
$M_{T_{Adit}}$	Massa total do aditivo (úmida)
$M_{T_{Est}}$	Massa total do estéril (úmida)
$M_{T_{Rej}}$	Massa total do rejeito (úmida)
$M_{resistentes}$	Momentos resistentes
$M_{instabilizantes}$	Momentos instabilizantes
NA	Nível de água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
B	Parâmetro B de Skempton
$T_{Mist}(\%)$	Percentual de aditivo a ser utilizado na mistura
$T_{Est}(\%)$	Percentual de estéril a ser utilizado na mistura
$\gamma_s$	Peso específico dos sólidos
$\gamma_n$	Peso específico úmido'
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_{dmáx}$	Peso específico seco máximo
PN	Pressão Neutra
$u$	Poropressão

R	Rejeito
RCS	Resistência à compressão simples
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
$\tau$	Tensão cisalhante
$\sigma'$	Tensão efetiva normal
$\sigma'_1$	Tensão principal maior efetiva
$\sigma'_3$	Tensão principal menor efetiva
$\sigma_1$	Tensão principal maior total
$\sigma_3$	Tensão principal menor total
$\sigma$	Tensão total normal
$w$	Teor de umidade
$w_{higAdit}$	Teor de umidade higroscópico do aditivo
$w_{higEst}$	Teor de umidade higroscópico do estéril
$w_{higRej}$	Teor de umidade higroscópico do rejeito
$w_{ótima}$	Teor de umidade ótimo
$p'$	Trajectoria de tensões efetivas, abscissa
$q'$	Trajectoria de tensões efetivas, ordenada
$p$	Trajectoria de tensões totais, abscissa
$q$	Trajectoria de tensões totais, ordenada
UFV	Universidade Federal de Viçosa
$g$	Valor da aceleração da gravidade ( $\sim 9,81 \text{ m/s}^2$ )
V	Vertical

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	34
2.	OBJETIVOS .....	36
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	36
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	36
3.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	37
3.1.	MINERAÇÃO DE FERRO .....	37
3.2.	METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS .....	39
3.2.1.	BARRAGENS .....	39
3.2.1.1.	MÉTODO DE ALTEAMENTO A MONTANTE .....	41
3.2.1.2.	MÉTODO ALTEAMENTO A JUSANTE.....	42
3.2.1.3.	MÉTODO DE ALTEAMENTO POR LINHA DE CENTRO.....	43
3.2.2.	ATERRO HIDRÁULICO – EMPILHAMENTO DRENADO.....	43
3.2.3.	CICLONAGEM.....	44
3.2.4.	DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA E CO-DISPOSIÇÃO .....	45
3.2.5.	ESPESSAMENTO .....	46
3.2.6.	CAVAS DESATIVADAS.....	46
3.2.7.	SUBAÉREA .....	47
3.2.8.	PILHAS DE REJEITOS FILTRADOS E COMPACTADOS – EMPILHAMENTO A SECO ( <i>DRY STACKING</i> ) .....	48
3.3.	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	54
3.3.1.	ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA .....	56
3.3.2.	ESTABILIZAÇÃO FÍSICA .....	56
3.3.3.	ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA .....	57
3.4.	ESTABILIDADE DE TALUDES .....	57
3.4.1.	ANÁLISE DETERMINÍSTICA POR EQUILÍBRIO LIMITE .....	58
3.5.	NORMAS BRASILEIRAS REGULAMETADORAS 13028 E 13029.....	60

3.6.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....	63
4.	METODOLOGIA .....	65
4.1.	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	65
4.2.	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	67
4.2.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	67
4.2.2.	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DO REJEITO PURO .....	67
4.2.3.	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS .....	68
4.2.3.1.	BENTONITA, CAL, CIMENTO E AGREGADO SIDERÚRGICO .....	68
4.2.3.2.	ESTÉRIL .....	70
4.2.4.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	71
4.2.5.	ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO ISOTROPICAMENTE E NÃO DRENADO NA CONDIÇÃO SATURADA.....	72
4.2.6.	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE .....	74
4.3.	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	75
4.4.	ESTUDO DE CASO .....	77
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	81
5.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	81
5.2.	REJEITO PURO.....	83
5.2.1.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	83
5.2.3.	ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	88
5.2.4.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	92
5.3.	MISTURAS DE REJEITO E BENTONITA.....	93
5.3.1.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	93
5.3.1.1.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE BENTONITA .....	93
5.3.1.2.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE BENTONITA .....	94
5.3.1.3.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE BENTONITA .....	94
5.3.1.4.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE BENTONITA .....	95

5.3.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	97
5.3.2.1.	RCS DE REJEITO + 2% DE BENTONITA .....	97
5.3.2.2.	RCS DE REJEITO + 4% DE BENTONITA .....	99
5.3.2.3.	RCS DE REJEITO + 6% DE BENTONITA .....	100
5.3.2.4.	RCS DE REJEITO + 8% DE BENTONITA .....	102
5.3.3.	ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL .....	104
5.3.4.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	108
5.4.	MISTURAS DE REJEITO E CIMENTO .....	109
5.4.1.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	109
5.4.1.1.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE CIMENTO .....	109
5.4.1.2.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE CIMENTO .....	110
5.4.1.3.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE CIMENTO .....	111
5.4.1.4.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE CIMENTO .....	112
5.4.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	114
5.4.2.1.	RCS DE REJEITO + 2% DE CIMENTO .....	114
5.4.2.2.	RCS DE REJEITO + 4% DE CIMENTO .....	115
5.4.2.3.	RCS DE REJEITO + 6% DE CIMENTO .....	117
5.4.2.4.	RCS DE REJEITO + 8% DE CIMENTO .....	119
5.4.3.	ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL .....	121
5.4.4.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	125
5.5.	MISTURAS DE REJEITO E CAL .....	127
5.5.1.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	127
5.5.1.1.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE CAL .....	127
5.5.1.2.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE CAL .....	128
5.5.1.3.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE CAL .....	128
5.5.1.4.	COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE CAL .....	129
5.5.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	131



5.5.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE CAL.....	131
5.5.2.2. RCS DE REJEITO + 4% DE CAL.....	133
5.5.2.3. RCS DE REJEITO + 6% DE CAL.....	135
5.5.2.4. RCS DE REJEITO + 8% DE CAL.....	136
5.5.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	139
5.5.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	142
5.6. MISTURAS DE REJEITO E AGREGADO SIDERÚRGICO .....	144
5.6.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	144
5.6.1.1. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE AGREGADO SIDERÚRGICO ....	144
5.6.1.2. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE AGREGADO SIDERÚRGICO ....	145
5.6.1.3. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO ....	145
5.6.1.4. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE AGREGADO SIDERÚRGICO ....	146
5.6.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	148
5.6.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE AGREGADO SIDERÚRGICO .....	148
5.6.2.2. RCS DE REJEITO + 4% DE AGREGADO SIDERÚRGICO .....	150
5.6.2.3. RCS DE REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO .....	151
5.6.2.4. RCS DE REJEITO + 8% DE AGREGADO SIDERÚRGICO .....	153
5.6.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	156
5.6.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	159
5.7. MISTURAS DE REJEITO E ESTÉRIL.....	161
5.7.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	161
5.7.1.1. COMPACTAÇÃO DE 90% DE REJEITO COM 10% DE ESTÉRIL .....	161
5.7.1.2. COMPACTAÇÃO DE 80% DE REJEITO COM 20% DE ESTÉRIL .....	162
5.7.1.3. COMPACTAÇÃO DE 70% DE REJEITO COM 30% DE ESTÉRIL .....	162
5.7.1.4. COMPACTAÇÃO DE 60% DE REJEITO COM 40% DE ESTÉRIL .....	163
5.7.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	166
5.7.2.1. RCS DE 90% REJEITO + 10% DE ESTÉRIL .....	166

5.7.2.2. RCS DE 80% REJEITO + 20% DE ESTÉRIL .....	167
5.7.2.3. RCS DE 70% REJEITO + 30% DE ESTÉRIL .....	169
5.7.2.4. RCS DE 60% REJEITO + 40% DE ESTÉRIL .....	170
5.7.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	173
5.7.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	176
5.8. COMPARATIVOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	178
5.9. ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....	183
6. CONCLUSÃO .....	193
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	196
APÊNDICE .....	206
ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....	206
REJEITO PURO – PILHA DE 142 m E PILHA DE 172 m .....	206
REJEITO + 4% DE BENTONITA .....	218
REJEITO + 2% DE CIMENTO.....	230
REJEITO + 2% DE CAL.....	242
REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO .....	254
80% DE REJEITO + 20% DE ESTÉRIL .....	266
REJEITO + 2% DE CAL – OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GERAL DOS TALUDES ..	278
80% DE REJEITO + 20% DE ESTÉRIL – OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GERAL DOS TALUDES .....	284

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração de minério de ferro é uma atividade de grande importância econômica para o Brasil, sendo geradora de empregos e renda em diversas regiões. Além disso, o minério de ferro é a base de diversos produtos essenciais para a sociedade. Com a extração e beneficiamento deste material são gerados os chamados rejeitos. Os rejeitos são materiais sem valor agregado, que são provenientes do processo mineral e que necessitam ter uma destinação que apresente o menor impacto socioambiental possível.

Para a disposição destes materiais, a princípio inservíveis, existem algumas alternativas que podem ser implementadas. As mais usuais são as barragens de rejeitos, porém, devido aos últimos acidentes ocorridos em decorrência da falha de algumas destas estruturas, que proporcionaram soterramento de áreas circundantes, resultando em destruição, poluição ambiental e várias mortes (CONSOLI *et al.*, 2022), o estado e os órgãos fiscalizadores e regulamentadores da mineração, Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM e Agência Nacional de Mineração – ANM, restringiram utilização destas estruturas, com a criação de algumas legislações mais restritivas. Dentre elas, a Resolução n° 95/2022 da ANM, a Resolução n° 13/2019 da ANM, a Lei Estadual 23291/2019, a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM 2784/2019 e a Lei Federal 12334/2010 complementada pela Lei 14266/2020.

De acordo com a organização sem fins lucrativos *World Mine Tailings Failures* (2020), 45 falhas de estruturas de barragens ocorreram entre 2009 e 2019. Além disso, um relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2017) documentou algumas dessas falhas significativas em termos de perda de vidas e em termos de danos ambientais. Alguns dos incidentes ocorridos entre 2015 e 2020 são: Fundão, 2015 (Brasil); Nova Walles, 2016 (EUA); Tonglushan, 2017 (China); Mishor Rotem, 2017 (Israel); Brumadinho, 2019 (Brasil); e Hpakant, 2020 (Myanmar), entre outros (CONSOLI *et al.*, 2022, ISLAM *et al.*, 2021 e LYU *et al.*, 2019).

Sendo assim, houve a necessidade da intensificação de buscas de alternativas tecnológicas que fossem economicamente viáveis e que apresentassem maior segurança e menor dano potencial envolvido. Desta forma, observou-se uma oportunidade na disposição de rejeito através do empilhamento a seco de rejeito filtrado e compactado (*dry stacking*).

Dentre os benefícios que podem ser identificados para a disposição dos rejeitos em pilhas, Pimenta (2011) indica os ganhos quanto à segurança devido à redução da saturação

dos rejeitos, o fato da estrutura apresentar uma maior capacidade e vida útil, a maior facilidade de fechamento e recuperação ambiental do local, além da existência de uma boa capacidade de suporte para tráfego de equipamentos. Conforme Guimarães (2011), identifica-se também ganhos com demandas de áreas, devido à necessidade de menores regiões para a disposição de rejeitos em pilhas quando comparados com as barragens de rejeitos.

Diferentemente das barragens, as pilhas são estruturas que necessitam que a disposição de rejeitos tenha controles similares a obras de aterros convencionais. Dentre os controles essenciais, tem-se a compactação em camadas do rejeito filtrado em altos percentuais do Proctor normal, ou intermediário, ou modificado, dependendo do tipo de material e projeto. Outro ponto é que, durante esta compactação, o rejeito deve atender à um valor máximo de desvio de umidade em relação à umidade ótima ( $w_{ótima}$ ). Além disso, controles da geração de propressão devem ser executados durante todo o processo de empilhamento. Sendo assim, as pilhas apresentam um rigor muito maior em relação à disposição de rejeitos em barragens, que geralmente é realizada através de espigotamento de polpa para dentro dos reservatórios.

Com isto, em alternativa às barragens, o *dry stacking* tem se tornado um tipo de solução para a disposição de rejeitos adotada por diversas mineradoras no Brasil. Desta forma, tem-se identificado a criação de projetos de pilhas de rejeitos filtrados e compactados cada vez maiores e mais robustos. Porém, muitas vezes são observadas limitações geotécnicas para a implantação destas estruturas, afinal as características resistentes dos rejeitos muitas vezes não são propícias à empilhamentos de elevadas alturas.

Além disso, existem limitações operacionais para um empilhamento dos rejeitos de forma ágil, devido à umidade residual que este material ainda apresenta quando filtrado. Havendo necessidade, desta forma, de um longo período de tratamento do rejeito para que ele seja compactado na umidade adequada.

Neste contexto se insere o presente estudo, que avalia a aplicação de aditivos em diferentes percentuais para estabilização do rejeito de minério de ferro filtrado, no intuito de avaliar o novo comportamento do material. Espera-se que sejam identificadas oportunidades de ganhos operacionais, com o aumento da umidade ótima da mistura, e para a segurança geotécnica destas pilhas de rejeitos compactado, com o aumento da resistência ao cisalhamento do material.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.OBJETIVO GERAL**

O objetivo desta pesquisa é avaliar materiais e produtos que possam ser utilizados como aditivos para a estabilização do rejeito de minério de ferro filtrado, além da criação de alguns conceitos de aplicação da mistura nos empilhamentos compactados. Estes conceitos foram avaliados através de análises de estabilidade para determinação dos ganhos geotécnicos obtidos com a aplicação dos aditivos.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para os objetivos específicos desta pesquisa tem-se a identificação e a avaliação, por meio de ensaios, de materiais ou produtos que sejam competentes para a estabilização/melhoramento do rejeito de minério de ferro filtrado. Sendo assim, podem ser definidos os seguintes pontos:

- Pesquisa de aditivos que estabilizem o rejeito de minério de ferro, apresentando aumento do valor da umidade ótima do material, sem que para isso ocorram perdas de resistência, se comparado com o rejeito natural. Esta avaliação é importante para identificação de ganhos operacionais de manejo do rejeito;
- Avaliação de misturas com diversos teores dos aditivos estudados visando identificar aquelas que apresentem maior ganho de resistência ao cisalhamento, porém atento a aspectos práticos e econômicos;
- Determinação de conceitos de projeto para aplicação dos rejeitos aditivados nas pilhas visando-se o aumento dos Fatores de Segurança (FS);
- Realização de análises de estabilidade através do equilíbrio-limite, no intuito de se observar os ganhos de resistência para a estrutura; e
- Otimização da capacidade volumétrica das pilhas proporcionado pela estabilização do material e aumento dos Fatores de Segurança (FS).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. MINERAÇÃO DE FERRO

Desde o final do último milênio, observa-se que o mercado do minério de ferro tem crescido constantemente, principalmente devida à expansão do mercado chinês com o aumento da demanda deste produto.

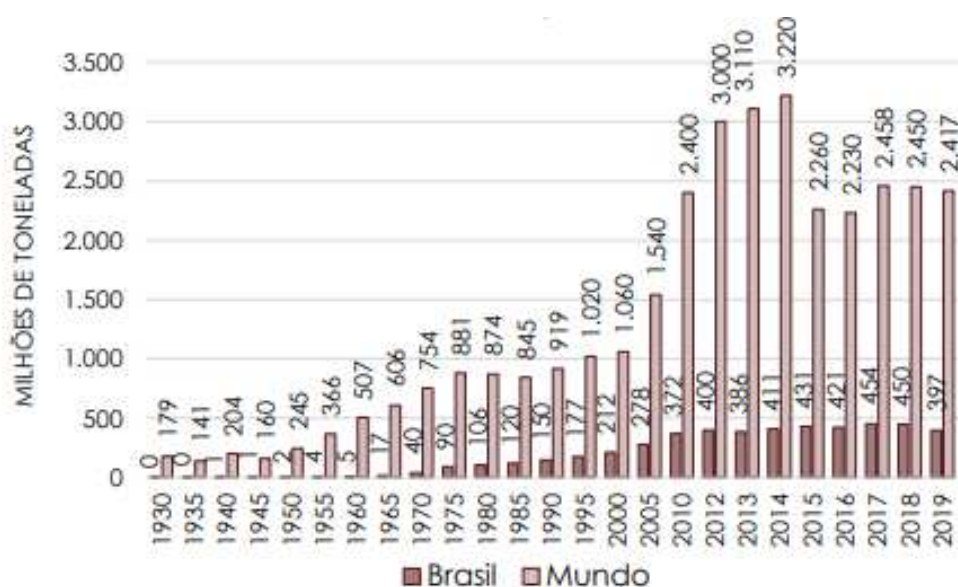
De acordo com Valadão *et al.* (2007) este aumento de demanda está aliado com o aumento do preço do minério de ferro e à uma exploração de volumes cada vez maiores de produtos com menores teores de ferro.

Conforme indicado pelo Boletim do Setor Mineral de 2020, estima-se que existam cerca de 172 bilhões de toneladas de minério de ferro em reservas ainda espalhadas pelo planeta.

É importante mencionar que, segundo Jesus *et al.* (2018), cerca de 19,8% de todas as reservas mundiais estão contidas em regiões brasileiras.

Na Figura 1, pode-se observar a crescente produção de minério de ferro não somente no Brasil, mas também ao redor de todo o mundo.

Figura 1 – Produção de minério de ferro histórica do Brasil e do mundo

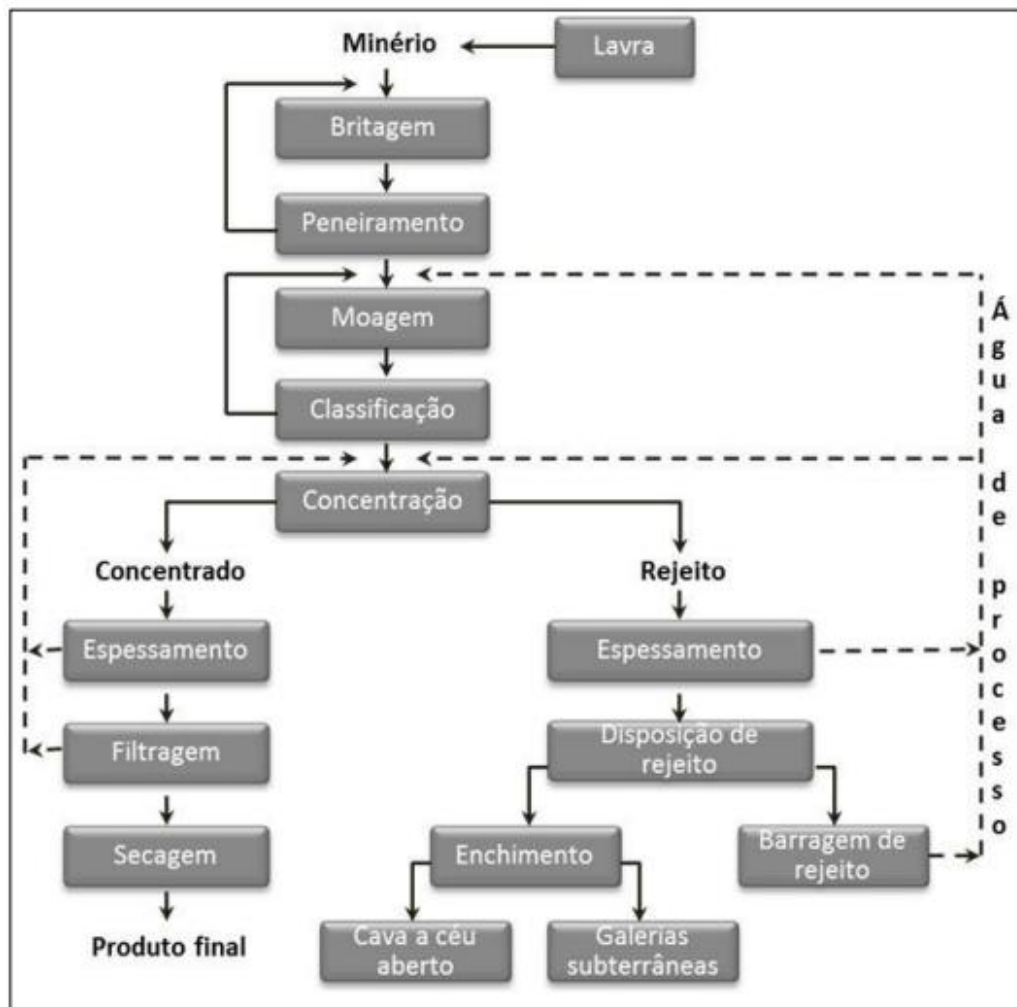


Fonte: Brasil, 2020a

Conforme indicado por Brasil (2020b), em 2019 cerca de 80,0% da mineração brasileira era de metais e cerca de 72,8% era de minério de ferro, o que reforça ainda mais a importância desta mineração para a economia nacional.

O processo de exploração de minério bruto nas jazidas, através de lavra, não indica a extração de material pronto para a venda. Muitas vezes é necessário o beneficiamento do mineral (MILONAS, 2006). Para este beneficiamento mineral são necessários os processos de britagem, moagem e classificação do minério bruto, o que proporciona a geração minérios granulados e finos (LUZ *et al.*, 2010). Na Figura 2 é apresentado o fluxograma do processo típico de beneficiamento mineral.

Figura 2 – Processo típico de beneficiamento mineral



Fonte: Luz *et al.*, 2018

Durante a produção são utilizadas grandes quantidades de água e são gerados os chamados rejeitos (LUZ *et al.*, 2010). Estes rejeitos são considerados como materiais

inservíveis, não apresentam valor comercial e são constituídos principalmente por finos de rocha britada, produtos químicos e água (LI *et al.*, 2018 e KOSSOFF *et al.*, 2014). Conforme definido pela ABNT NBR 13028 (2017a), o rejeito é todo material descartável proveniente do processo de beneficiamento do mineral que tem sua destinação planejada, de forma a minimizar os riscos provenientes da disposição e reduzir os impactos ambientais.

Para a disposição destes rejeitos existem diversas alternativas presentes nas literaturas e que são praticadas pelas empresas mineradoras. Conforme Portes (2013), tem-se as barragens, o aterro hidráulico, a disposição em cava, a codisposição de materiais estéreis da mina e rejeitos, a disposição subaérea e a disposição por empilhamento a seco (*dry stacking*).

### **3.2. METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS**

O Guia de Boas Práticas – Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos (IBRAM, 2019), indica que estruturas de disposição de rejeitos são as estruturas de engenharia que abrangem todos os componentes envolvidos, de modo a proporcionar o gerenciamento de rejeitos e de sedimentos, desde sistemas de distribuição, de recuperação de água, de barragens, de diques, de cavas e de empilhamentos.

É indicado também pelo Instituto Brasileiro da Mineração – IBRAM (2019) que a escolha da metodologia de disposição de rejeitos mais adequada está associada a questões como a natureza do processo de beneficiamento mineral, condições geológicas e topográficas, propriedades mecânicas dos rejeitos, impacto ambiental previsto e condições climáticas.

Deste modo, serão apresentadas a seguir as alternativas usualmente utilizadas no Brasil, de modo a proporcionar uma destinação adequada aos rejeitos gerados no processo de beneficiamento mineral.

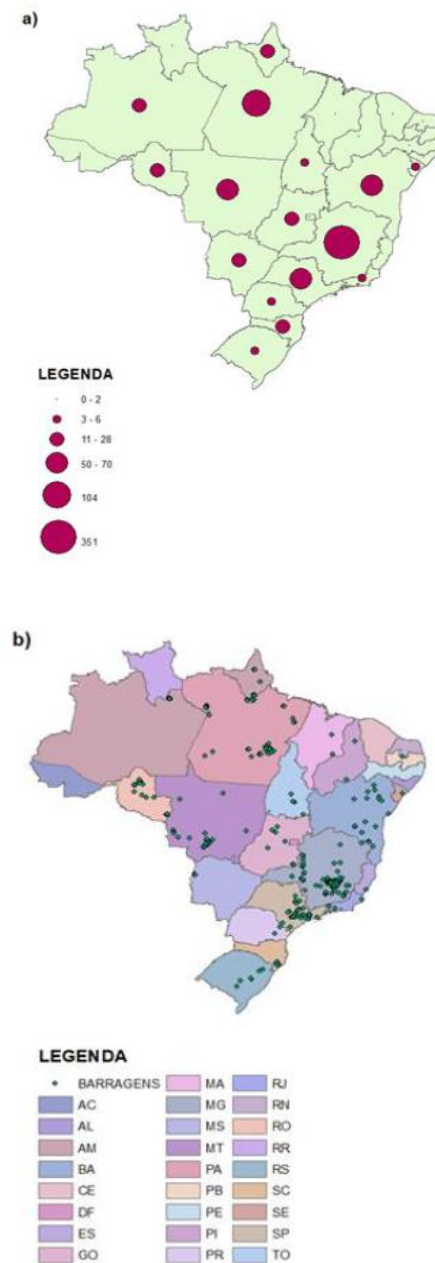
#### **3.2.1. BARRAGENS**

Barragens de rejeitos são estruturas de contenção de água e sólidos em suspensão provenientes do processo de beneficiamento mineral. Tais estruturas são executadas em forma de aterro compactado de modo a conter/barrar todo rejeito armazenado em seu reservatório (RIBEIRO, 2019).

Até o ano de 2020, foram identificados registros de 769 barragens de rejeito de mineração, das quais a maior parte está inserida nos estados de Minas Gerais, Pará, São Paulo, Mato Grosso e Bahia (LEAL *et al.*, 2022), conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3 – a) Mapa infográfico das barragens de rejeito nos estados brasileiros; b) Disposição espacial das barragens de rejeito no Brasil



Fonte: Leal *et al.*, 2022

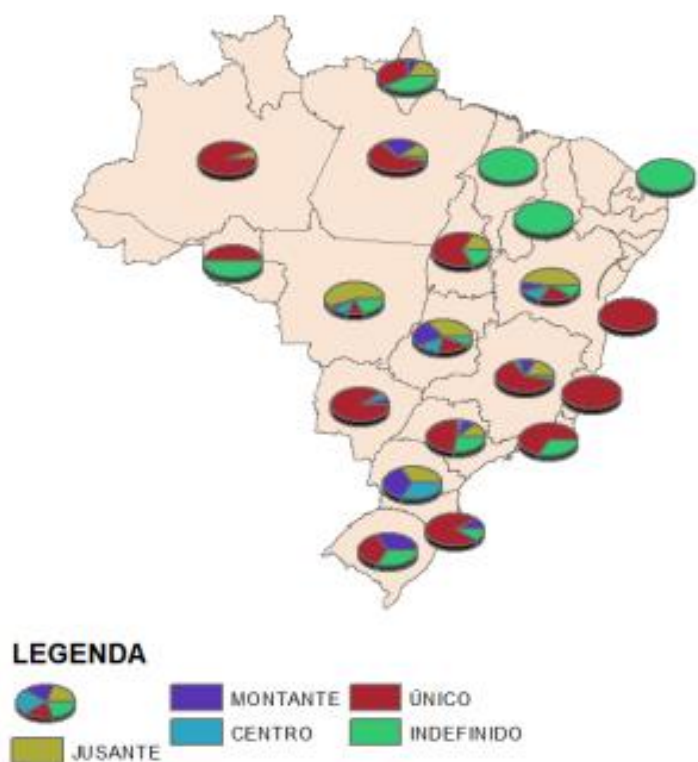
Para a construção de barragens existem algumas metodologias de aterro do maciço, o método a montante, o método a jusante e o método de linhas de centro (RIBEIRO, 2019).

Com base no método construtivo, a Figura 4 indica como acontece a distribuição das metodologias de alteamento em cada um dos estados brasileiros. Pode ser observado que o método construtivo mais utilizado são as barragens sem alteamento, construídas em etapa

única. Porém, observa-se também que nos estados de Minas Gerais, Pará e São Paulo é comum a utilização de alteamentos devido ao grande volume de rejeito gerado pela mineração nestes estados (LEAL *et al.*, 2022).

Outro ponto importante a ser mencionado é que, devido às legislações e resoluções atuais do Brasil, a utilização das barragens como metodologia de disposição de rejeitos tem se tornado cada vez mais proibitiva, em especial as barragens alteadas pelo método de montante, vide a Resolução n° 95/2022 da ANM, resolução mais recente publicada no território nacional sobre o assunto.

Figura 4 – Distribuição das metodologias construtivas de barragens de rejeito empregadas no território brasileiro



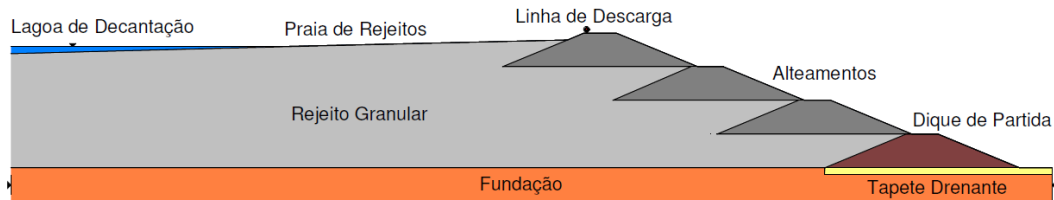
Fonte: Leal *et al.*, 2022

### 3.2.1.1.MÉTODO DE ALTEAMENTO A MONTANTE

Segundo indicado pelo IBRAM (2016) e por Cardozo *et al.* (2016), o método de alteamento de barragens a montante é o mais antigo, de construção mais fácil e com maior atratividade econômica. Após realizada a construção do dique de partida, o rejeito é lançado a montante da linha de simetria do dique (Figura 5), formando assim a praia de deposição, que

se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento (ARAÚJO, 2006).

Figura 5 – Barragem – Alteamento a montante



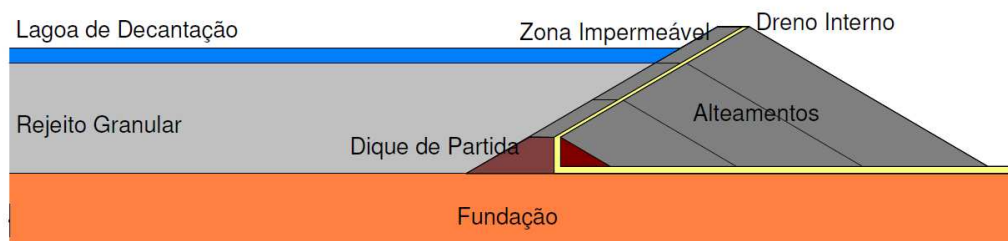
Fonte: Albuquerque Filho, 2004

Segundo Araújo (2006), o método de alteamento de montante apresenta um baixo controle construtivo, o que indica situação crítica em relação à segurança geotécnica da estrutura. Além disso, os alteamentos são realizados sobre materiais previamente depositados e sem a sua devida consolidação. Ou seja, sobre material saturado, fofo, com baixa resistência ao cisalhamento e com susceptibilidade à liquefação, seja por carregamentos estáticos ou dinâmicos.

### 3.2.1.2. MÉTODO ALTEAMENTO A JUSANTE

De acordo com Albuquerque Filho (2004), o método de alteamento de barragens a jusante consiste na construção dos alteamentos sempre a jusante do dique de partida inicial, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Barragem – Alteamento a jusante



Fonte: Albuquerque Filho, 2004

Neste método de alteamento a jusante, nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado e, conseqüentemente, pouco consolidado. Além disso, o processo construção da barragem pode apresentar maior controle. Segundo Araújo (2006), o

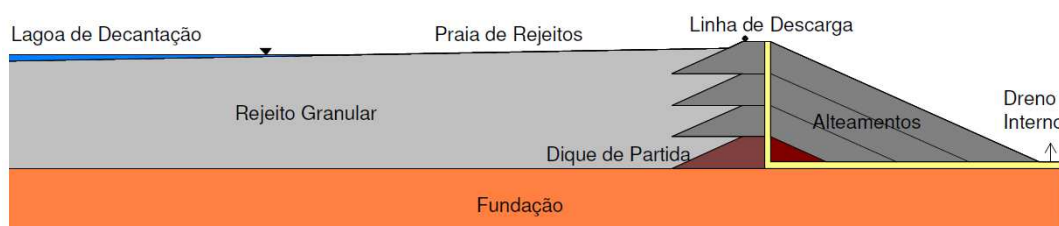
método a jusante necessita de maiores volumes de material, que acarreta maiores custos associados ao empréstimo de solo. Além do mais, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos pode ser maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura.

### 3.2.1.3. MÉTODO DE ALTEAMENTO POR LINHA DE CENTRO

O método de alteamento de barragens por linha de centro consiste na construção dos alteamentos sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento a jusante, em um eixo vertical a partir do dique de partida, chamado de linha de centro (Figura 7).

Segundo Albuquerque Filho (2004), de maneira geral, o método da linha de centro pode ser considerada uma solução geometricamente intermediária entre os dois métodos anteriormente descritos.

Figura 7 – Barragem – Alteamento por linha de centro



Fonte: Albuquerque Filho, 2004

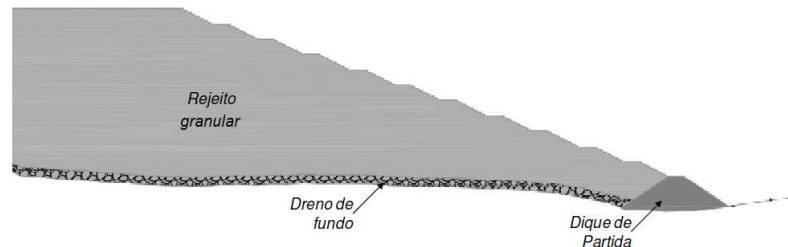
### 3.2.2. ATERRO HIDRÁULICO – EMPILHAMENTO DRENADO

Conforme indicado por Alves (2015), o método de disposição de rejeito através de aterro hidráulico ou empilhamento drenado é indicado especificadamente para rejeitos com granulometrias predominantemente arenosas. Usualmente o rejeito é transportado através de polpa e é disposto conforme a metodologia de execução de aterro hidráulico, na qual o rejeito é lançado da crista dos taludes e são realizados alteamentos a montante da estrutura.

Segundo a Resolução nº 95/2022 da ANM o empilhamento drenado é toda estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido, podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área. Atualmente, conforme esta mesma Resolução, este tipo de estrutura é enquadrado na Política Nacional de Barragens.

Para a implantação destas estruturas é construído um dique de partida no fundo dos vales e drenos de fundo, conforme Figura 8.

Figura 8 – Seção típica de um empilhamento drenado



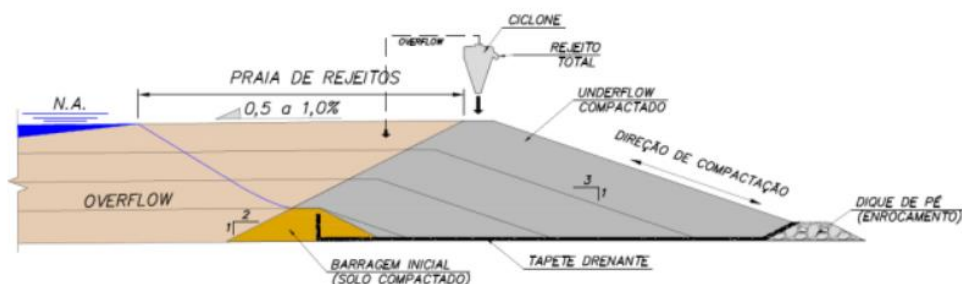
Fonte: Alves, 2015

É importante mencionar que Gomes (2009) recomenda que esta metodologia seja indicada para rejeitos que apresentem boa capacidade de drenagem, afinal a segurança destes tipos de estruturas está condicionada ao fluxo livre da água, ou seja, sem geração de poropressão.

### 3.2.3. CICLONAGEM

Segundo Peixoto (2012), inicialmente a ciclonagem é a retirada de água da polpa, além de separar os rejeitos com granulometrias distintas. A separação que é realizada é a divisão do *overflow* (rejeito fino) do *underflow* (rejeito grosso). Com esta divisão, é possível a utilização do *underflow* para a conformação da estrutura de contenção, conforme Figura 9. Com a construção do barramento, o *overflow* é lançado a montante, de forma que este material também tenha destinação adequada.

Figura 9 – Barragem de aterro hidráulico utilizando ciclones para separação dos rejeitos em *underflow* e *overflow*



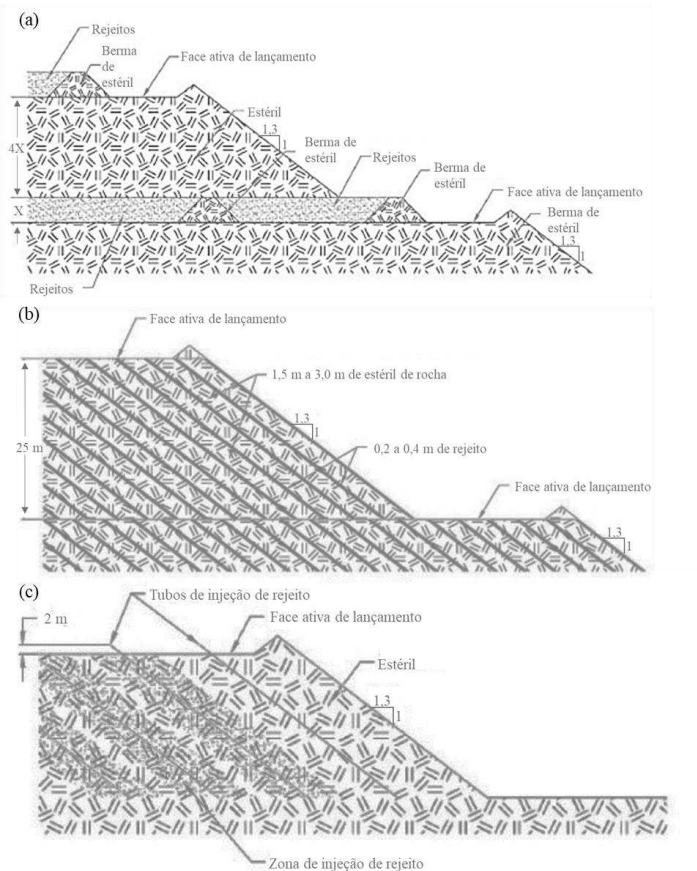
Fonte: Mafra, 2016

### 3.2.4. DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA E CO-DISPOSIÇÃO

A disposição conjunta de rejeitos e estéreis de mina em um mesmo depósito pode ocorrer de forma independente, técnica denominada disposição compartilhada, ou através da mistura destes materiais, que pode se dar previamente ou no próprio local de disposição, definida como co-disposição. Estas duas técnicas de disposição, geralmente, se tornam vantajosas quando existe alguma restrição de áreas para disposição dos materiais (SILVA, 2014).

Na técnica de disposição compartilhada, as soluções mais empregadas incluem células de rejeitos em depósito de estéril; disposição de rejeitos em finas camadas e injeção dos rejeitos nos depósitos dos estéreis (SILVA, 2014), Figura 10.

Figura 10 – Disposição compartilhada de rejeitos e estéril: (a) células de rejeitos em depósito de estéril; (b) camadas alternadas de estéril e rejeitos; (c) injeção de rejeitos em depósito de estéril



Fonte: Leduc *et al.*, 2003

### 3.2.5. ESPESSAMENTO

Nesse procedimento são utilizados espessadores que separam os sólidos dos líquidos mediante sedimentação de partículas por gravidade, com utilização de alguns reagentes (PORTES, 2013).

Conforme apresentado por Gomes (2009), os rejeitos espessados podem ser depositados tanto em áreas planas quanto em regiões que se apresentem irregulares. Em se tratando de vales, a pasta viscosa tende a fluir e a se adensar, conformando à topografia do terreno ou sendo barrada por um dique de contenção a ser construído. Em áreas planas, a disposição do rejeito forma estruturas cônicas de taludes, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Formação de cone sobre o rejeito depositado na Mina de Bulanhanhu

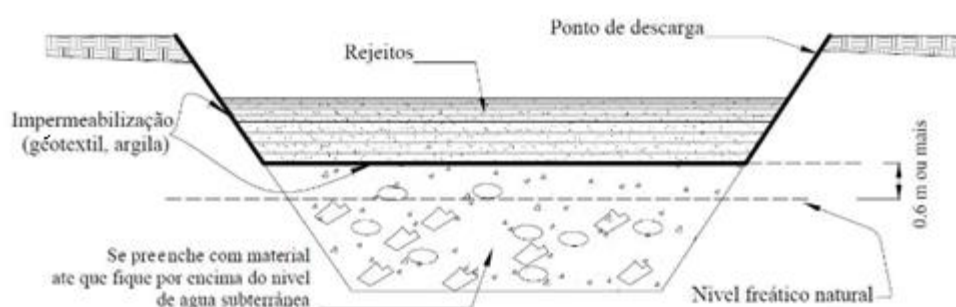


Fonte: Gomes, 2009

### 3.2.6. CAVAS DESATIVADAS

Esta metodologia consiste no lançamento de rejeito em cavas exauridas ou desativadas de modo que não seja necessária a construção de quaisquer estruturas de barramento para a contenção dos materiais (LOZANO, 2006), Figura 12.

Figura 12 – Disposição em cava exaurida



Fonte: Adaptado de Lozano, 2006

Portes (2013) indica que as principais vantagens desta metodologia de destinação dos rejeitos envolvem a recuperação das áreas já lavradas, ao mesmo tempo em que ocorre o processo de lavra em outras regiões, a redução do impacto ambiental e visual, e a redução de riscos associados.

### 3.2.7. SUBAÉREA

Na disposição subaérea, menos usual, o rejeito fino é depositado em finas camadas (Figura 13), no qual são permitidos o adensamento e o ressecamento do material, antes do lançamento da próxima camada. Essa técnica provoca uma maior densificação do material e um aumento significativo na sua resistência (PORTES, 2013). Esta metodologia também reduz a propressão, podendo gerar sucção (ULRICH *et al.*, 2000).

Figura 13 – Detalhes da disposição de pasta em torres, formando três finas camadas sobrepostas



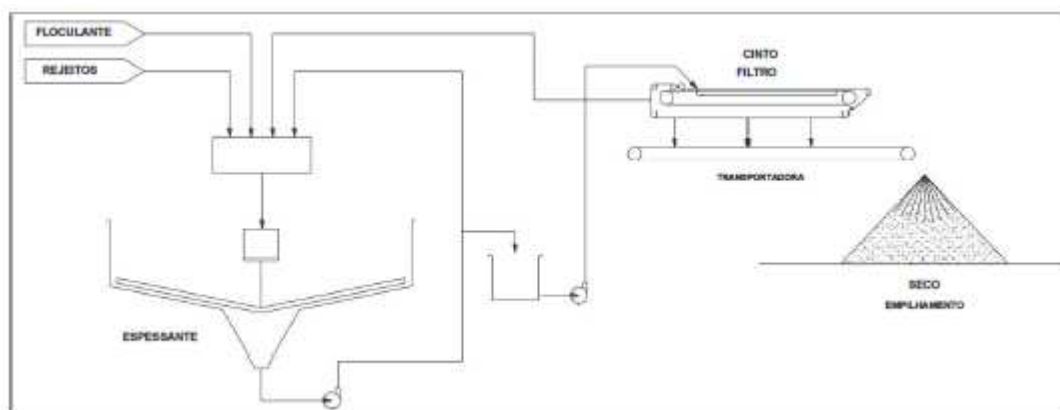
Fonte: Portes, 2013



### 3.2.8. PILHAS DE REJEITOS FILTRADOS E COMPACTADOS – EMPILHAMENTO A SECO (*DRY STACKING*)

Para a viabilização desta metodologia é necessária a implantação das estruturas industriais chamadas de filtragens de rejeitos. A filtragem de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos, através da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido, Figura 14. Dado o elevado teor de sólidos do rejeito filtrado, este não permite ser bombeado em tubulação, e dessa forma, é necessário o transporte por caminhões ou correias transportadoras até os locais de empilhamento.

Figura 14 - Fluxograma geral de uma filtragem de rejeitos



Fonte: Lara *et al.* (2013)

Estes rejeitos podem ser filtrados “a úmido” (*wet cake*) ou filtrados “a seco” (*dry cake*). Os rejeitos filtrados a úmido apresentam grau de saturação próxima de 100%. Já os rejeitos filtrados a seco apresentam grau de saturação de 70 a 85% (DAVIES, 2011).

A filtragem pode ocorrer por diferentes processos, seja por gravidade, vácuo, pressão, capilaridade, centrifugação ou até mesmo por fluxo electrocinético, sendo que os processos por vácuo, pressão e hiperbáricos são os mais comumente utilizados (GIUMARÃES *et al.*, 2012).

Quanto aos tipos de filtros existentes e mais comuns, citam-se os seguintes:

- Filtros de disco convencionais e de discos cerâmicos;
- Filtros hiperbáricos (encapsulados);
- Filtros horizontais de correia (aplicável a uma faixa ampla de rejeitos); e
- Filtros tipo prensa – horizontal ou vertical (mais indicados a materiais finos).

Segundo Ulrich (2019) é consensual o fato de que a filtragem dos rejeitos oferece vantagens significativas e que deve ser considerada como uma opção para criação de projetos de novos depósitos de rejeitos.

Sendo assim, com o surgimento destas tecnologias para redução da umidade de rejeitos, houve a possibilidade da maior aplicabilidade dos empilhamentos a seco (*dry stacking*) de rejeitos filtrados e compactados, Figura 15.

Figura 15 – Pilha de rejeitos filtrados e compactados



Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado por Carvalho (2017), o termo *dry stacking* é utilizado para indicação de empilhamentos a seco de rejeitos filtrados e compactados. Porém, ao contrário do entendimento que o termo induz, este material não se encontra totalmente seco, contendo alguma umidade, e o processo de empilhamento se dá similarmente às obras de terraplanagem, com o controle de camadas através das compactações executadas pelos equipamentos de operação (LARA *et al.*, 2013). É importante ressaltar que, conforme indicado por Villavicencio *et al.* (2016), a estabilidade de estruturas de rejeitos está ligada diretamente à compactação do material, que pode reduzir consideravelmente o seu potencial de liquefação (comportamento contrátil). Na Figura 16 e na Figura 17 pode-se observar a execução do tratamento e da compactação de uma camada em uma pilha de rejeitos filtrados e compactados.

Figura 16 – Tratamento de camadas de rejeitos nas pilhas



Fonte: Autoria própria

Figura 17 – Compactação de camadas de rejeitos nas pilhas



Fonte: Autoria própria

Lara *et al.* (2013), indica que os critérios para aplicação da metodologia de disposição de rejeitos *dry stacking* baseiam-se nas necessidades de remoção de barragens de rejeitos, de redução dos riscos associados à disposição deste material, às condições topográficas facilitadas para a execução das atividades de empilhamento, à reduzida frequência de sismos

na região e à capacidade da planta de filtragem reduzir a umidade dos rejeitos para umidades próximas à de compactação.

Dentre os pontos apresentados por Lara *et al.* (2013), observa-se grande desafio sobre as questões relacionadas à eficácia da filtragem, afinal existem limitações tecnológicas envolvidas para redução da umidade dos rejeitos, e a precipitação local, que é intensa entre os meses de outubro e março na região do Quadrilátero Ferrífero. A problemática da umidade dos rejeitos é um dos itens avaliados nesta pesquisa.

Além disso, Crystal *et al.* (2018) indica que o excesso de umidade ainda presente nos rejeitos filtrados (entre 19% e 22% para o rejeito estudado neste trabalho) condicionam a necessidade da existência de pilhas de armazenamento temporário, nas quais o material deve ser secado para posteriormente ser levado à pilha definitiva para compactação na especificação desejada. Conforme observado operacionalmente e indicado por Crystal *et al.* (2018) este prazo decorre de, pelo menos, 8 a 10 dias para a redução desta umidade.

Estudos apresentados por Lupo *et al.* (2010) mostram que a disposição através de pilhas de rejeitos filtrados não se limita a rejeitos com baixo teor de finos, uma vez que os avanços dos processos de filtragem e dos equipamentos utilizados possibilitam filtrar materiais relativamente finos com bons resultados.

Para Davies (2004), esta metodologia apresenta grande vantagem se comparada a outros métodos de disposição de rejeitos, principalmente pela facilidade de recuperação e desativação da pilha, afinal podem ser executadas revegetações dos bancos concluídos desde o início da construção da estrutura, gerando assim menores impactos quanto aos processos erosivos da estrutura e reduzindo a geração de poeira.

Em geral, observa-se que as pilhas de rejeitos são soluções mais seguras do ponto de vista geotécnico e dos possíveis dados associados (impactos ambientais e sociais), permitem recirculação da água e apresentam custos de monitoramento reduzido (GOMES *et al.*, 2016).

Contudo, conforme apresentado por Portes (2013), para que as condições de maior segurança possam ser observadas, é importantíssimo que a pilha esteja dotada de um sistema de drenagem interna eficiente e que os rejeitos apresentem permeabilidade que permitam a drenabilidade do material, de forma a não impactar a estabilidade da estrutura com a geração de excesso de poropressão positiva.

Conforme reforçado por Crystal *et al.* (2018), as drenagens das pilhas são fundamentais para um bom desempenho da estrutura, em especial as drenagens nas bases e zonas periféricas da pilha, afinal existe um risco de saturação destes locais à medida que as elevações da estrutura ocorrem ao longo do tempo, até mesmo pela potencial presença de nascentes de água.

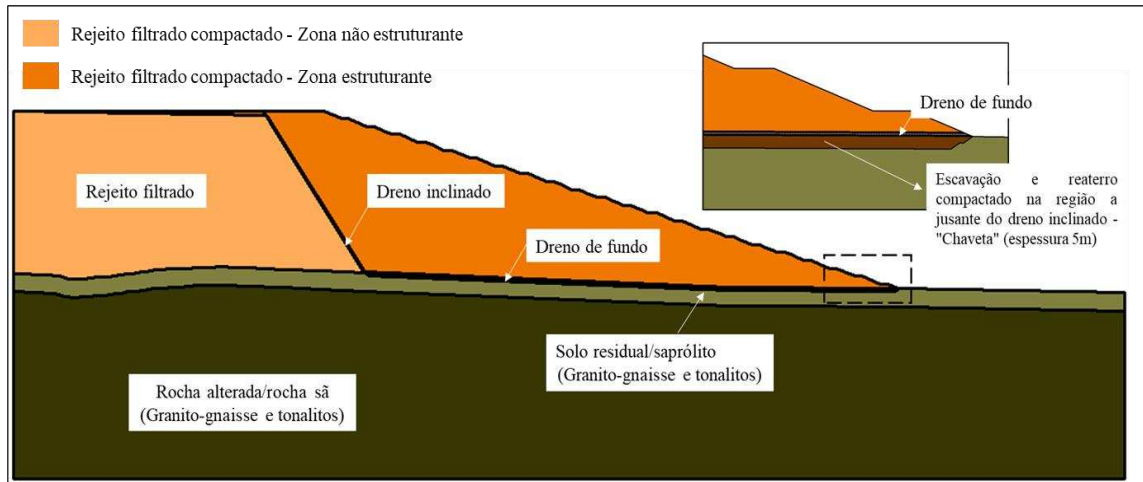
Além disso, a perfeita drenagem destas pilhas evita a geração de poropressões e conseqüente reduz a susceptibilidade à liquefação em caso de materiais que apresentem comportamento contrátil. Situação essa que pode ser observada em pilhas com disposições de rejeitos com características contrativas, com altas umidades, com baixo grau de compactação (GC) e com níveis de tensões elevados.

Normalmente, o produto da filtragem, quando compactado, apresenta baixa compressibilidade e baixa condutividade hidráulica. Porém, se os rejeitos filtrados são altamente compressíveis ou as taxas de empilhamento são altas, existe a possibilidade de diminuição da porosidade até tal ponto que o material da pilha se torne totalmente saturado, e assim, qualquer carregamento adicional originaria excesso de poropressão positiva na estrutura e na fundação, comprometendo a sua estabilidade física (CRYSTAL *et al.*, 2018). Já a baixa condutividade hidráulica, combinada à baixa saturação do material, apresenta um aspecto positivo no que diz respeito à minimização das infiltrações na pilha (LUPO *et al.*, 2010).

Uma possível solução para este problema da estabilidade física da pilha é a consideração de um zonamento da estrutura, de modo a suportar o material do núcleo da pilha submetido à elevados níveis de tensões. Solução esta que tem sido adotada como uma boa prática da engenharia de pilhas (CRYSTAL *et al.*, 2018), Figura 18.

É importante mencionar que, mesmo com a existência da zona estruturante, a realização de controles de compactação é extremamente necessária para todo o período de disposição do material empilhado.

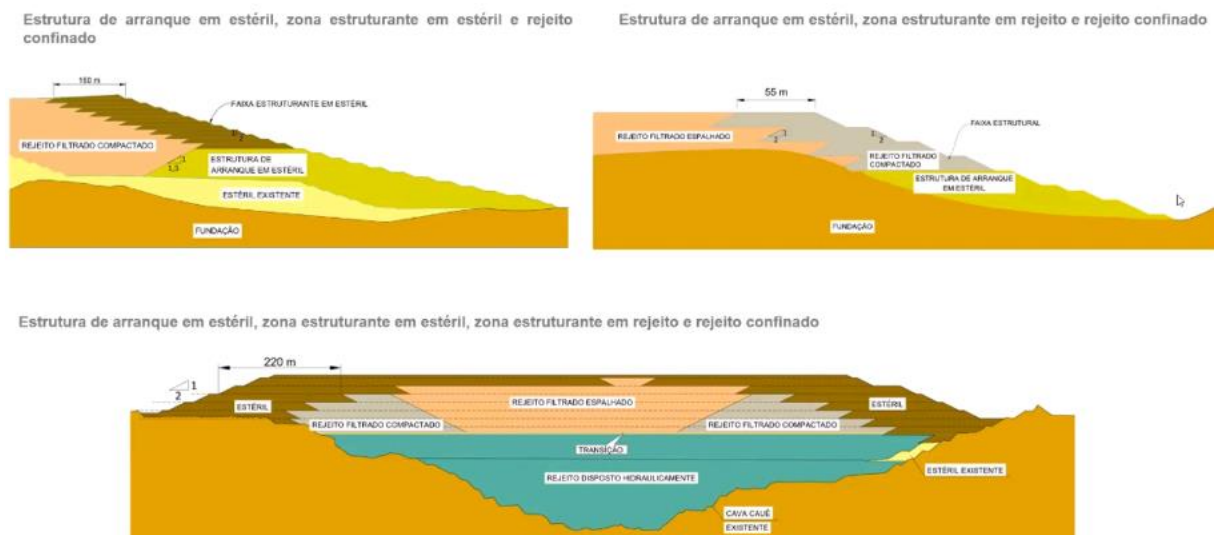
Figura 18 – Empilhamento de rejeito filtrado e compactado



Fonte: Acervo técnico pessoal

Abaixo são apresentadas outras soluções de sequenciamento e zonamento do empilhamento dos rejeitos filtrados e compactados também utilizados na indústria da mineração, Figura 19.

Figura 19 – Soluções alternativas de sequenciamento do empilhamento dos rejeitos filtrados e compactados



Fonte: Acervo técnico pessoal

### 3.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

No decorrer da realização de obras geotécnicas podem ser identificados solos que apresentem condições que estão em desacordo com o projeto, em geral solos que apresentem baixa capacidade de suporte ou baixa resistência. Para isto, existem algumas alternativas para que sejam minimizados estes problemas (MEDINA *et al.*, 2004 & NEGI *et al.*, 1999):

- Evitar a implantação das obras em local que apresente material de má qualidade;
- Projetar de acordo com a situação do terreno, ou seja, considerar no projeto a presença de solo de baixa resistência na estrutura da obra;
- Remover o solo ruim do local das obras e substituí-lo por outro de melhores qualidades; e
- Tratar o solo para que ele melhore suas características mecânicas, por meio de técnicas de estabilização dos solos, que podem ser de forma mecânica, física (granulométrica), química, elétrica, térmica e/ou por inclusões.

Conforme apresentado por Mousavi *et al.* (2017), a estabilização de solos é uma prática antiga, desenvolvida de forma rudimentar, e que foi aprimorada ao longo dos tempos. Tal prática vem sendo muito utilizada para uma maior eficiência e economia nos projetos e obras geotécnicas. A ideia principal é maximizar as características do solo para que ele possa se adequar ao uso proposto.

Dentre os principais aditivos utilizados, tem-se a cal, o cimento, os restos ígneos, o betume e diversas substâncias sintéticas (ANDAVAN *et al.*, 2019), sendo as técnicas para estabilização dos solos com agentes cimentantes as mais bem estabelecidas da atualidade. Dentre elas tem-se a utilização de misturas de solo com cimento *Portland* ou solo com cal (BASHA *et al.*, 2004).

A estabilização dos solos pode melhorar diversas características, principalmente as de resistência e deformabilidade, sejam elas pela diminuição da compressibilidade, aumento da resistência ao cisalhamento, diminuição ou aumento da permeabilidade do material e evolução das propriedades de compactação do material (MEDINA *et al.* 2004).

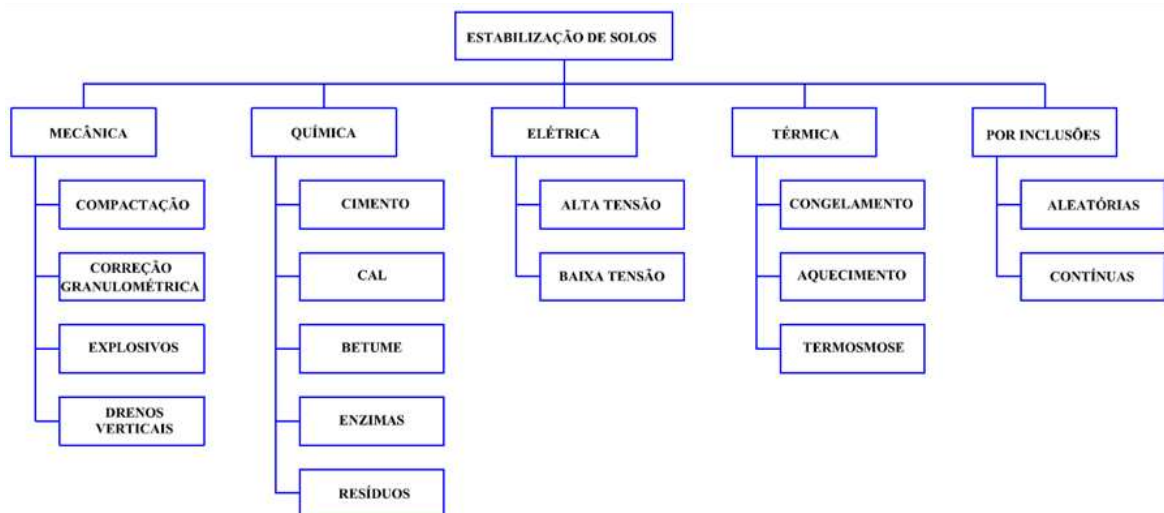
Segundo Medina *et al.* (2004), a estabilização pode ser classificada de acordo com o grau de melhoria do material. Sendo elas:

- Melhoria geral das propriedades: como, por exemplo, a compactação (estabilização mecânica);

- Melhoria moderada das propriedades: como, por exemplo, a estabilização física (granulométrica) ou com adição em pequenas quantidades de aditivos químicos (cimento, cal etc.);
- Melhoria radical das propriedades: como, por exemplo, a utilização ampla de aditivos químicos;
- Tratamento contra os impactos decorrentes da água: como, por exemplo, os revestimentos asfálticos e membranas;
- Tratamento contra poeira e erosão: como, por exemplo, a aplicação de cloreto de sódio, cloreto de cálcio etc.

Conforme apresentado por Júnior (2006) e Negi *et al.*, (1996), existem diversos tipos de estabilização (Figura 20), os principais tipos de estabilizações são a mecânica, a física e a química. Estes tipos de estabilização são os mais aplicados em obras de terra, e serão abordados com mais detalhes a seguir.

Figura 20 - Tipos de estabilização de solos



Fonte: Acervo técnico pessoal

Para a estabilização física e química (Figura 21) a escolha do produto indicado para o melhoramento do solo depende do tipo de uso, e a sua proporção de aplicação depende de realização de ensaios que indiquem a obtenção das características almejadas.



Figura 21 – Uso de cal hidratada para estabilização química dos rejeitos



Fonte: Autoria própria

### **3.3.1. ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA**

De acordo com Medina *et al.* (2004), a estabilização mecânica é o método mais utilizado e antigo para a estabilização de solos em obras geotécnicas. Este método consiste na aplicação de energia externa para a compactação e redução dos vazios presentes no solo, proporcionando maior resistência aos esforços aos quais será submetido.

Além dos ganhos de resistência, ocorre a modificação da compressibilidade e permeabilidade do solo com este tipo de estabilização (MEDINA *et al.*, 2004).

Mesmo a estabilização mecânica de solos sendo amplamente utilizada, existem alguns casos em que somente a compactação não é suficiente para que sejam atingidas as condições exigidas em projeto e, desta forma, a estabilização mecânica deve ser utilizada em conjunto com outros métodos de estabilização (SANTOS, 2012).

### **3.3.2. ESTABILIZAÇÃO FÍSICA**

A estabilização física consiste na mistura de dois ou mais tipos de solos em proporções adequadas para que o material resultante tenha granulometria bem graduada, de tal forma que ocorra preenchimento dos vazios com as partículas finas, gerando aumento de resistência por meio do contato entre partículas maiores (VILLIBOR, 1982).

É importante ressaltar que, após este tipo de estabilização, deve ser realizada a compactação adequada do material e, desta forma, os ganhos de resistência possam ser observados.

### 3.3.3. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A estabilização química consiste na adição de um ou mais produtos químicos que provoquem a aglomeração/solidificação por reação com as partículas de solo. Esta reação provoca vedação dos poros, reduzindo a permeabilidade do material. Como exemplo deste tipo de estabilização, tem-se a adição de cal, cimento *Portland* e a emulsão asfáltica (MEDINA *et al.*, 2004).

Medina (2004), indica ainda que a mistura de solo com estabilizador pode:

- Modificar a superfície das partículas como, por exemplo, a adição de cal;
- Vedar os poros como, por exemplo, a adição de silicato de cálcio; e
- Interconectar as partículas de solo por pontos de contato.

### 3.4. ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade visa a avaliação da possibilidade de ocorrência de movimentos de massa em taludes naturais ou artificiais que instabilizem a estrutura. Ela tem o objetivo de determinar de forma quantitativa um índice chamado Fator de Segurança (FS), que serve para uma melhor compreensão do comportamento dos taludes em uma situação de ruptura. Além disso, é importante ressaltar que este movimento de massas é condicionado às ações e cargas as quais a estrutura está submetida.

Para Vieira *et al.* (1997) existem diversos fatores que contribuem para a geração de movimentos de massas em taludes de solos, com destaque para a conformação morfológica do terreno (declividade, orientação, perfil, número de bancos, dentre outros), o regime pluviométrico, o regime de fluxo de águas no interior dos taludes (volume e intensidade de chuva, permeabilidade do solo, umidade, dentre outros), as propriedades do próprio solo (granulometria, mineralogia, coesão, atrito interno, dentre outros) e a proteção superficial (cobertura vegetal, camada de proteção com solo de maior competência).

A partir das diversas características que definem a estabilidade ou não dos taludes, faz-se necessária a identificação do Fator de Segurança que represente esta estrutura geotécnica. De acordo com Silva (2006), a necessidade de determinação deste fator, impulsionou a

criação de diversos métodos de análise de estabilidade. Estes métodos podem ser baseados em estados de equilíbrio-limite dos esforços (forças e momentos) atuantes nas superfícies de ruptura da estrutura, ou podem ser baseados também na análise tensão *versus* deformação, empregando métodos numéricos e modelos constitutivos.

Para a indicação dos valores de Fatores de Segurança mínimos para os taludes, existem normativas brasileiras com esta finalidade, como por exemplo, a ABNT NBR 11682 (ABNT, 2009a): Estabilidade de Taludes, a ABNT NBR 13028 (2017a): Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos e a ABNT NBR 13029 (2017b): Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.

### 3.4.1. ANÁLISE DETERMINÍSTICA POR EQUILÍBRIO LIMITE

Nas análises determinísticas de estabilidade de taludes, diferentemente das análises probabilísticas, não existe uma avaliação estatística da possibilidade de ruptura do talude (SOARES, 1996).

Na grande maioria das vezes estas análises de estabilidade de taludes são desenvolvidas com base nos cálculos de equilíbrio-limite, em que se considera que existem condições de equilíbrios de forças e/ou momentos atuantes nas superfícies de ruptura (AGUILERA, 2010). Com isto é definido o Fator de Segurança, que indica a relação da resistência do talude com os esforços atuantes em tal estrutura, Equação 1, Equação 2 e Equação 3.

- Equilíbrio de forças:

$$FS = \frac{\Sigma F_{resistentes}}{\Sigma F_{instabilizantes}} \quad (\text{Equação 1})$$

- Equilíbrio de momentos:

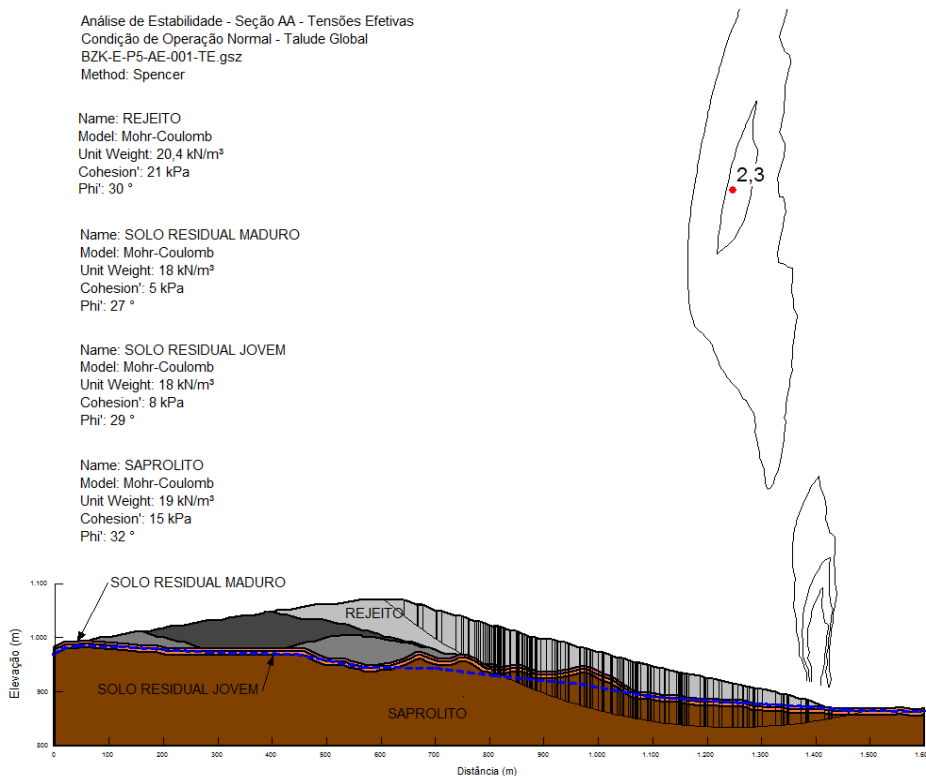
$$FS = \frac{\Sigma M_{resistentes}}{\Sigma M_{instabilizantes}} \quad (\text{Equação 2})$$

- Resistência ao cisalhamento:

$$FS = \frac{\Sigma \tau_{resistentes}}{\Sigma \tau_{instabilizantes}} \quad (\text{Equação 3})$$

Valores de FS igual à 1 representam condição de equilíbrio-limite do talude, valores maiores que a unidade representam segurança quanto à possíveis rupturas, e valores inferiores a unidade não indicam condição física real, afinal o talude já haveria deslizado nesta situação. Na Figura 22, tem-se uma exemplificação de uma análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados e compactados através do método de equilíbrio-limite.

Figura 22 – Análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos filtrados e compactados através dos cálculos de equilíbrio-limite



Fonte: Acervo técnico pessoal

O principal benefício da utilização do equilíbrio-limite nas análises de estabilidade de taludes é a simplicidade, devido à quantidade reduzida de parâmetros necessários que são requeridos. Entretanto, sua análise implica na premissa de que os valores adotados são representativos de toda a unidade geológico-geotécnica para as quais eles foram adotados. Ou seja, os valores dos parâmetros de resistência são considerados representativos do comportamento médio dos materiais que compõem cada camada discretizada no modelo. Em geral são necessários apenas as configurações geométricas do talude, topografia, indicação de cargas estáticas e dinâmicas, definição dos parâmetros geotécnicos e hidrogeológicos. Porém, este tipo de análise não considera as avaliações de tensão *versus* deformação do material e o Fator de Segurança é sempre constante ao longo da superfície de ruptura (BABA *et al.*, 2012).

Segundo Abramson *et al.* (2001), os métodos de análise de estabilidade por equilíbrio-limite diferem de acordo com as simplificações existentes em cada modelo. Estes modelos utilizam o método de lamelas, que trabalham com a discretização de áreas do talude, de uma determinada superfície de falha, subdividindo-a. O equilíbrio destas fatias é avaliado de forma individual. Dentre estes modelos, tem-se:

- Método de Fellenius – superfície de ruptura circular, calculado unicamente através de equilíbrio de momentos e não considera forças tangenciais e normais nas fatias;
- Método de Bishop Simplificado – superfície de ruptura circular, considera a resultante das forças entre fatias horizontal e as forças verticais entre lamelas como nulas;
- Método de Janbu Generalizado – superfície de ruptura qualquer e a resultante das forças entre fatias é determinada por uma linha de empuxo assumida;
- Método de Janbu Simplificado – superfície de ruptura qualquer, a resultante das forças entre fatias é horizontal e um fator empírico ( $f_0$ ) é utilizado para considerar as forças verticais interlamelares;
- Método de Spencer – superfície de ruptura qualquer, utiliza o equilíbrio de forças e momentos, e a resultante das forças entre fatias tem inclinação constante através da massa deslizando;
- Método de Morgenstern-Price – superfície de ruptura qualquer, a direção da resultante das forças entre fatias é determinada pelo uso de uma função arbitrária, onde  $\lambda$  é um fator da função que deve satisfazer o equilíbrio de forças e momentos e as lamelas de espessura finita; e
- Método de Sarma – superfície de ruptura qualquer, utiliza o equilíbrio de forças e momentos, considera a massa deslizando dividida em fatias e que a resistência interna entre lamela é mobilizada.

### **3.5. NORMAS BRASILEIRAS REGULAMETADORAS 13028 E 13029**

Atualmente não existem normativas brasileiras regulamentadoras para o desenvolvimento de projetos de engenharia de pilhas de rejeitos filtrados e compactados (*dry stacking*), desta forma, como alternativa ao desenvolvimento deste tipo de projeto as empresas de engenharia buscam mesclar normas existentes voltadas para barragens e pilhas de estéril, de modo que os projetos sejam implantados levando em consideração as orientações destas normativas.

Para a ABNT NBR 13029 (2017b), Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha, indica que os projetos de pilhas de estéril devem atender as análises de estabilidade e Fator de Segurança mínimo ( $FS_{\min}$ ) de acordo com o item 4.5.9 desta mesma norma, conforme descrito abaixo:

“Os seguintes fatores de segurança devem ser considerados:

- a) ruptura do talude geral:
  - superfície freática normal: fator de segurança mínimo de 1,50;
  - superfície freática crítica: fator de segurança mínimo de 1,30;
- b) ruptura do talude entre bermas:
  - face predominante de solo: fator de segurança mínimo de 1,50;
  - face predominante de rocha: fator de segurança mínimo de 1,30.”

Desta forma, para as análises de estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados e compactados, empresas de engenharia e consultoria têm utilizado as mesmas condicionantes listadas para pilhas de estéril:

- Ruptura do talude geral:
  - Superfície freática normal, com Fator de Segurança mínimo de 1,50; e
  - Superfície freática crítica, com Fator de Segurança mínimo de 1,30.
- Ruptura de talude entre bermas:
  - Superfície freática normal, face predominantemente de solo, com Fator de Segurança, mínimo de 1,50; e
  - Superfície freática crítica, face predominantemente de solo, com Fator de Segurança, mínimo de 1,30.

A superfície freática crítica é definida como um aumento no nível de água (NA) na estrutura do empilhamento. A utilização da prática da elevação do NA em pilhas de estéril para representar a situação crítica do empilhamento é muito comum, afinal muitas vezes o estéril apresenta comportamento dilatante trabalhando, desta forma, em condições de resistência drenada.

Já a ABNT NBR 13028 (2017a), Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água –

Requisitos, determina que os projetos de barragens de mineração devem atender as análises de estabilidade e Fator de Segurança mínimo de acordo com a Tabela 1 desta mesma norma, Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

<b>Fase</b>	<b>Tipo de ruptura</b>	<b>Talude</b>	<b>Fator de segurança mínimo</b>
Final de Construção <sup>a</sup>	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1
<sup>a</sup> Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como “final de construção”, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.			

Fonte: ABNT NBR 13028 (2017a)

Considerando as informações apresentadas na Tabela 1, pode-se observar que algumas análises não são aplicáveis para projetos de pilhas de rejeitos filtrados e compactados, desta forma, torna-se pertinente a utilização somente das avaliações:

- Ruptura do talude geral:
  - Solicitação sísmica, com Fator de Segurança mínimo de 1,10.

- Ruptura de talude entre bermas:
  - Solicitação sísmica, com Fator de Segurança mínimo de 1,10.

Sendo assim, como boa prática de projetos de pilhas de rejeitos filtrados e compactados, utiliza-se a distribuição de análises de estabilidade com Fatores de Segurança mínimo ( $FS_{\text{mín}}$ ) conforme listado abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de Segurança mínimo para projetos de pilhas de rejeitos filtrados e compactados (*dry stacking*)

<b>Fase</b>	<b>Talude</b>	<b>Fator de Segurança mínimo</b>
Superfície freática normal	Global	1,50
	Entre bermas	1,50
Superfície freática crítica	Global	1,30
	Entre bermas	1,30
Solicitação sísmica (pseudoestática)	Global	1,10
	Entre bermas	1,10

Fonte: Autoria própria

### **3.6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE**

Para a realização das análises de estabilidade, conforme orientado pela ABNT NBR 13028 (2017a), em condições drenadas de carregamento, as avaliações devem ser em termos de tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento.

Já para as condições de carregamento não drenado, em que se observa a geração de excesso de poropressão positiva, a própria ABNT NBR 13028 (2017a) também orienta a utilização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenada.

As condições apresentadas acima são aplicáveis para as análises de estabilidade em condições de superfície freática normal e crítica; já para as análises pseudoestáticas, é necessária a definição dos parâmetros de aceleração da gravidade.

Conforme indicado pelo Manual de critérios de obras civis de usinas hidrelétricas da Eletrobrás (2003), a análise de estabilidade perante terremotos é rotineiramente considerada em zonas sísmicas e tem sido recomendada mesmo em zonas historicamente assísmicas, em virtude da possibilidade de sismos induzidos. Sendo assim, recomenda-se através das análises



pseudoestáticas a avaliação das condições de sismos naturais ou induzidos adotando-se cargas sísmicas correspondentes a acelerações de 0,05g na direção horizontal e 0,03g na direção vertical.

Deste modo, como boa prática da engenharia, observa-se a utilização das condicionantes apresentados acima também para análises de estabilidade pseudoestáticas em pilhas de rejeitos.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

O desenvolvimento desta pesquisa visou a identificação de materiais aditivos que estabilizem o rejeito de minério de ferro a ser aplicado em pilhas de rejeitos filtrados e compactados (*dry stacking*), no intuito de aumentar o valor de umidade ótima e/ou serem identificados ganhos de resistência na mistura.

Neste estudo, foram definidos cinco tipos de materiais a serem aditivados ao rejeito. Foram realizadas misturas de cada um dos materiais, variando-se os teores aplicados. Para os produtos provenientes do mercado, o percentual variou de 2% até 8% em relação à massa seca do rejeito. Já para o estéril, que faz parte do processo mineral, houve variação do percentual de 10% até 40% em relação à massa total seca da mistura, visando a co-disposição dos materiais. Abaixo serão definidos os produtos e os percentuais utilizados para o desenvolvimento deste estudo:

- Rejeito de minério de ferro total (*overflow e underflow*) de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero – rejeito estudado;
- Bentonita sódica comercializada pela empresa BRX Minérios, para fins e aplicação em perfuração de poços, impermeabilização de solos e impermeabilização de aterros sanitários – aditivo 1. Aplicado em percentuais de massa seca do rejeito de 2%, 4%, 6% e 8%;
- Cimento Portland CP II-E-32, pega rápida, da marca Liz – aditivo 2. Aplicado em percentuais de massa seca do rejeito de 2%, 4%, 6% e 8%;
- Cal hidratada comum CH III, Supercal, da marca Ical – aditivo 3. Aplicado em percentuais de massa seca do rejeito de 2%, 4%, 6% e 8%;
- Agregado siderúrgico (fração granulométrica da escória de aciaria) de uma empresa siderúrgica do Rio de Janeiro – aditivo 4. Aplicado em percentuais de massa seca do rejeito de 2%, 4%, 6% e 8%; e
- Estéril, predominantemente filito, da mesma mineradora do Quadrilátero Ferrífero – aditivo 5. Aplicado em percentuais de massa seca total da mistura de 10%, 20%, 30% e 40%, no intuito de avaliar a relação rejeito estéril durante a vida útil da mina.

Após a execução das misturas, foram avaliados os comportamentos de cada uma das amostras com a aplicação dos ensaios descritos abaixo:

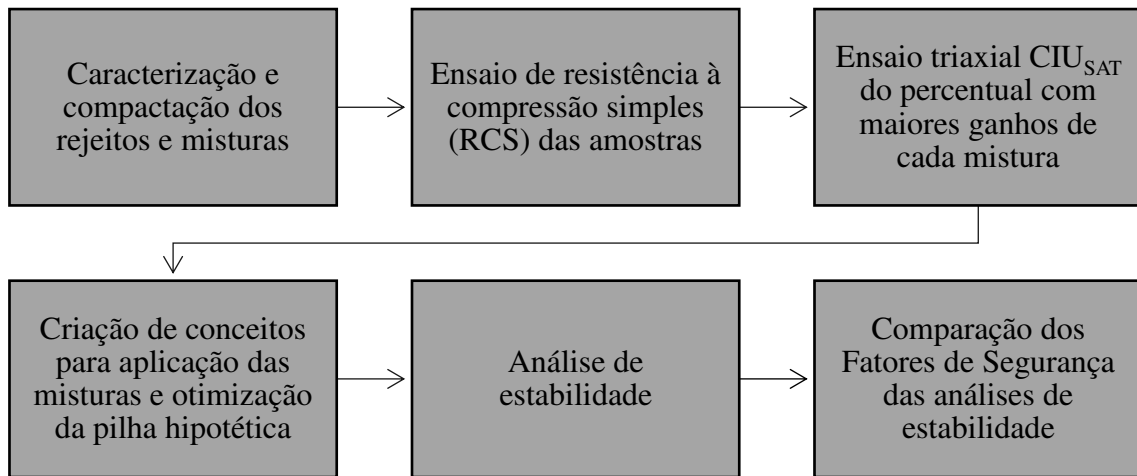
- Ensaios de caracterização do rejeito puro e das misturas:
  - Análise granulométrica;
  - Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ );
  - Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ );
  - Determinação do limite de liquidez;
  - Determinação do limite de plasticidade; e
  - Difração de raio-X (somente do rejeito puro).
- Ensaios de compactação do rejeito puro e das misturas:
  - Proctor normal.
- Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) do rejeito puro e das misturas;
- Ensaios de compressão triaxial do rejeito puro e de algumas misturas:
  - Adensados não drenados saturados ( $CIU_{SAT}$ ).
- Determinação da permeabilidade do rejeito puro e de algumas misturas através do ensaio triaxial  $CIU_{SAT}$ .

Antes da etapa de realização dos ensaios triaxiais foram identificados, para cada um dos tipos de misturas, o percentual de aditivo que apresentasse maiores vantagens com o aumento da umidade ótima, observadas através dos ensaios do Proctor normal e/ou do aumento da resistência à compressão simples.

Após a realização dos triaxiais, foram propostos modelos de utilização das misturas em uma seção crítica de uma pilha hipotética. Com isto, foram realizadas análises de estabilidade determinísticas, através do equilíbrio-limite, para identificação dos ganhos nos Fatores de Segurança e de otimização da estrutura.

Na Figura 23, é apresentado um fluxograma de trabalho da pesquisa.

Figura 23 – Fluxograma de trabalho da pesquisa



Fonte: Autoria própria

## 4.2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios realizados no intuito de avaliar os ganhos com a aplicação dos aditivos no rejeito de minério de ferro foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UFV (LEC – UFV).

### 4.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para a realização dos ensaios de caracterização, tanto no rejeito natural, quanto nas misturas, foram utilizadas as normativas apresentadas a seguir:

- ABNT NBR 6457 (2016a): Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- ABNT NBR 6458 (2016b): Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água;
- ABNT NBR 6459 (2016c): Solo – Determinação do limite de liquidez;
- ABNT NBR 7180 (2016d): Solo – Determinação do limite de plasticidade; e
- ABNT NBR 7181 (2016e): Solo – Análise granulométrica.

### 4.2.2. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DO REJEITO PURO

Para os ensaios de compactação do rejeito puro, foram seguidas as seguintes normativas brasileiras:

- ABNT NBR 6457 (2016a): Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização; e
- ABNT NBR 7182 (2016f): Solo – Ensaio de compactação.

Para o desenvolvimento dos ensaios, na fase de preparação das amostras, todo o material teve que ser espalhado em bandejas mantidas em abrigo de sol até atingir o teor de umidade higroscópico ( $w_{hig_{Rej}}$ ). Após esta etapa ocorreu a homogeneização e armazenamento das amostras em bombonas plásticas. Sempre que o rejeito era retirado destes recipientes para a realização de ensaios, eram realizadas determinações do teor de umidade higroscópico ( $w_{hig_{Rej}}$ ) de modo a identificar possíveis variações do teor.

No ensaio de compactação foram preparadas inicialmente porções de rejeito com massa úmida de 3,0 kg ( $M_{T_{Rej}}$ ). Com a adição de água para que os teores de umidade do material fossem atingidos, as amostras eram homogeneizadas e deixadas em repouso durante um período de 24 h antes da realização dos ensaios de compactação pelo método de Proctor.

Após esta etapa foi realizado o ensaio de compactação com a utilização da energia normal e com o uso do cilindro pequeno, afinal toda a amostra deste rejeito e das misturas passaram integralmente na peneira de abertura de 4,8 mm.

Com a finalização do ensaio foi possível a determinação dos parâmetros de compactação do rejeito, constituídos pela umidade ótima ( $w_{ótima}$ ) e pelo peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ).

### **4.2.3. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS**

Nos ensaios de compactação com as misturas de rejeitos com os demais aditivos, foram utilizados para cada uma das amostras os percentuais de materiais descritos no capítulo 4.1 e as referências normativas da ABNT NBR 6457 (2016a) e NBR 7182 (2016f). É importante frisar que as proporções de bentonita, cal, cimento e agregado siderúrgico tiveram como referência a massa seca do rejeito ( $M_{S_{Rej}}$ ). Já as proporções de estéril tiveram como referência a massa seca total da mistura ( $M_{S_{Total}}$ ).

#### **4.2.3.1. BENTONITA, CAL, CIMENTO E AGREGADO SIDERÚRGICO**

Para cada um dos teores de percentual de mistura de bentonita, cal, cimento e agregado siderúrgico também foram separadas porções de rejeito, com teor de umidade

higroscópico medido ( $w_{hi g_{Rej}}$ ) e massa úmida total ( $M_{T_{Rej}}$ ). Após isso, tomando-se como referência os valores de  $M_{T_{Rej}}$  e de  $w_{hi g_{Rej}}$ , foi determinada a massa seca de cada porção de rejeito ( $M_{S_{Rej}}$ ), conforme Equação 4 abaixo:

$$M_{S_{Rej}} = \frac{M_{T_{Rej}}}{1 + w_{hi g_{Rej}}} \quad (\text{Equação 4})$$

Tendo como referência o percentual de aditivo a ser utilizado na mistura ( $T_{Mist}(\%)$ ), a massa seca do aditivo ( $M_{S_{Adit}}$ ) foi adicionada às porções de rejeito preparadas para o ensaio de compactação. Esta massa de aditivo foi calculada com base no valor de  $M_{S_{Rej}}$ , de acordo com a Equação 5:

$$M_{S_{Adit}} = \left( \frac{T_{Mist}(\%)}{100} \right) \cdot M_{S_{Rej}} \quad (\text{Equação 5})$$

Com isto, a massa úmida do aditivo  $M_{T_{Adit}}$ , a ser misturado, pôde ser calculada levando em consideração o teor de umidade higroscópica ( $w_{hi g_{Adit}}$ ) também retirado do material aditivado, conforme Equação 6:

$$M_{T_{Adit}} = M_{S_{Adit}} \cdot (1 + w_{hi g_{Adit}}) \quad (\text{Equação 6})$$

Após a realização dos cálculos do valor de  $M_{T_{Adit}}$ , foram preparadas porções de aditivo para serem acrescentados às porções de rejeito puro para a realização dos ensaios de compactação pelo método de Proctor. Com a adição de homogeneização dos materiais, foi necessária a aplicação de quantidades de água para que os teores de umidade necessários para a realização da compactação fossem alcançados. Após a adição da água e nova homogeneização da mistura, as porções foram deixadas em repouso por um período de 24 h antes de proceder à sua compactação.

No caso das misturas de rejeito e cimento, e de rejeito e cal, em função das reações que ocorrem após a adição de água à mistura, o procedimento de execução do ensaio foi diferenciado em relação aos outros dois materiais. Neste caso, em cada porção de rejeito, foi adicionada a massa de cimento e de cal, calculada ( $M_{T_{Adit}}$ ), procedeu-se à sua homogeneização, adicionou-se a respectiva quantidade de água, fez-se nova homogeneização e, a seguir, deixou-se a mistura em repouso por um período em torno de 30 min, antes de realizar sua compactação.

#### 4.2.3.2. ESTÉRIL

Pelo fato de o estéril estudado apresentar uma pequena quantidade de material com diâmetro superior a 4,8 mm e pela moldagem do Proctor ter sido realizada em cilindros pequenos, todo o material retido nesta peneira foi descartado para a realização dos ensaios. Conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016f), o cilindro pequeno somente pode ser utilizado quando a amostra, após preparação, passa integralmente na peneira de 4,8 mm. Com isso, também não houve problemas quanto à moldagem dos corpos de prova (CP) para o ensaio de compressão triaxial CIUSAT, uma vez que a ASTM D4767 (ASTM, 2011) recomenda que o tamanho da maior partícula presente no solo não seja superior a 1/6 do diâmetro do CP. Como os CPs do ensaio triaxial são moldados com diâmetro igual a 50,4 mm, o máximo tamanho de partícula permitido seria igual a 8,4 mm.

O cálculo das quantidades de rejeito e de estéril usados para compor cada mistura estudada foi realizado fixando-se inicialmente a massa seca total da mistura ( $M_{S_{Total}}$ ), a qual verificou-se ser suficiente para cada ponto do ensaio de compactação. Como a massa seca de estéril ( $M_{S_{Est}}$ ) foi calculada em relação à massa seca total da mistura ( $M_{S_{Total}}$ ), Equação 7, o valor da  $M_{S_{Est}}$ , a ser adicionado, com um teor de estéril igual a  $T_{Est}$  (%), pôde ser calculada pela Equação 8.

$$M_{S_{Total}} = M_{T_{Est}} + M_{T_{Rej}} \quad (\text{Equação 7})$$

$$M_{S_{Est}} = \left( \frac{T_{Est}(\%)}{100} \right) \cdot M_{S_{Total}} \quad (\text{Equação 8})$$

Com isto, a massa úmida do aditivo ( $M_{T_{Est}}$ ), a ser misturado, pôde ser calculada levando em consideração o teor de umidade higroscópica ( $w_{hig_{Est}}$ ) também retirado do material aditivo, conforme Equação 9.

$$M_{T_{Est}} = M_{S_{Est}} \cdot (1 + w_{hig_{Est}}) \quad (\text{Equação 9})$$

Deste modo, a massa seca de rejeito ( $M_{S_{Rej}}$ ), a ser adicionada a uma mistura com um teor de estéril igual a  $T_{Est}$  (%), pode ser calculada conforme a Equação 10.

$$M_{S_{Rej}} = \left( \frac{100 - T_{Est}(\%)}{100} \right) \cdot M_{S_{Total}} \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo assim, com base na massa seca de rejeito calculada ( $M_{S_{Rej}}$ ), e no teor de umidade higroscópico do rejeito ( $w_{hig_{Est}}$ ), o valor da massa úmida de rejeito ( $M_{T_{Rej}}$ ) a ser utilizado foi calculado conforme a Equação 11.

$$M_{T_{Rej}} = M_{S_{Rej}} \cdot (1 + w_{hig_{Rej}}) \quad (\text{Equação 11})$$

Após a realização dos cálculos do valor de  $M_{T_{Est}}$  e  $M_{T_{Rej}}$ , foram preparadas porções de aditivo para serem misturadas às porções de rejeito puro e assim serem realizados os ensaios de compactação conforme NBR 7182 (ABNT, 2016f). Com a mistura e homogeneização dos materiais foi necessária a aplicação de quantidades de água para que os teores de umidade necessários para a realização da compactação fossem alcançados. Após a adição da água e nova homogeneização da mistura, as porções foram deixadas em repouso por um período de 24h antes de proceder à sua compactação.

#### 4.2.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Após a identificação das variações ocorrentes nas curvas de compactação devido à cada uma das misturas realizadas no rejeito, foram executados os ensaios de resistência à compressão simples no material puro e nas misturas com grau de compactação (GC) de 100% do Proctor normal. Este ensaio foi realizado no intuito de serem avaliadas as tendências de ganhos de resistência para as amostras. Nestes ensaios foi seguida a normativa:

- ABNT NBR 12025 (2012): Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio.

Após a compactação de cada corpo de prova (CP), a amostra foi colocada dentro de um saco plástico lacrado, antes de ser levada para a câmara úmida. A utilização do saco plástico lacrado teve como objetivo minimizar alterações de umidade durante o período de sete dias de cura. Com o término da cura os CPs foram ensaiados.

Para a realização deste ensaio foi utilizada a velocidade de carregamento igual a 1mm/mim. Como este estudo envolve misturas de rejeitos com diversos tipos aditivos, para os quais não existem normas específicas quanto à realização de ensaios de RCS, a adoção da velocidade de ensaio tomou como referência a norma ABNT NBR 12025 (2012), que se refere a misturas solo-cimento. Como justificativa adicional, cita-se o fato dessa norma se referir a ensaios de RCS em corpos de prova cilíndricos moldados no cilindro Proctor, na energia normal e rompidos após sete dias de cura, portanto, similares aos utilizados no estudo.



Como os CPs do rejeito puro e das misturas não suportavam imersão em água no período de cura adotado, não foi executada esta etapa antes do carregamento.

#### 4.2.5. ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO ISOTROPICAMENTE E NÃO DRENADO NA CONDIÇÃO SATURADA

Com a identificação do percentual ideal de cada um dos aditivos, foram executados os triaxiais CIU<sub>SAT</sub> (consolidado isotropicamente, não drenado e saturado) nas amostras. Além disso, como forma comparativa, também foi realizado o ensaio triaxial no rejeito puro.

Para os ensaios triaxiais foram utilizadas as misturas e o rejeito puro com grau de compactação de 100% do Proctor normal e tensões de adensamento de 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa.

Para a execução destes ensaios foram seguidas as recomendações de HEAD (1998) e da ASTM D4767 – 11 (2011): *Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*.

Os corpos de prova para os ensaios CIU<sub>SAT</sub> foram moldados com um diâmetro de 5,04 cm e altura igual a 10,10 cm, por meio de compressão estática do material com um macaco hidráulico, no interior de um molde cilindro metálico, específico para esta finalidade (Figura 24).

Figura 24 – Detalhe da moldagem dos corpos de prova para os ensaios CIU<sub>SAT</sub>



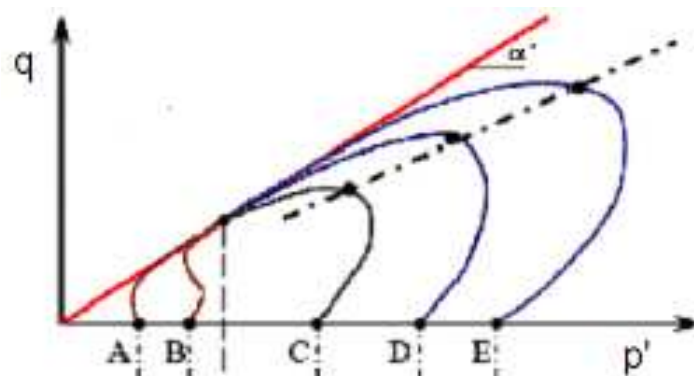
Fonte: Acervo técnico pessoal

Os CPs foram compactados com base nos parâmetros dos ensaios de compactação, tomando como referência os valores da umidade ótima e do peso específico seco máximo do material a ser ensaiado (rejeito puro e suas misturas). Para todos os materiais ensaiados os CPs foram compactados em quatro camadas, procedendo-se à escarificação do topo de cada uma delas antes da colocação e compactação da porção do material referente à camada seguinte.

A condição de ruptura foi considerada aquela na qual foi obtido o máximo valor de tensão desviadora durante o ensaio, os quais foram conduzidos até uma deformação axial máxima em torno de 20%. Este percentual foi definido de modo a serem observados os comportamentos de geração de poropressão das amostras em grandes deformações. Assim, com base nos valores da tensão de adensamento dos CPs, da máxima tensão desviadora dos ensaios e dos valores de poropressões registrados nessa condição, foram traçados os círculos de Mohr pela trajetória de tensões, referentes às condições de ruptura, a partir dos quais foram obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e de tensões efetivas, constituídos pelo intercepto de coesão ( $c$  ou  $c'$ ) e pelo ângulo de atrito interno ( $\varphi$  ou  $\varphi'$ ).

Os gráficos referentes às trajetórias de tensões (Figura 25) em termos de tensões totais (Equação 12 e Equação 13) e de tensões efetivas (Equação 14 e Equação 15) foram traçados em função das coordenadas definidas conforme apresentado a seguir.

Figura 25 – Exemplo de gráfico de trajetória de tensões efetivas (Trajetórias A e B – Comportamento Dilatante; e Trajetórias C, D e E – Comportamento Contrátil)



Fonte: Kramer, 1996

- Trajetórias em termos de tensões totais:
  - Abscissa ( $p$ ):

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

- Ordenada ( $q$ ):

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Equação 13})$$

- Trajetórias em termos de tensões efetivas:

- Abscissa ( $p'$ ):

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (\text{Equação 14})$$

- Ordenada ( $q'$ ):

$$q' = q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que  $\sigma_1$  e  $\sigma'_1$  se referem à tensão principal maior em termos de tensões totais e efetivas, respectivamente; e

$\sigma_3$  e  $\sigma'_3$  se referem à tensão principal menor em termos de tensões totais e efetivas, respectivamente.

É importante mencionar que, conforme indicado por Viana da Fonseca *et al.* (2021) e mostrado na Figura 25, o comportamento de materiais em ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> que tendem à uma trajetória de tensões da direita para esquerda, indicam desencadeamento da liquefação (contração). Já materiais que tendem a ter uma trajetória de tensões da esquerda para a direita, indicam comportamento dilatante.

Deste modo, uma das avaliações que podem ser feitas com base nas trajetórias de tensões efetivas destes ensaios (triaxiais CIU<sub>SAT</sub>), é que as trajetórias A e B, que apresentam comportamento dilatante, indicam geração de excesso de poropressão negativa, já as trajetórias C, D e E, que apresentam comportamento contrátil, indicam geração de excesso de poropressão positiva de forma majoritária em relação à tensão efetiva do material.

#### 4.2.6. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os ensaios para avaliar a condutividade hidráulica foram realizados com o rejeito puro e com as mesmas misturas selecionadas para a execução dos ensaios CIU<sub>SAT</sub>. Foram realizados em permeâmetro de parede flexível, à carga constante, sendo o procedimento de ensaio executado conforme a seguinte norma:

- ASTM D5084 – 16a (2016): *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.*

Foram utilizados CPs com 5,04 cm de diâmetro e 10,1 cm de altura, os quais, após moldagem, foram saturados por meio da aplicação de incrementos de contrapressão até atingirem um parâmetro B de Skempton (1954) em torno de 0,98. Em todos os ensaios foi utilizado um gradiente hidráulico em torno de 10.

A aparelhagem utilizada e o processo de moldagem dos CPs foram os mesmos dos ensaios de compressão triaxial citados anteriormente, conforme ilustrado na Figura 24.

### **4.3.MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Posteriormente à determinação dos materiais e produtos mais eficientes foram avaliados conceitos de projeto para aplicação dos aditivos nas pilhas. Neste estudo de conceitos foram realizadas análises de estabilidade determinísticas, através do equilíbrio-limite, em uma pilha hipotética, no intuito de observar-se os ganhos de resistência para a estrutura. Estes estudos foram realizados com o software de análise de estabilidade, *Slide2*, da *Rocscience Inc.*

Nas análises de estabilidade da pilha de rejeitos foram avaliadas as seguintes situações:

- Superfície freática normal;
- Superfície freática crítica; e
- Solicitação sísmica (pseudoestática).

Todas as análises de estabilidade foram realizadas tomando como referência as seguintes premissas:

- Considerando os valores de peso específico úmido ( $\gamma_n$ ) dos materiais calculados com base no resultado de 100% do Proctor normal e considerando que o material será compactado na umidade ótima;
- De modo a simplificar as análises, e pela ausência de ensaios para esta determinação, os valores de peso específico saturado foram estimados somando-se 1,0 kN/m<sup>3</sup> em cada peso específico natural calculado;

- Considerando os parâmetros de resistência efetiva dos rejeitos e dos rejeitos aditivados, obtidos dos ensaios triaxiais;
- Foram consideradas condições drenadas e parâmetros de resistência drenada;
- Como o objeto do estudo são os ganhos de resistência para os rejeitos filtrados e compactados, foi considerado que toda a fundação será caracterizada como material de resistência infinita;
- Não foi utilizada resistência infinita no aluvião presente no modelo pelo fato de que esta consideração geraria estabilidade no pé da pilha;
- Os parâmetros de resistência do aluvião tiveram como referência demais projetos de pilha desenvolvidos pela mineradora fornecedora dos rejeitos filtrados;
- Como simplificação, o sedimento presente no *sump* (sistema de contenção de sedimentos) não contém resistência drenada e não drenada, de modo que a previsão é que ele esteja totalmente submerso em água e com partículas livres;
- As análises de estabilidade foram realizadas considerando as metodologias de Spencer (superfícies não-circulares) e de Morgenstern-Price (superfícies não-circulares, sendo considerado sempre o menor valor de FS);
- O método de busca de superfícies utilizado foi o de *Cuckoo Search*;
- As análises de estabilidade consideraram análises globais (considerando cunhas com pelo menos três bancos/taludes) e locais (considerando cunhas com menos de três bancos/taludes);
- As análises de estabilidade foram desenvolvidas para os taludes de ambas as faces da pilha de rejeitos filtrados e compactados;
- O nível de água (NA) para as análises de estabilidade com superfície freática normal foi definido considerando-se o funcionamento normal do dreno de fundo da pilha de rejeitos filtrados;
- O NA para as análises de estabilidade com superfície freática crítica foi definido considerando-se a colmatção dos drenos de fundo e elevação hipotética do nível d'água;
- O NA para as análises de estabilidade pseudoestáticas foi definido considerando-se o funcionamento normal do dreno de fundo da pilha de rejeitos filtrados;

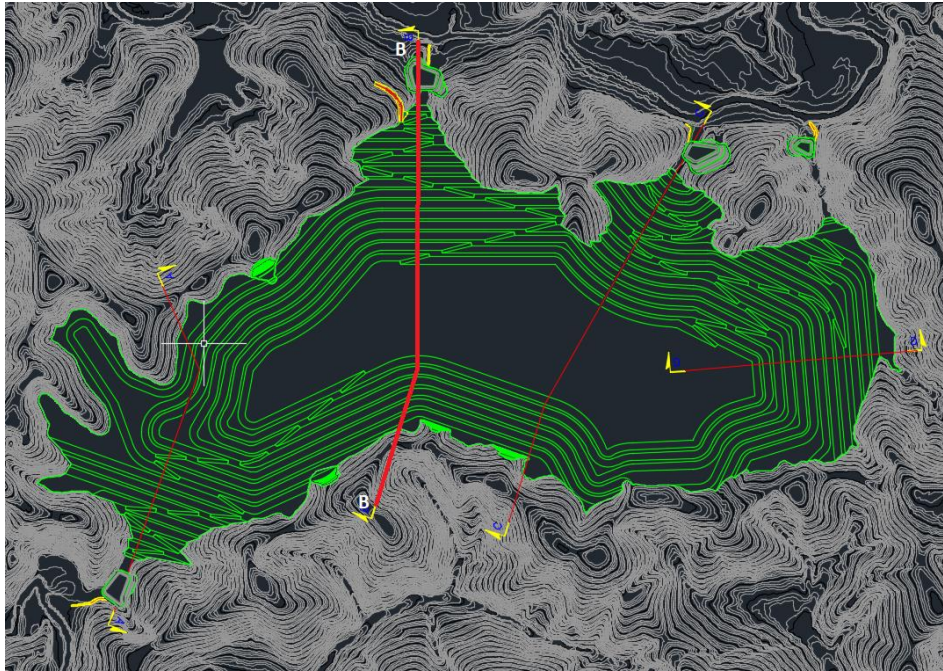
- A definição do NA foi hipotética, não tendo sido realizadas análises de percolação para esta finalidade, afinal, não havia informações sobre a presença de nascentes na fundação;
- Nas análises pseudoestáticas, devido à ausência de estudos detalhados sobre a atividade sísmica da região, foram utilizados os valores de acelerações da gravidade conforme indicados pela Eletrobrás (2003), acelerações de 0,05g na direção horizontal e 0,03g na direção vertical; e
- Foram realizados ensaios triaxiais nos rejeitos e nas misturas para as tensões de adensamento de até 800 kPa. Com estes ensaios foi avaliado se nestas tensões os rejeitos e as misturas apresentariam comportamentos contráteis ou dilatantes. Alguns triaxiais apresentaram comportamento contrátil a 800 kPa e outros não. Sendo assim, não é pertinente a realização de análises de estabilidade em condições não drenadas, afinal não foram realizados ensaios para maiores níveis de tensões para avaliação comparativa deste tipo de análise; e
- Foram realizadas análises de percolação transiente para avaliação do efeito da chuva na pilha e, conseqüentemente, para a definição do NA na estrutura, porém observou-se que para a condição final da pilha, a influência da infiltração da água da chuva não é mandatória no nível d'água.

Por fim, após as análises de estabilidade foram avaliados os ganhos de Fator de Segurança dos conceitos com aditivos, se comparados com o projeto original da pilha, e foram propostas otimizações na estrutura.

#### **4.4. ESTUDO DE CASO**

A partir dos resultados obtidos nos ensaios dos rejeitos e das misturas foram realizadas análises de estabilidade para a pilha hipotética de rejeitos, Figura 26.

Figura 26 – Pilha de rejeitos hipotética (142 m) – Estudo de caso – Seção BB



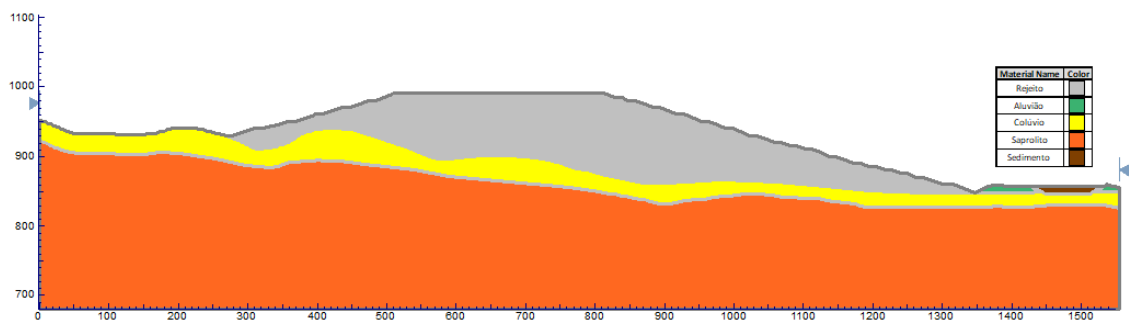
Fonte: Autoria própria

Para esta pilha foram realizadas análises de estabilidade para a seção mais crítica da estrutura, que constitui na seção com maior altura de empilhamento, identificada como a seção BB.

Além disso, o estudo de caso se baseou em cinco avaliações e três metodologias de disposição de rejeitos proposta:

- Empilhamento somente de rejeitos filtrados compactados com a pilha em sua conformação inicial (142 m de altura de máxima de coluna de rejeitos), Figura 27;

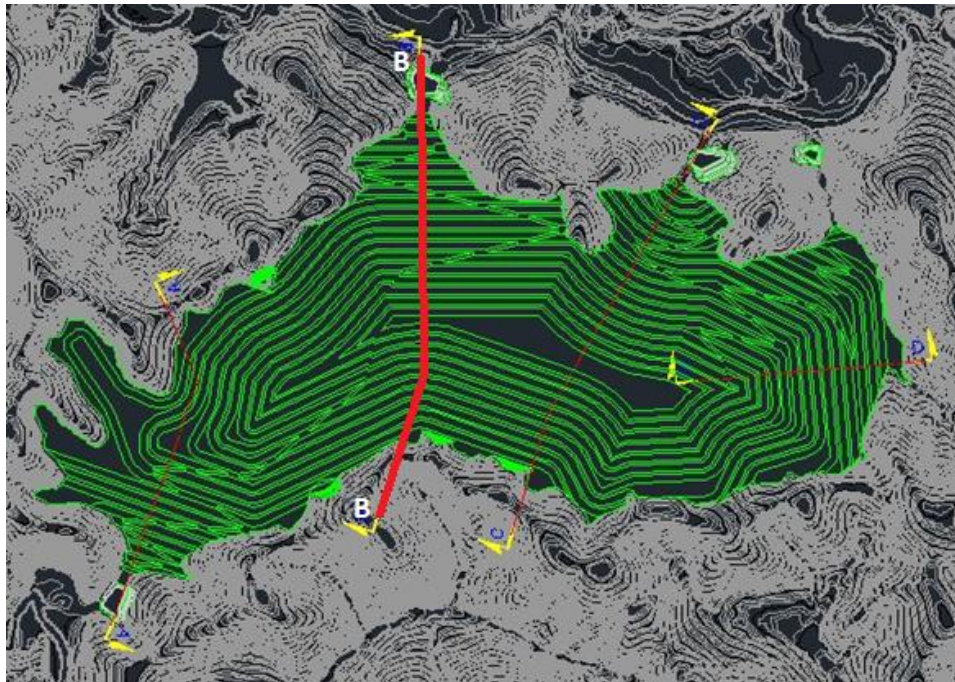
Figura 27 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (142 m) – Rejeito



Fonte: Autoria própria

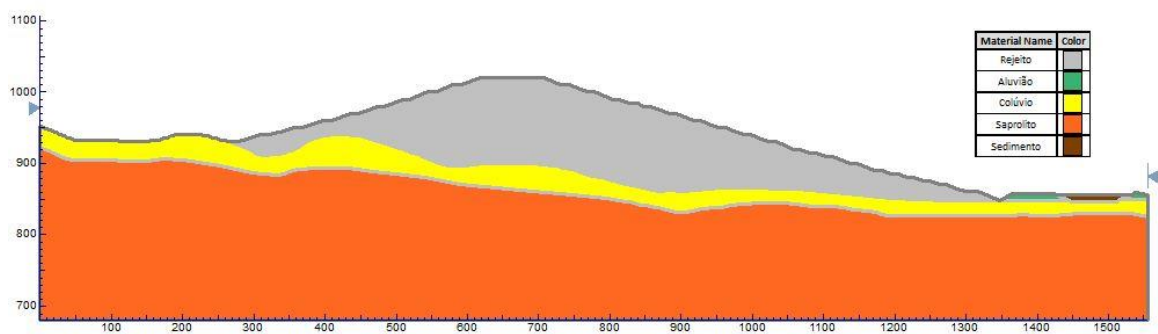
- Empilhamento somente de rejeitos filtrados compactados com aumento da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos), de modo que fossem observados ganhos volumétricos da disposição, Figura 28 e Figura 29;

Figura 28 – Pilha de rejeitos filtrado hipotética (172 m) – Estudo de caso – Seção BB



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (172 m) – Rejeito

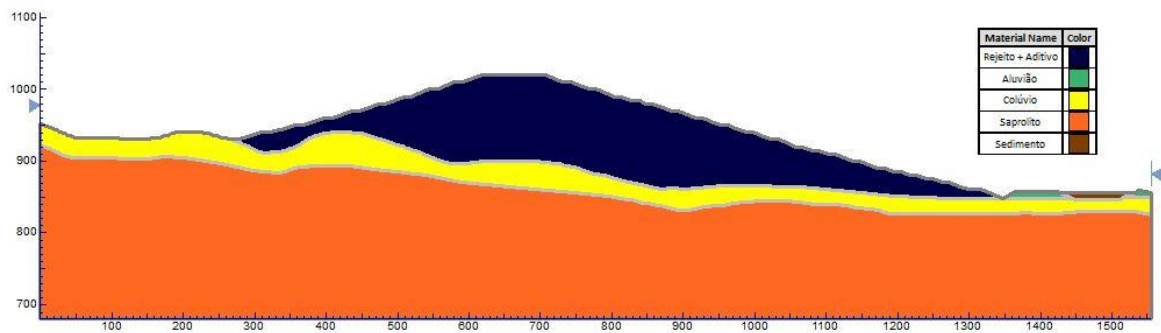


Fonte: Autoria própria

- Empilhamento de rejeitos filtrados compactados totalmente aditivados e com aumento da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos), Figura 30;



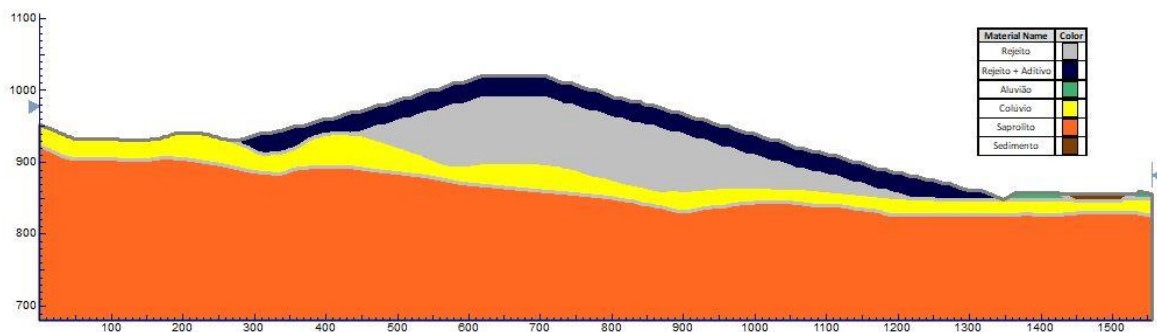
Figura 30 – Seção BB – Pilha de rejeitos hipotética (172 m) – Rejeito aditivado



Fonte: Autoria própria

- Empilhamento dos rejeitos filtrados compactados com faixa estabilizadora de 30m verticais da mistura com aditivo, e com aumento da altura da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos), Figura 31; e

Figura 31 – Seção BB – Pilha de rejeitos filtrado hipotética (172 m) – Face com rejeito aditivado



Fonte: Autoria própria

- Empilhamento de rejeitos filtrados compactados aditivados (mistura com maiores ganhos de FS) com aumento da inclinação dos taludes (avaliação iterativa), de modo que fossem observados ganhos volumétricos da disposição.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos da caracterização do rejeito, bentonita, agregado siderúrgico e estéril utilizado para o desenvolvimento deste estudo.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização

Parâmetro	Material			
	Rejeito	Bentonita	Agregado Siderúrgico	Estéril
Massa específica sólidos $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	3,341	2,865	3,335	2,961
Peso específico sólidos $\left(\frac{kN}{m^3}\right)$	32,76	28,10	32,70	29,04
Limite de liquidez, $LL(\%)$	26	441	NL	43
Limite de plasticidade, $LP(\%)$	16	43	NP	24
Índice de plasticidade, $IP = LL - LP (\%)$	10	398	NP	19
<b>Composição das frações granulométrica conforme a ABNT NBR 6502 (1995)</b>				
Argila ( $\%$ ), $D_{partícula} < 0,002mm$	14	75	0	8
Silte ( $\%$ ), $0,002 < D_{partícula} < 0,600mm$	57	21	19	51
Areia ( $\%$ ), $0,600 < D_{partícula} < 2,000mm$	28	4	80	27
Pedregulho ( $\%$ ), $D_{partícula} > 2,000mm$	1	0	1	14
Atividade, $Ac = IP/\% < 0,002mm$	0,71	5,31	-	2,37

Fonte: Autoria própria

Das características observadas no estudo, é importante a avaliação em relação à atividade de Skempton ( $A_c$ ), segundo a qual a argila presente no solo pode ser classificada como (PINTO, 2006):

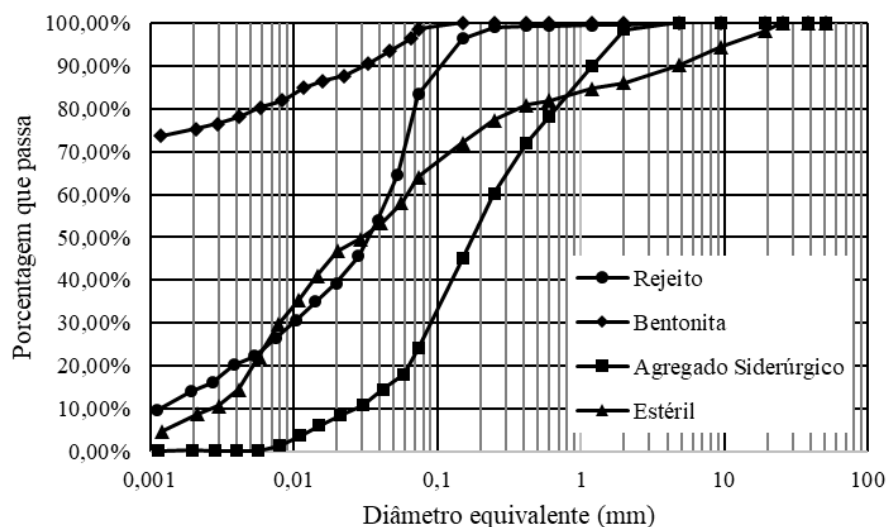
- Inativa se  $A_c < 0,75$ ;
- Normal se  $0,75 \geq A_c \geq 1,25$ ; e
- Ativa  $A_c > 1,25$ .

Deste modo, fazendo a avaliação dos resultados apresentados na Tabela 3, observa-se que as parcelas de argila dos rejeitos e do agregado siderúrgico são consideradas inativas, já no caso da bentonita e o estéril os materiais apresentam atividade. A atividade de Skempton indica que os materiais ativos apresentam comportamento plástico, como baixa capacidade de suporte, representando maior possibilidade de geração de poropressão e maior deformabilidade em condições de carregamentos não drenados.

Geralmente, essa maior atividade identificada nos materiais pode representar também uma elevação na umidade ótima e a redução do valor da massa específica seca máxima, refletindo diretamente nos parâmetros de compactação das misturas.

Ainda sobre a Tabela 3, os valores de massa específica dos sólidos do rejeitos e do agregado siderúrgico apresentam resultados muito próximos, porém o agregado siderúrgico não apresenta plasticidade e apresenta uma granulometria mais grosseira se comparado que o rejeito, Figura 32.

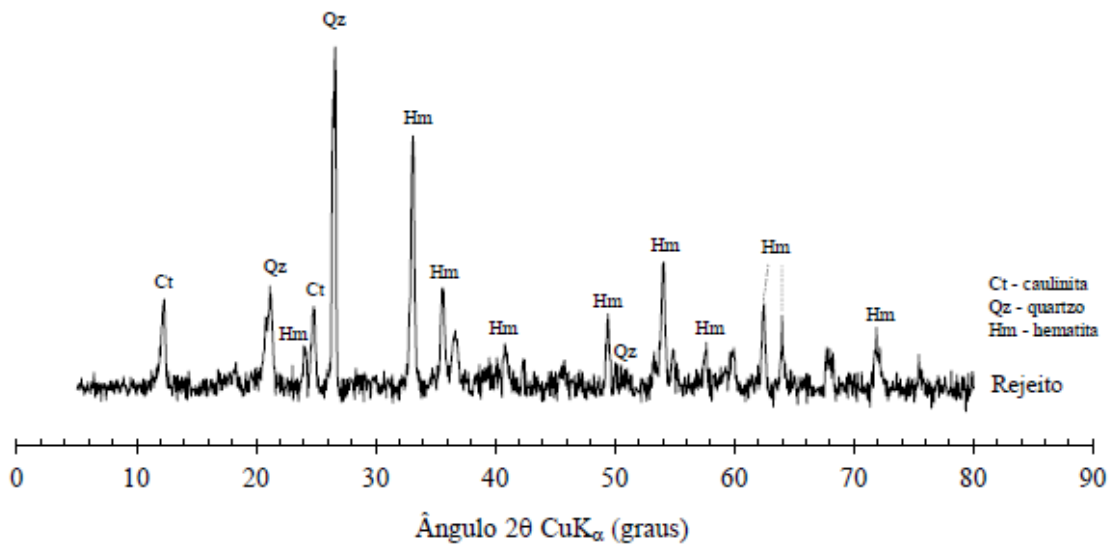
Figura 32 – Curvas granulométricas dos materiais utilizados das misturas



Fonte: Autoria própria

Além dos ensaios de caracterização acima, foi realizado o ensaio de difração de raio-X para complementação das informações do rejeito puro a ser estudado, cujo resultado é apresentado na Figura 33. Conforme pode ser observado, foram identificados picos correspondentes à hematita (Hm), que é um dos principais constituintes do rejeito de minério de ferro utilizado neste estudo, o que justifica o elevado valor do peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) do material. Além disso, considerando-se o fato de o rejeito ser constituído, dentre outros minerais, por quartzo e caulinita, e por ter apresentado baixo valor de reatividade ( $Ac$ ), é de esperar que este tenha um bom desempenho com aditivos cimentantes.

Figura 33 – Difração de raios-X do rejeito de minério de ferro puro



Fonte: Autoria própria

Por fim, sobre o estéril utilizado no estudo, ele é caracterizado como um filito friável, classe V, sendo classificado como decomposto (W5). Além disso, este material é proveniente de rocha muito branda (R1), pouco fraturada, com foliação penetrativa, a qual muitas vezes encontra-se obliterada por pequenas dobras e falhas.

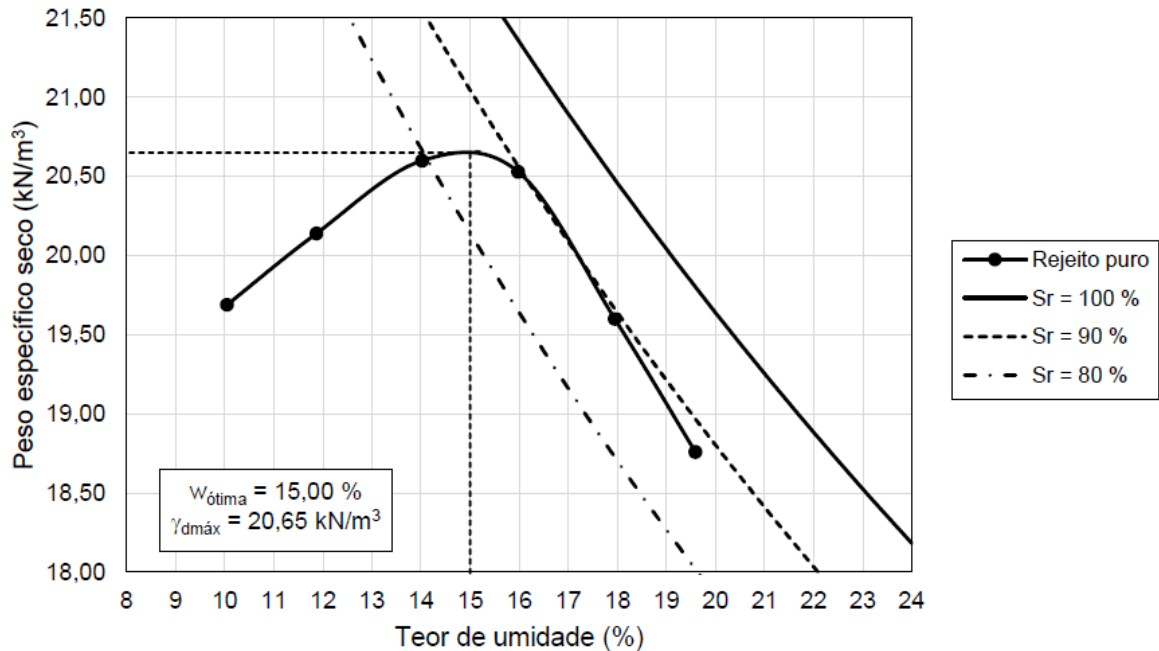
## 5.2. REJEITO PURO

### 5.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Na Figura 34, é apresentada a curva de compactação do rejeito puro e na Tabela 4 são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,00% e o peso específico seco máximo foi de

20,65 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,75 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 34 – Curva de compactação do rejeito puro



Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Pontos da curva de compactação do rejeito puro

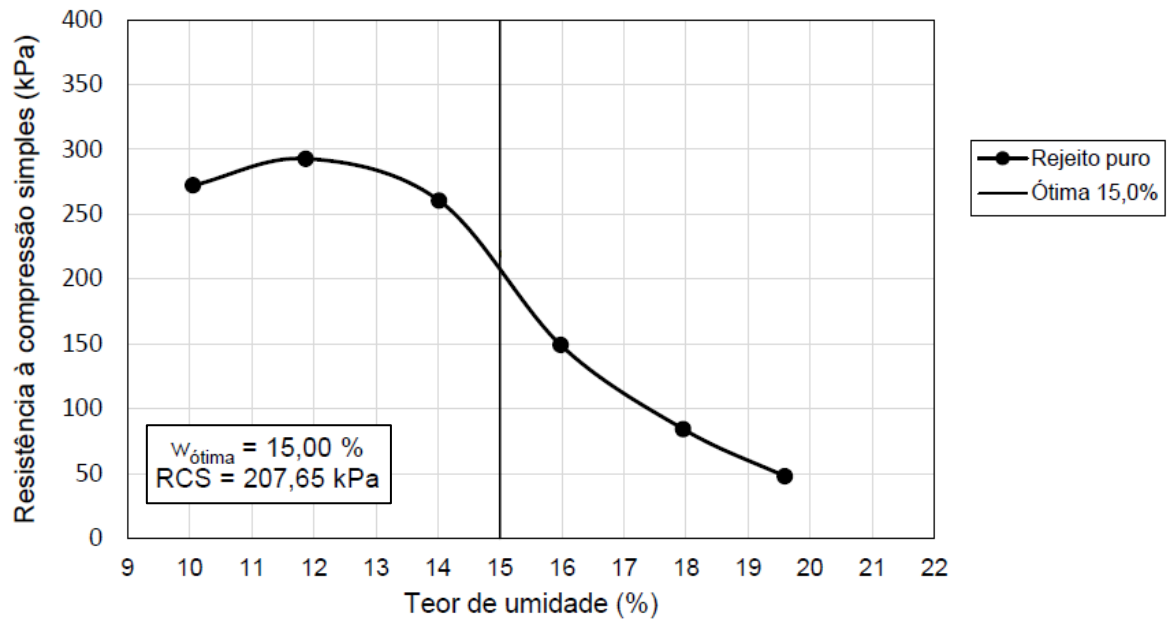
Ponto da Curva	1	2	3	4	5	6
$w$ (%)	10,05	11,87	14,02	15,98	17,95	19,59
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,69	20,14	20,60	20,53	19,60	18,76

Fonte: Autoria própria

### 5.2.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Na Figura 35 e na Tabela 5, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 35 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito puro



Fonte: Autoria própria

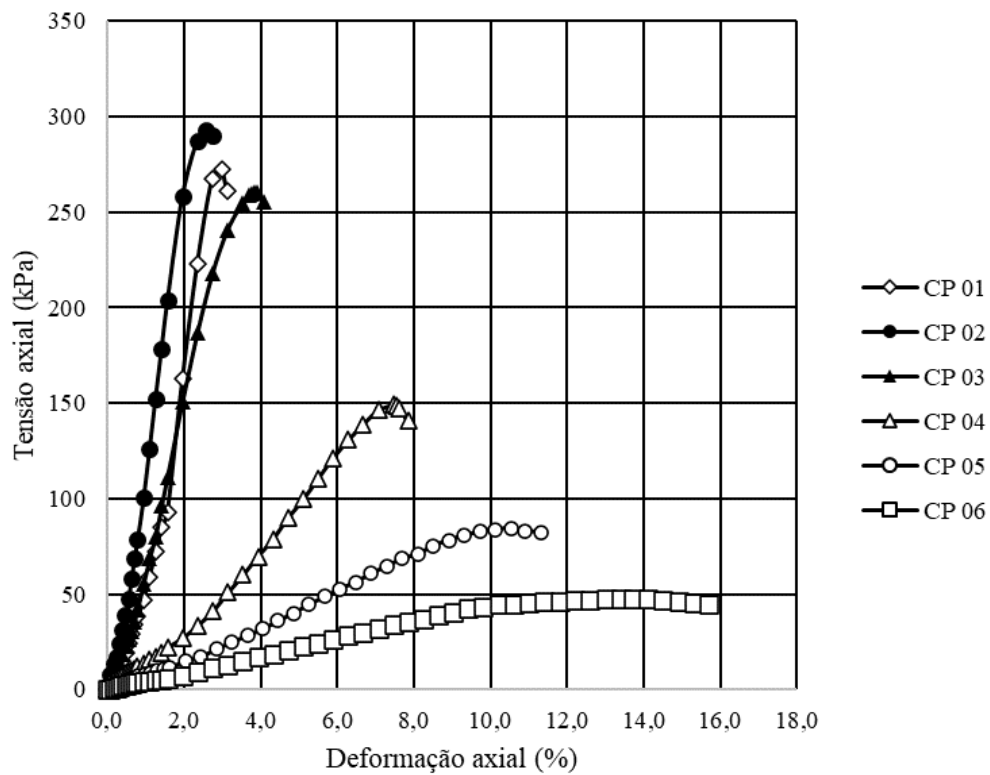
Tabela 5 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito puro

Ponto da Curva	1	2	3	4	5	6
$w$ (%)	10,05	11,87	14,02	15,98	17,95	19,59
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	272,25	292,90	260,64	149,14	84,25	47,76

Fonte: Autoria própria

Na Figura 36, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito puro.

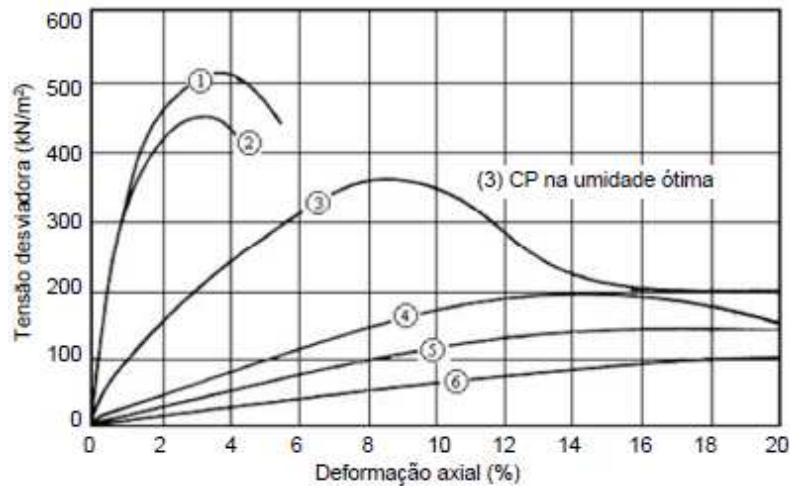
Figura 36 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS do rejeito puro



Fonte: Autoria própria

Por meio da Figura 36, pode ser observado que, de acordo com o aumento do teor de umidade da amostra, existe uma tendência contínua de redução da resistência à compressão simples do material, uma expressiva redução do módulo de elasticidade e uma mudança de comportamento do rejeito de frágil para plástico. Segundo Lambe e Whitman (1979) este é um comportamento de materiais compactados, conforme pode ser observado na Figura 37, referente a amostras de caulinita compactadas.

Figura 37 – Comportamento de material compactados. Os pontos 1 e 2 indicam material com umidades abaixo da ótima. O ponto 3 apresenta material na umidade ótima. Os pontos 4, 5 e 6 apresentam o material acima da umidade ótima



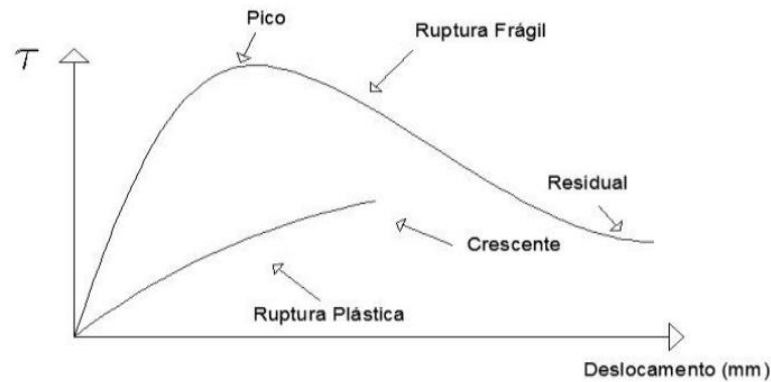
Fonte: Adaptado de Lambe e Whitman (1979)

Segundo Lambe e Whitman (1979) este comportamento ocorre devido à tendência de uma maior dispersão das partículas de materiais com umidades altas, apresentando menor resistência e maior deformabilidade do que se comparado com a estruturas floculadas de materiais mais secos e com partículas menos dispersas.

Além disso, observa-se também que os rejeitos com umidades mais baixas apresentam maior resistência e maior módulo de elasticidade, porém com comportamento de ruptura frágil, em que mesmo com pequenas deformações o material rompe. Já os rejeitos com umidades mais altas apresentam menor resistência e módulo de elasticidade e uma ruptura plástica, em que ocorre grande deformação do material até que seja alcançada sua ruptura. Tal condição é apresentada na Figura 38 (MARANGON, 2009).



Figura 38 – Tipos classificação dos tipos de ruptura do solo de acordo com o comportamento tensão-deformação do material

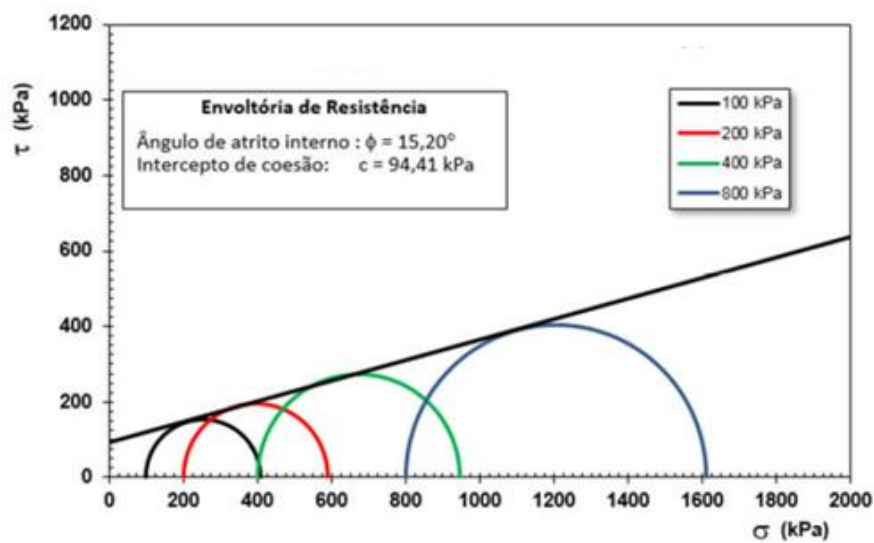


Fonte: Marangon (2009)

### 5.2.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

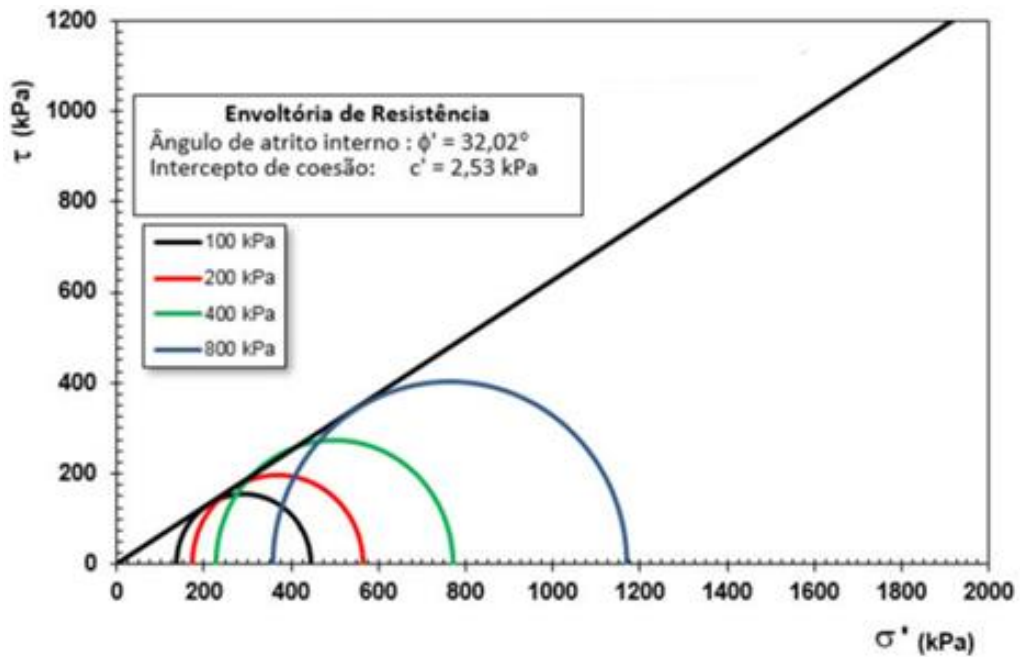
Na Figura 39, são apresentados os círculos de Mohr na condição de ruptura e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais, referentes ao ensaio CIU<sub>SAT</sub> realizado em corpos de prova do rejeito puro. Na Figura 40, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas.

Figura 39 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> com o rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

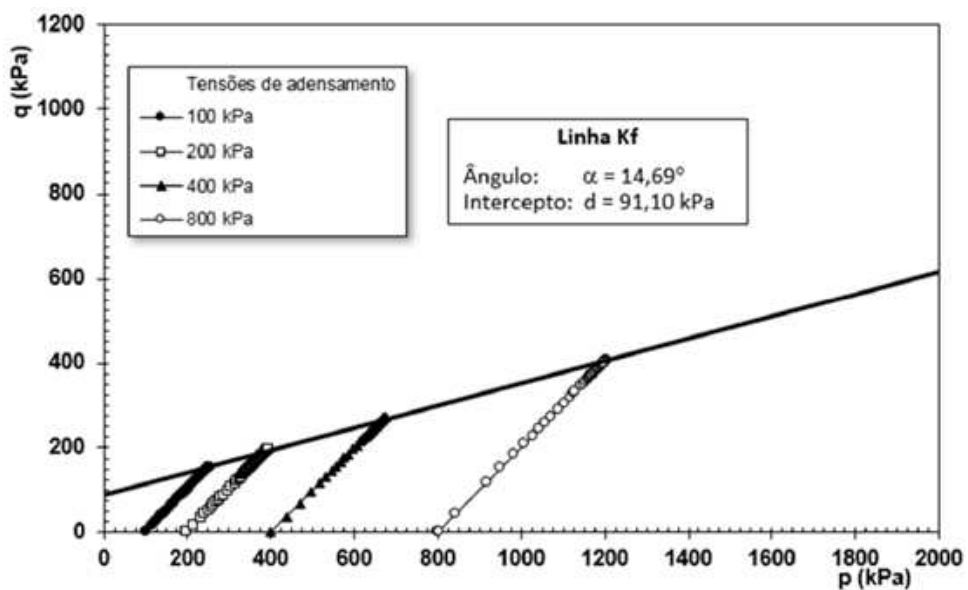
Figura 40 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> com o rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

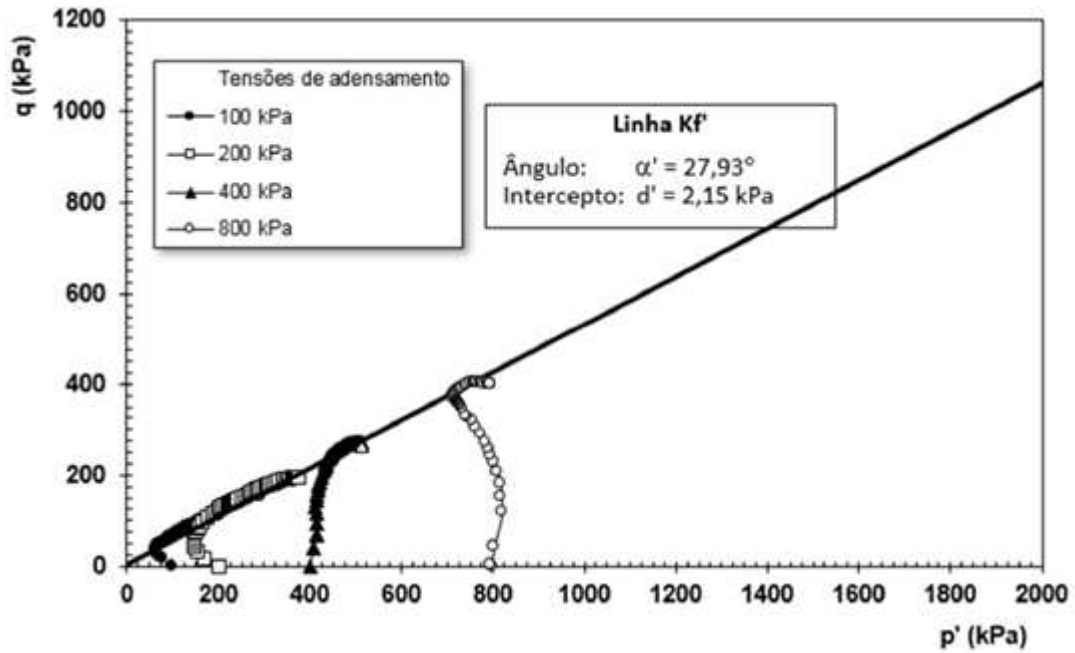
Na Figura 41 e na Figura 42, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas do rejeito puro, respectivamente.

Figura 41 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> com o rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

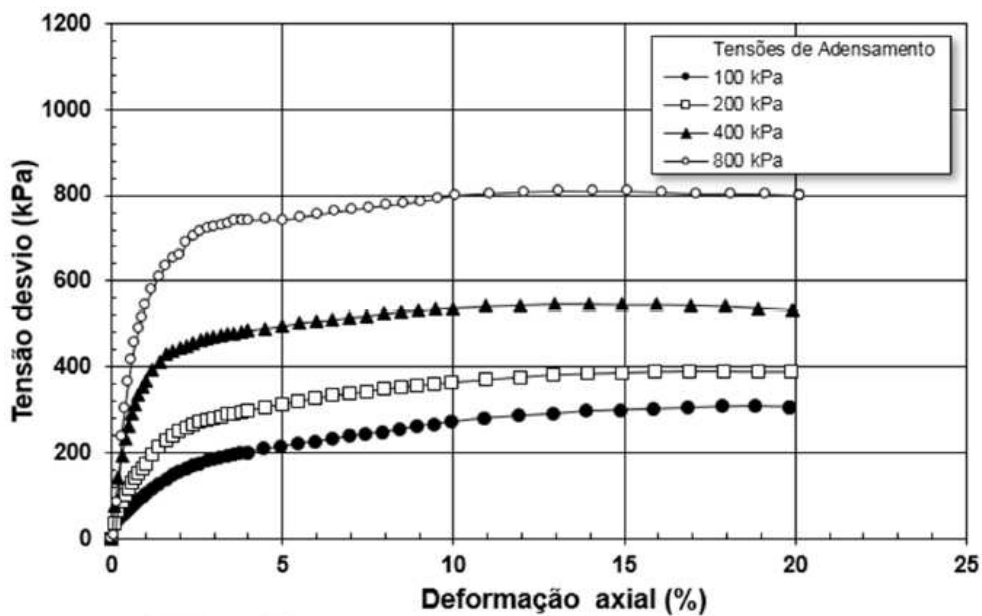
Figura 42 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> com o rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

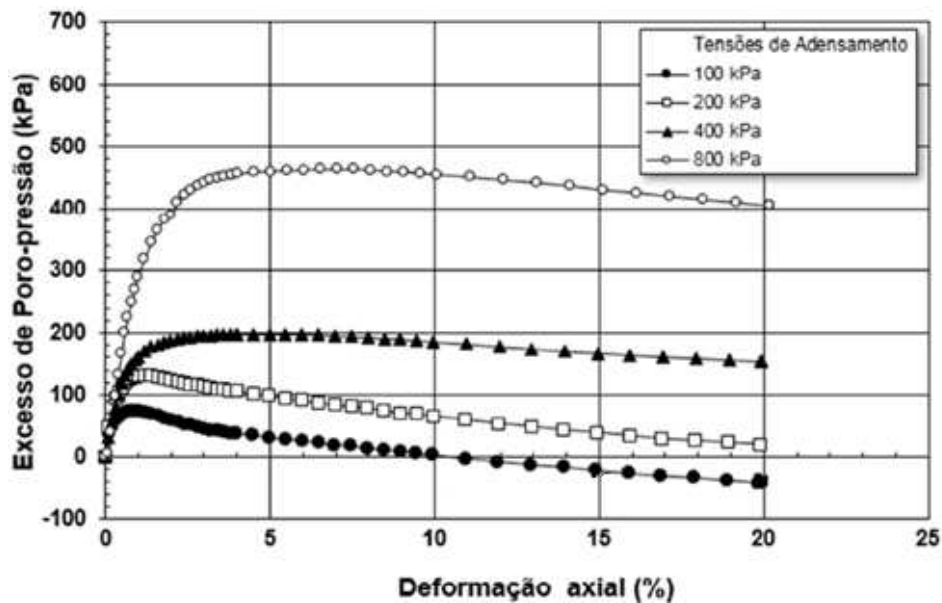
Na Figura 43, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e na Figura 44, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

Figura 43 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> – Rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> – Rejeito puro)



Fonte: Autoria própria

Conforme observado na Figura 42, o aumento da tensão de adensamento gera uma tendência do rejeito puro alterar seu comportamento dilatante para o comportamento contrátil, similarmente aos estudos desenvolvidos por Barbosa (2022), Carneiro (2021) e por Marques *et al.* (2020). Situação observada principalmente na trajetória de tensões de 800kPa. Isto indica que, em pilhas de elevadas alturas, o rejeito pode apresentar condições de resistência não drenada em caso de existência de material saturado, o que reduz a capacidade resistente da estrutura, reduzindo também o FS da mesma.

Porém, é importante mencionar que a geração de poropressão no processo de empilhamento deve ser avaliada de forma minuciosa, afinal sua compactação é lenta devido à necessidade de tratamento do rejeito após a filtragem, de modo a reduzir a umidade. Deste modo, a poropressão pode ser dissipada (adensamento) antes mesmo que a camada esteja sujeita à elevadas tensões.

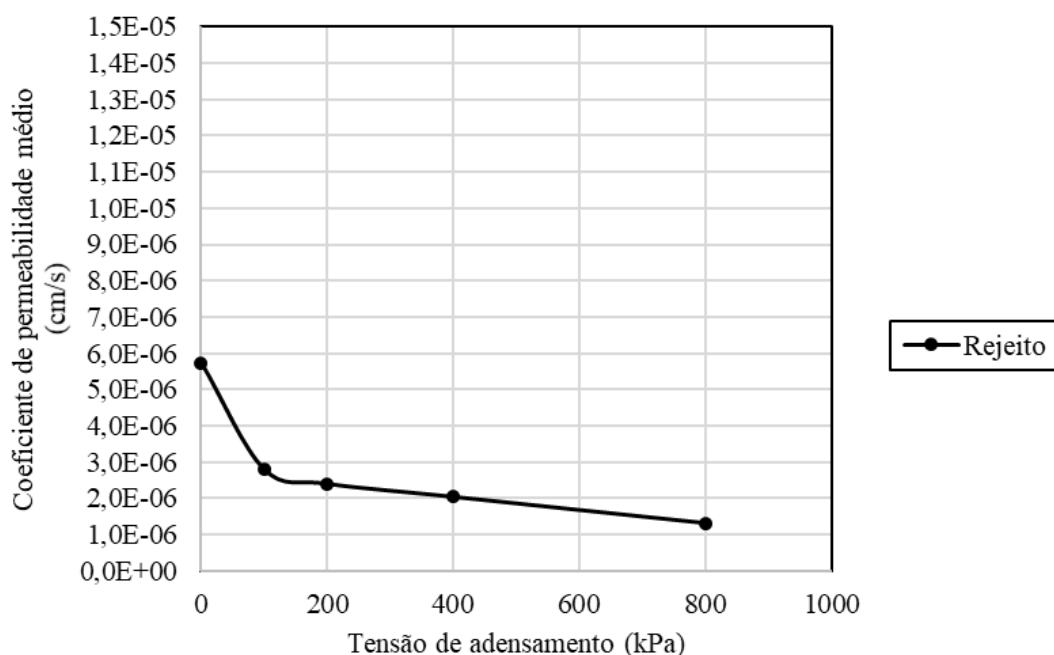
Por fim, na Figura 44, pode ser observado que, para tensões de 100 kPa, o rejeito puro apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento deste CP. No CP de 200 kPa pode ser observado que a tendência também se mantém, mas a geração de poropressão negativa não é identificada pela limitação de

deformação do CP no ensaio. Já para as tensões de 400kPa e 800 kPa a poropressão é positiva, mas apresenta a tendência de redução com o andamento do ensaio.

#### 5.2.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na Figura 45, é apresentada a variação do coeficiente permeabilidade ( $k$ ) do rejeito puro em função da tensão de adensamento dos corpos de prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 6, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.

Figura 45 – Variação da permeabilidade do rejeito puro



Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Permeabilidade do rejeito puro de acordo com os níveis de tensões de adensamento

CP	1	2	3	4	5
Tensão (kPa)	0	100	200	400	800
$k$ (cm/s)	5,73 x 10 <sup>-6</sup>	2,88 x 10 <sup>-6</sup>	2,40 x 10 <sup>-6</sup>	2,04 x 10 <sup>-6</sup>	1,32 x 10 <sup>-6</sup>

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, com o aumento da tensão de adensamento, as partículas de rejeito puro tendem a se organizarem melhor, de modo que os vazios sejam reduzidos. Conseqüentemente, ocorre também a redução do coeficiente de permeabilidade do material, de modo que o fluxo por entre as partículas torna-se mais difícil.

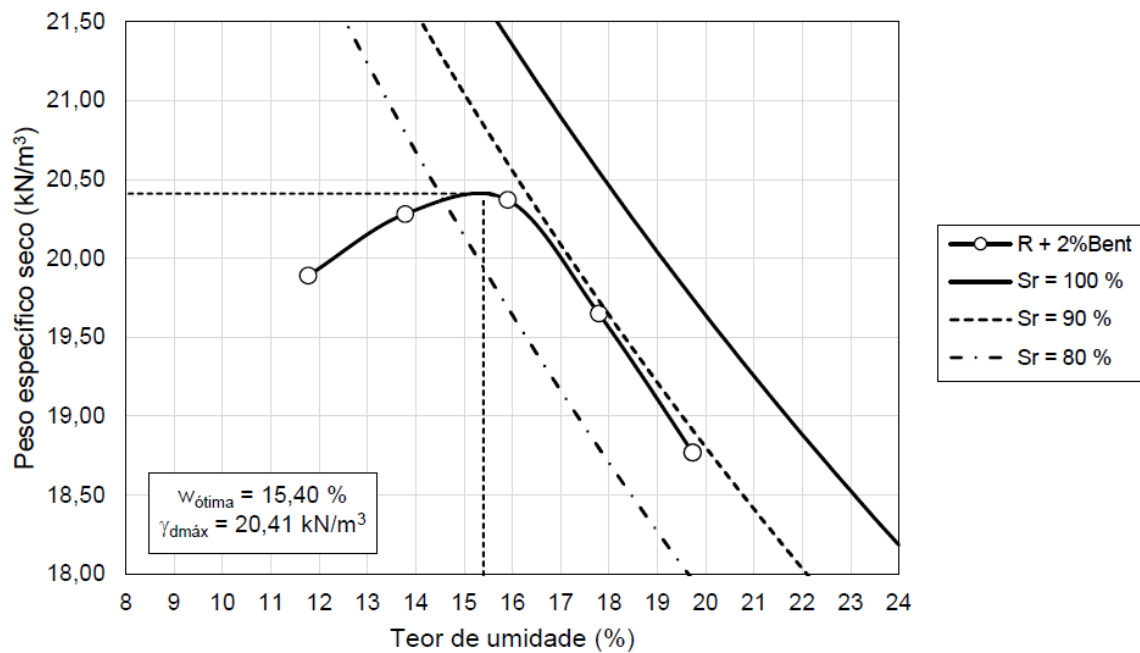
### 5.3. MISTURAS DE REJEITO E BENTONITA

#### 5.3.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

##### 5.3.1.1. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE BENTONITA

Na Figura 46, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 2% de bentonita e, na Tabela 7, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,40% e o peso específico seco máximo foi de 20,41 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,55 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 46 – Curva de compactação do rejeito + 2% de bentonita



Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de bentonita

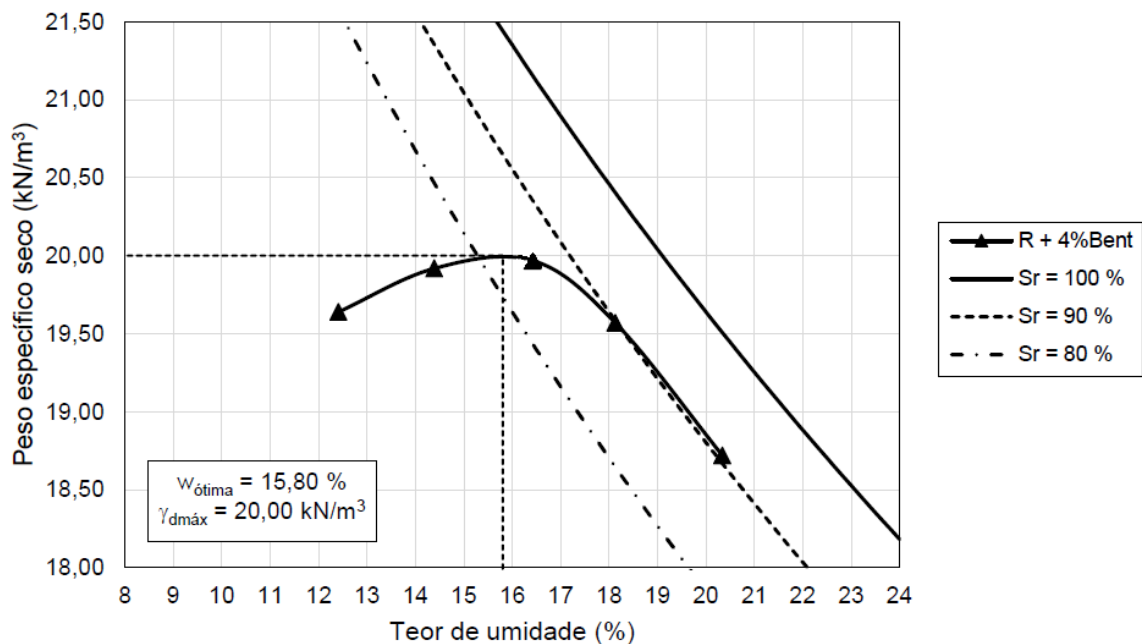
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,77	13,78	15,90	17,79	19,73
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,89	20,28	20,37	19,65	18,77

Fonte: Autoria própria

### 5.3.1.2. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE BENTONITA

Na Figura 47, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 4% de bentonita e, na Tabela 8, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,80% e o peso específico seco máximo foi de 20,00 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,16 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 47 – Curva de compactação do rejeito + 4% de bentonita



Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,41	14,39	16,42	18,13	20,34
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,64	19,92	19,97	19,57	18,72

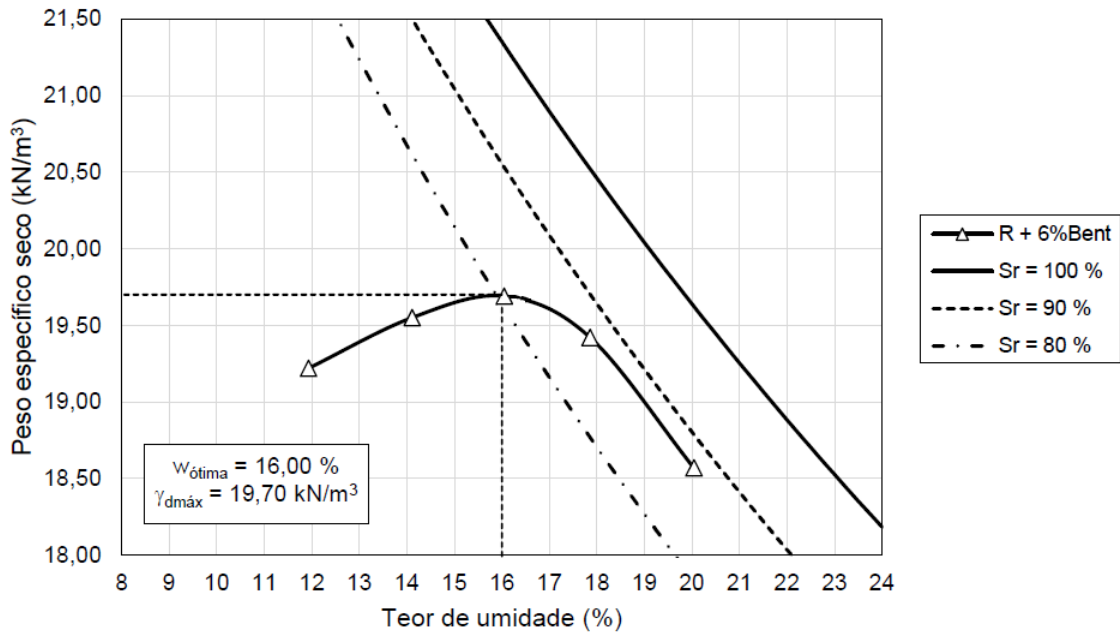
Fonte: Autoria própria

### 5.3.1.3. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE BENTONITA

Na Figura 48, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 6% de bentonita e, na Tabela 9, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,00% e o peso

específico seco máximo foi de 19,70 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,85 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 48 – Curva de compactação do rejeito + 6% de bentonita



Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
w (%)	11,93	14,11	16,05	17,86	20,01
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,22	19,55	19,69	19,42	18,57

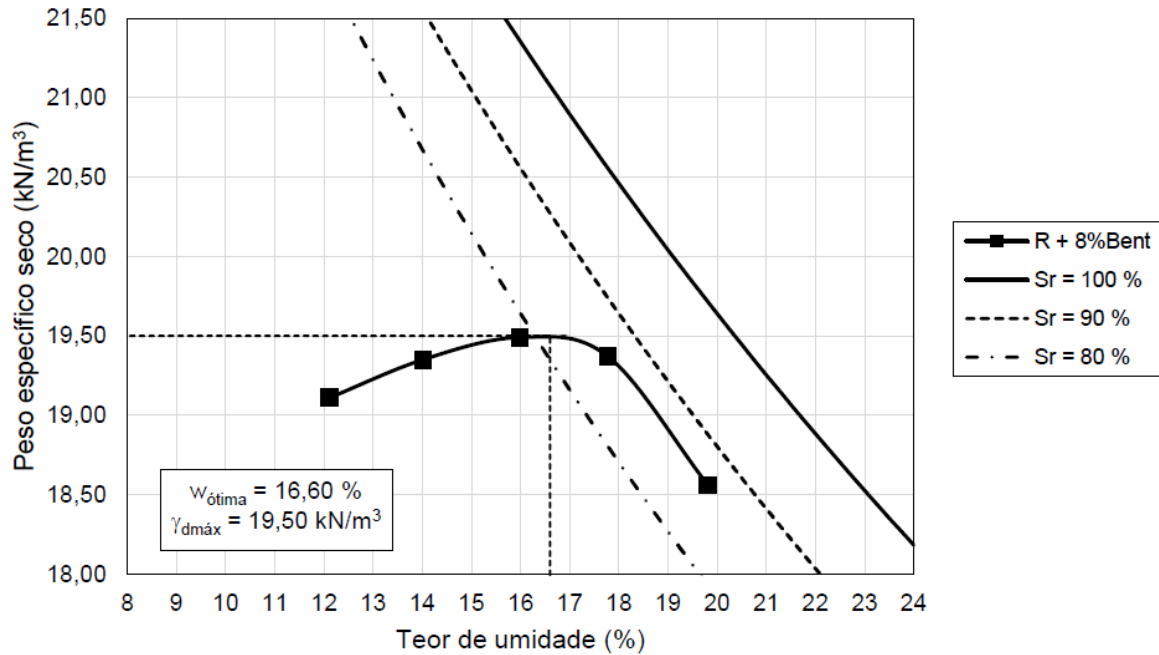
Fonte: Autoria própria

#### 5.3.1.4. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE BENTONITA

Na Figura 49, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 8% de bentonita e, na Tabela 10, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,60% e o peso específico seco máximo foi de 19,50 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,74 kN/m<sup>3</sup>.



Figura 49 – Curva de compactação do rejeito + 8% de bentonita



Fonte: Autoria própria

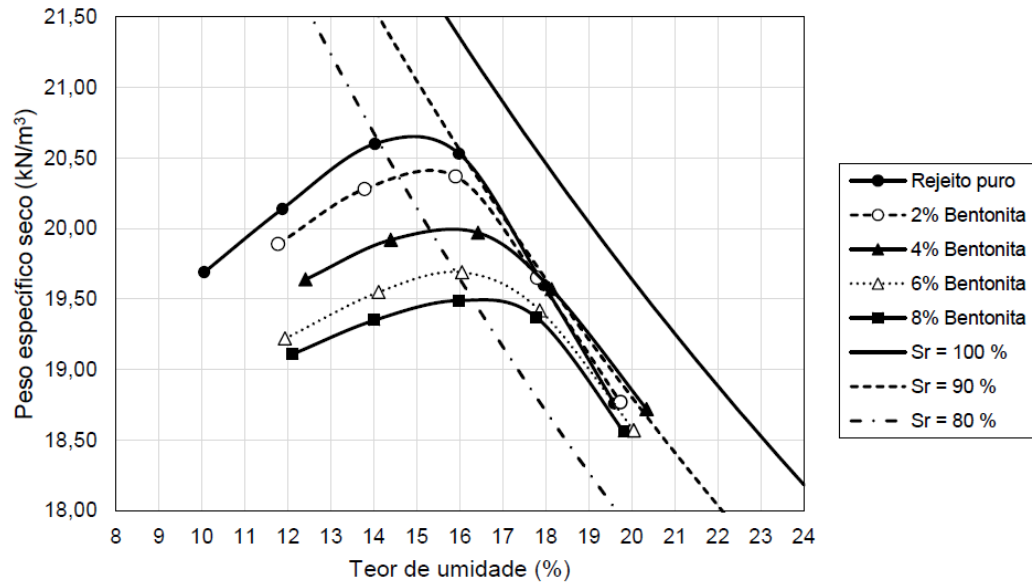
Tabela 10 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,11	14,01	15,98	17,78	19,81
$\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	19,11	19,35	19,49	19,37	18,56

Fonte: Autoria própria

Na Figura 50, são apresentadas as curvas de compactação do rejeito puro e de das misturas com bentonita, nas quais pode ser identificada o aumento da umidade ótima e redução da massa específica seca máxima, com o aumento do teor de bentonita na mistura. Comportamento este semelhante aos resultados encontrados por Barati *et al.* (2020), em estudos de estabilização de rejeito de minério de ferro com misturas com bentonita para utilização como elementos construtivos de estradas. Este comportamento também foi identificado por Chalermyanont *et al.* (2005) e De Magistris *et al.* (1998), em misturas de areia siltosa com bentonita, e por Khalid *et al.* (2019) e Firoozfar *et al.* (2017) em misturas de argila com bentonita.

Figura 50 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com bentonita



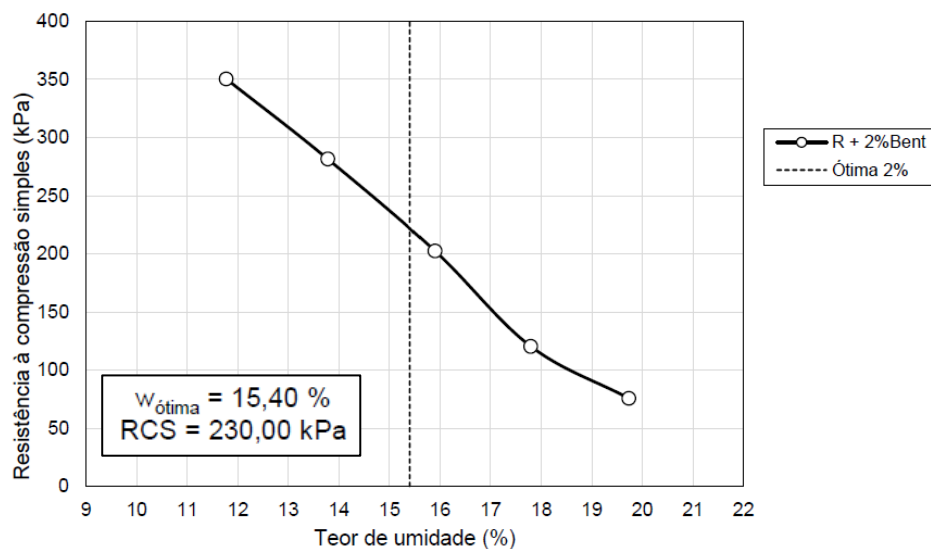
Fonte: Autoria própria

### 5.3.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

#### 5.3.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE BENTONITA

Na Figura 51 e na Tabela 11, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 51 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de bentonita



Fonte: Autoria própria

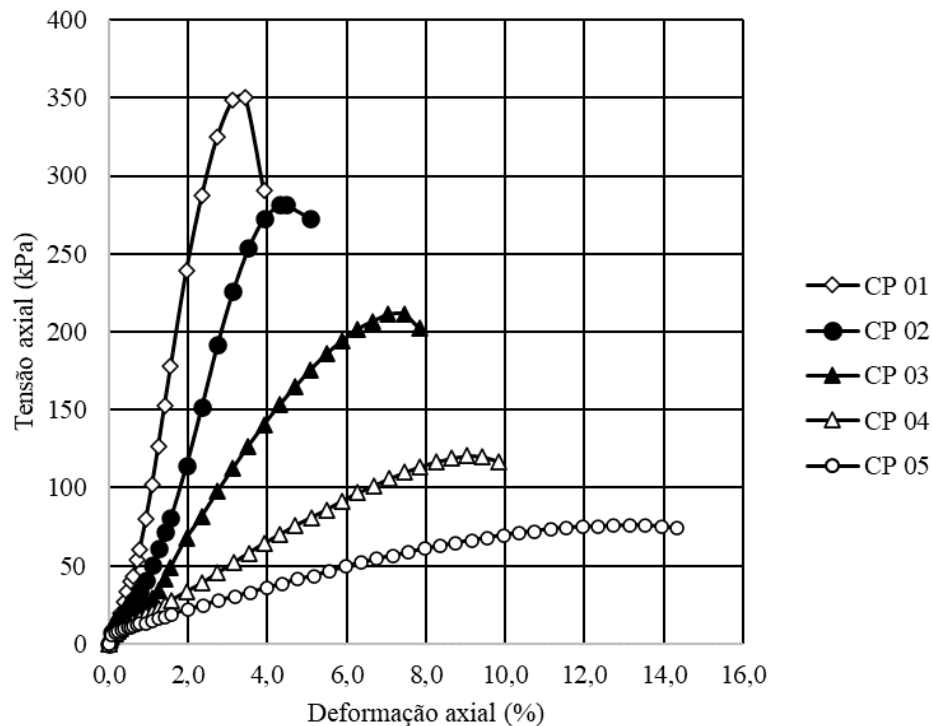
Tabela 11 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,77	13,78	15,90	17,79	19,73
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	350,41	281,52	211,42	120,41	75,76

Fonte: Autoria própria

Na Figura 52, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 2% de bentonita. Como pode ser observado, este comportamento se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2. Conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979), as variações das estruturas formadas nos ramos seco e úmido apresentam características distintas no comportamento tensão-deformação, em que se observa uma tendência de redução contínua da RCS e um aumento da deformação do material.

Figura 52 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de bentonita

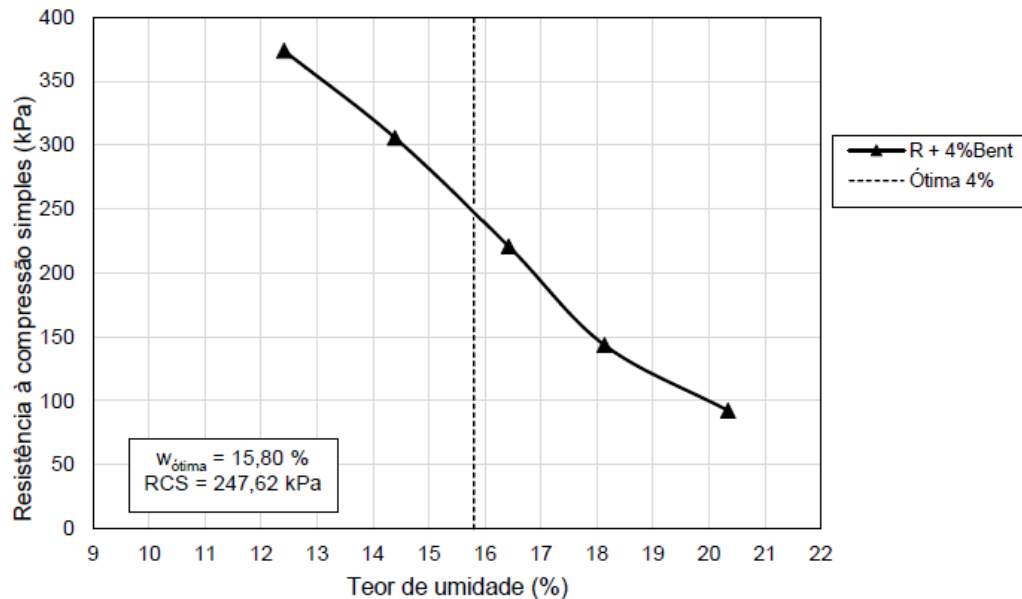


Fonte: Autoria própria

### 5.3.2.2.RCS DE REJEITO + 4% DE BENTONITA

Na Figura 53 e na Tabela 12, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 53 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de bentonita



Fonte: Autoria própria

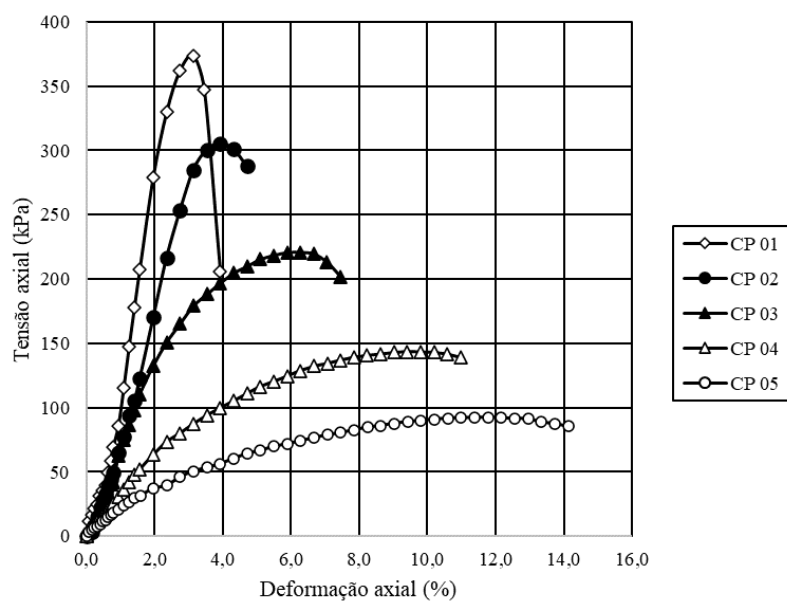
Tabela 12 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	12,41	14,39	16,42	18,13	20,34
<b>RCS (kN/m<sup>2</sup>)</b>	373,74	305,57	220,82	143,63	92,36

Fonte: Autoria própria

Na Figura 54, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 4% de bentonita. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 54 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de bentonita

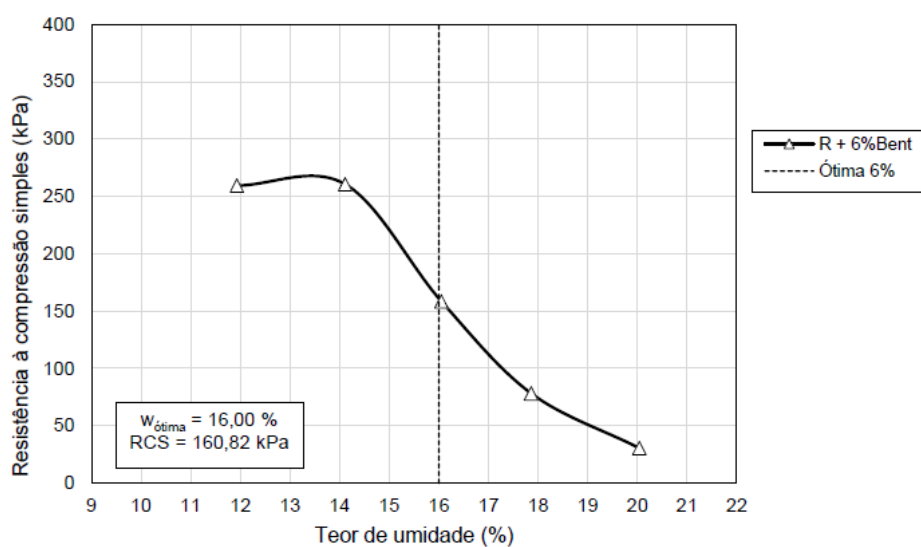


Fonte: Autoria própria

### 5.3.2.3.RCS DE REJEITO + 6% DE BENTONITA

Na Figura 55 e na Tabela 13, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 55 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de bentonita



Fonte: Autoria própria

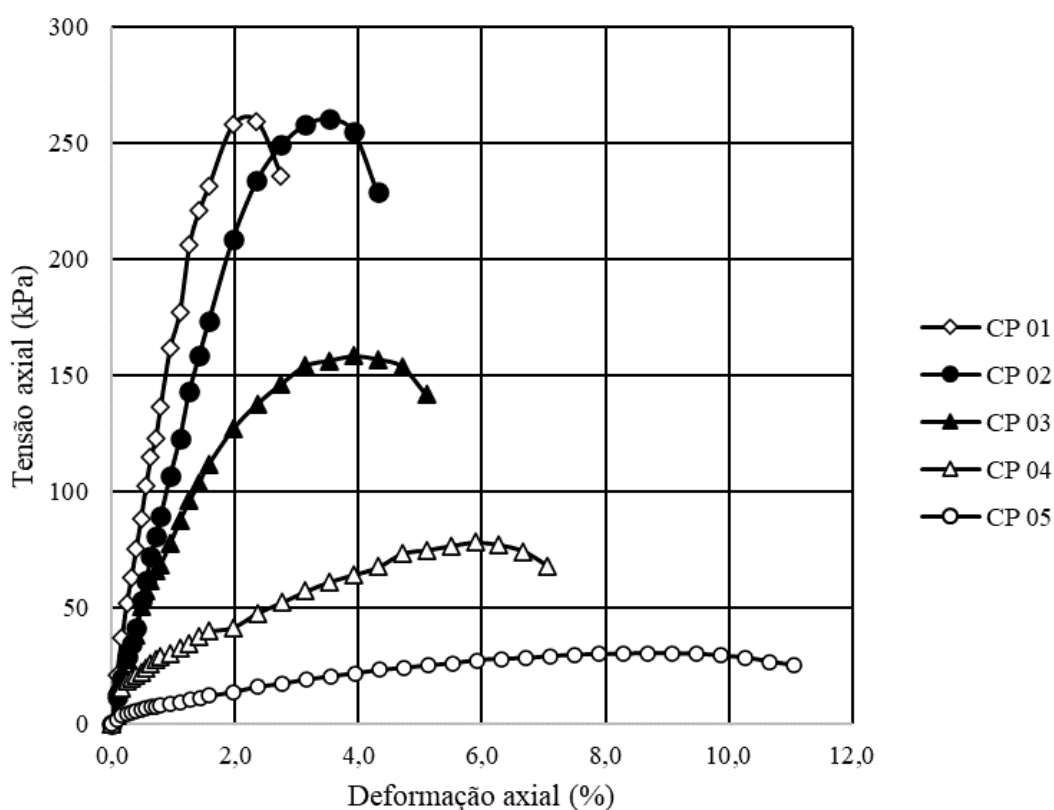
Tabela 13 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,93	14,11	16,05	17,86	20,04
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	259,37	260,57	158,39	78,28	30,54

Fonte: Autoria própria

Na Figura 56, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 6% de bentonita. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 56 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de bentonita

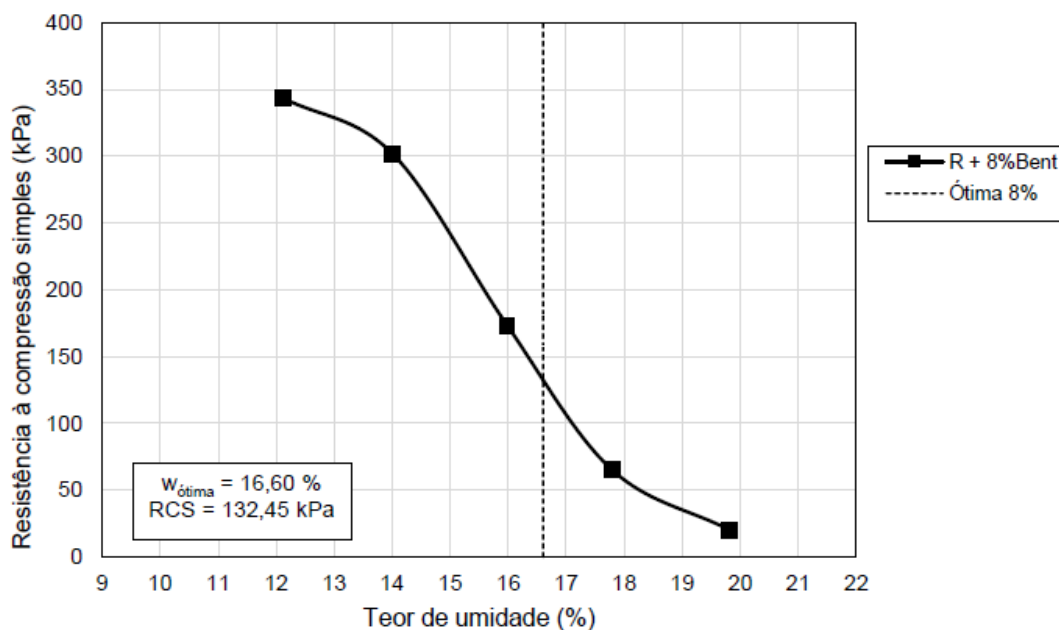


Fonte: Autoria própria

### 5.3.2.4.RCS DE REJEITO + 8% DE BENTONITA

Na Figura 57 e na Tabela 14, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 57 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de bentonita



Fonte: Autoria própria

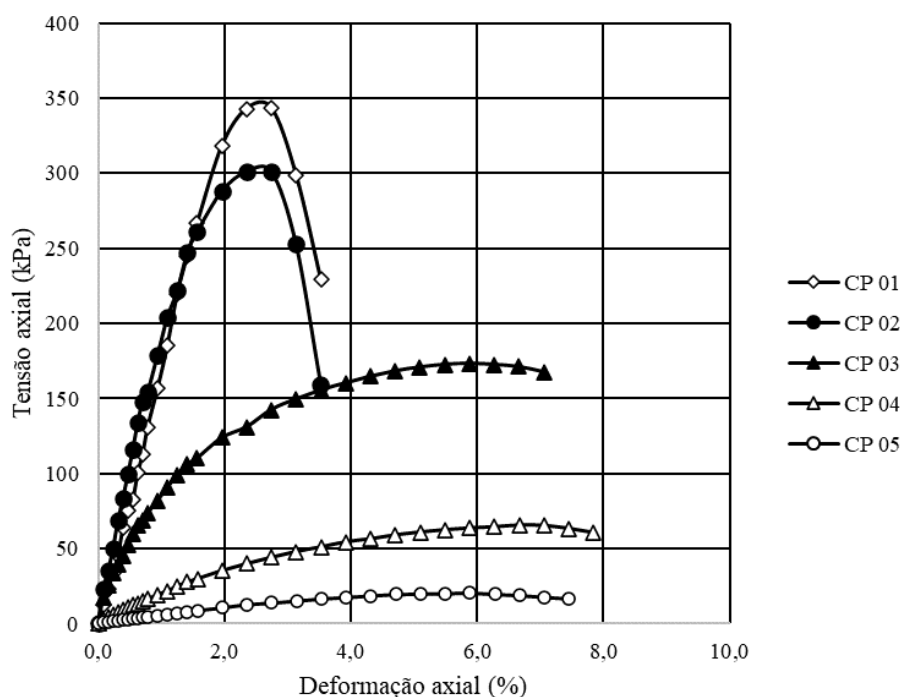
Tabela 14 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de bentonita

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	12,11	14,01	15,98	17,78	19,81
<b>RCS (<math>kN/m^2</math>)</b>	343,40	301,41	173,24	65,56	20,46

Fonte: Autoria própria

Na Figura 58, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 8% de bentonita. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 58 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de bentonita

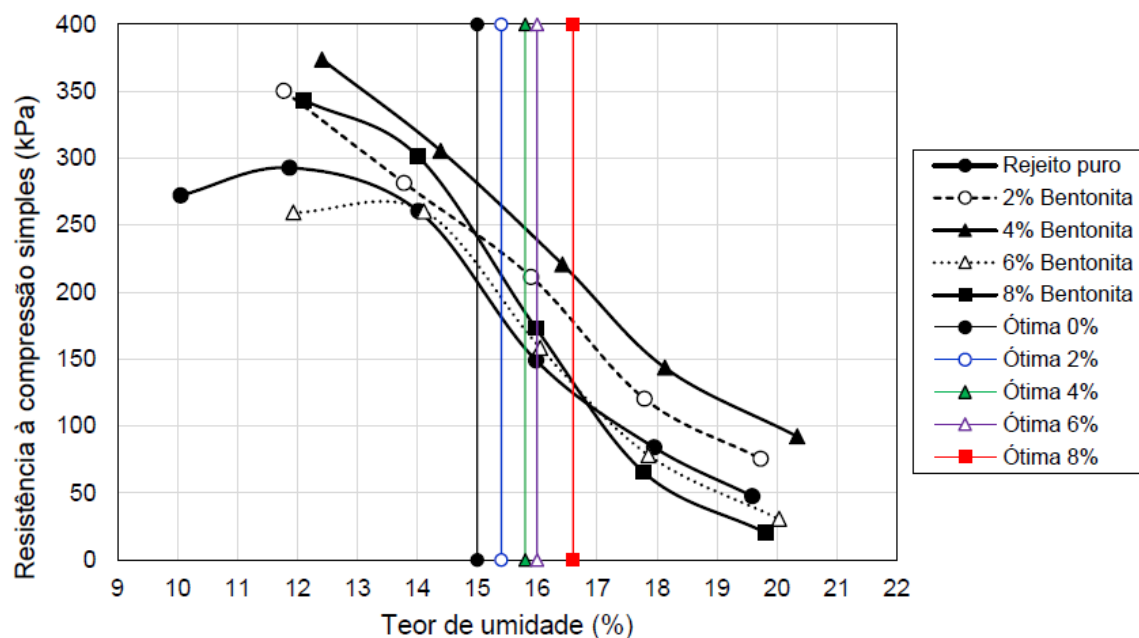


Fonte: Autoria própria

São apresentadas na Figura 59, todas as curvas de resistência à compressão simples realizadas para as misturas de rejeito com as diversas proporções de bentonita. É indicado, neste mesmo gráfico, a resistência de cada uma das misturas de acordo com a umidade ótima destes materiais ensaiados. Através deste gráfico pode-se observar que, para os percentuais de mistura de 2% e 4% de bentonita, o rejeito apresentou um pequeno crescimento na resistência, porém com teores de 6% e 8% de bentonita, identifica-se uma queda expressiva desta resistência. Barati *et al.* (2020) também identificou em seus estudos que a adição de bentonita como material estabilizante do rejeito de minério de ferro não garante ganhos quanto à resistência à compressão simples do material. Deste modo, tomando como base a Tabela 15, em que o percentual de bentonita que apresentou relativo ganho de valores de umidade ótima e de resistência à compressão simples, optou-se pela utilização do percentual de 4% de mistura de bentonita para a realização dos ensaios de triaxial CIU<sub>SAT</sub>.



Figura 59 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com bentonita



Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima

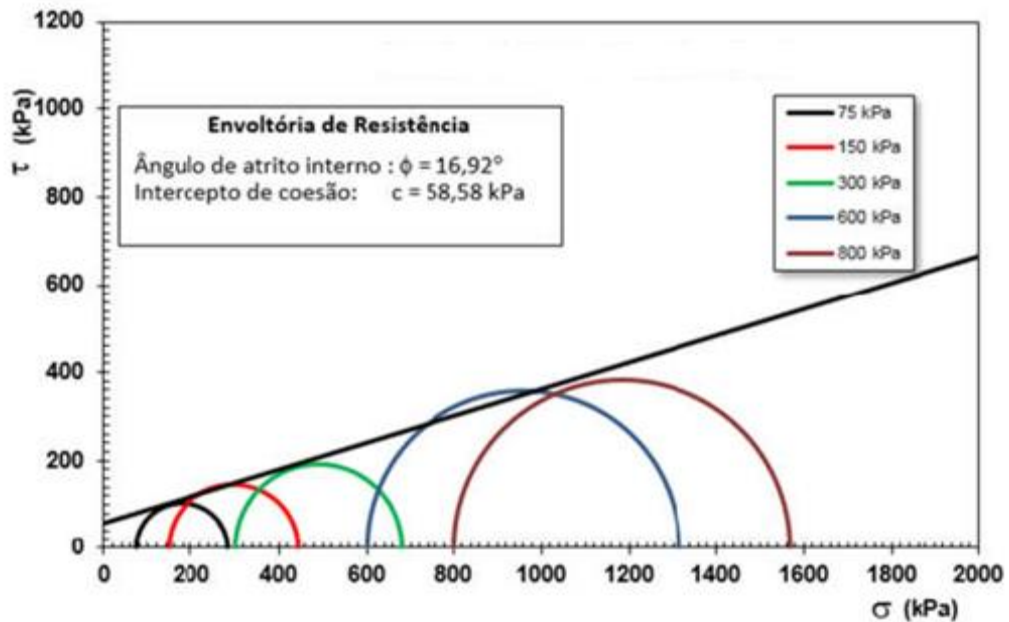
Rejeito (R) e misturas	Puro (R 0%)	R + 2% bentonita	R + 4% bentonita	R + 6% bentonita	R + 8% bentonita
$w_{ótima}$ (%)	15,00	15,40	15,80	16,00	16,60
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	207,65	230,00	247,62	160,82	132,45
Varição da $RCS$ (%)	0	+ 10,76	+ 19,25	- 22,55	- 36,21

Fonte: Autoria própria

### 5.3.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

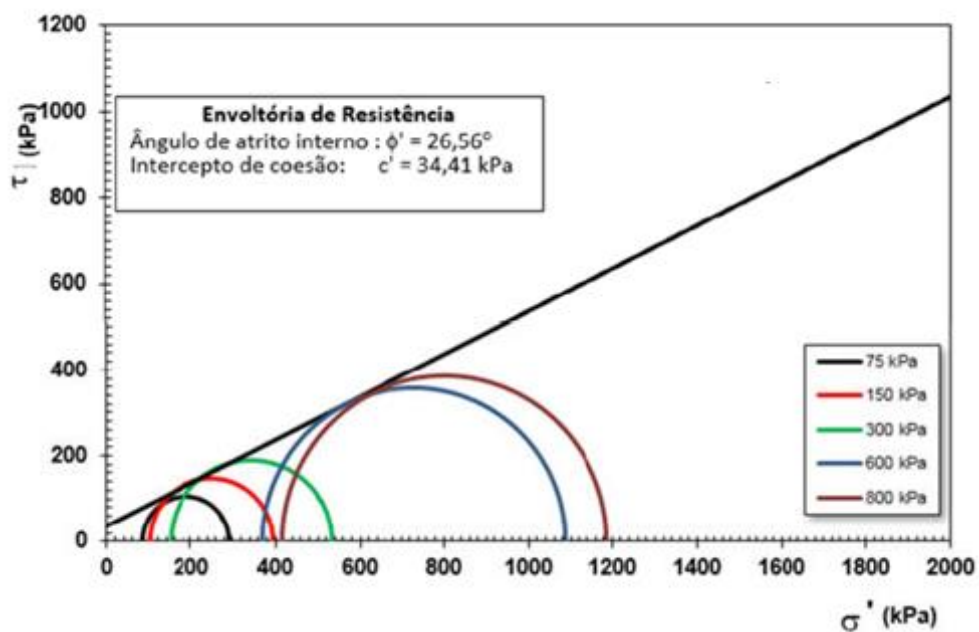
Os corpos de prova de rejeito com 4% de bentonita para os ensaios triaxiais CIUSAT foram moldados buscando-se atingir a umidade ótima e o grau de compactação igual a 100% do Proctor normal. Na Figura 60 e na Figura 61, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e efetivas, respectivamente.

Figura 60 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

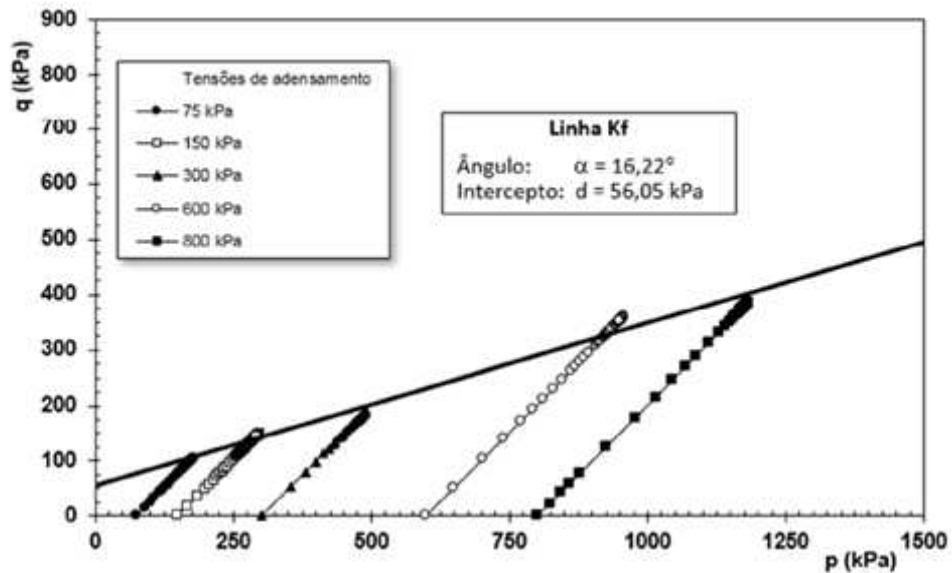
Figura 61 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

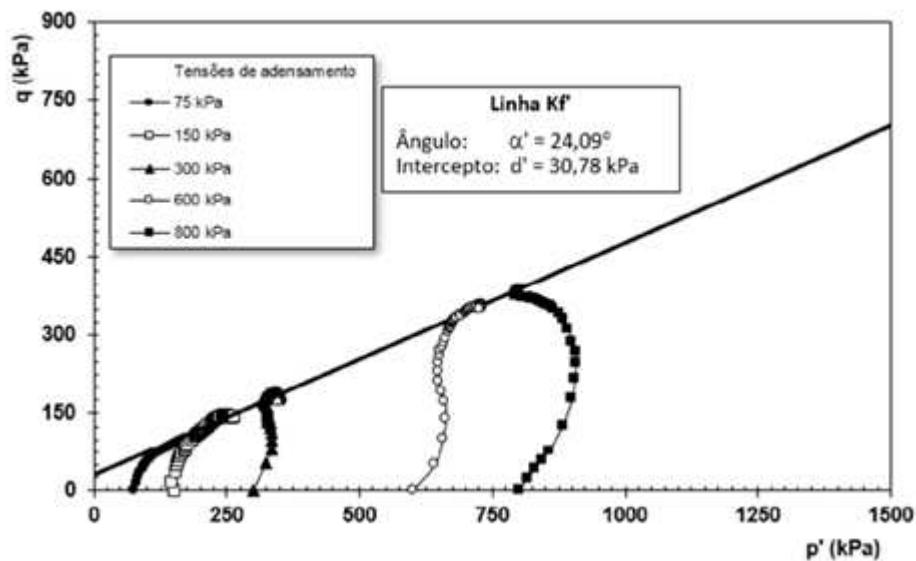
Na Figura 62 e na Figura 63, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas do rejeito com 4% de bentonita, respectivamente.

Figura 62 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

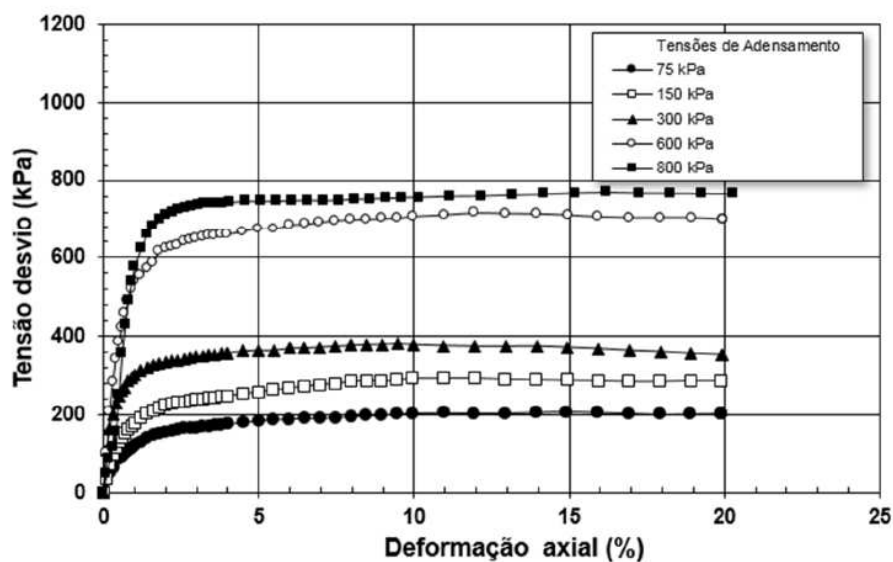
Figura 63 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

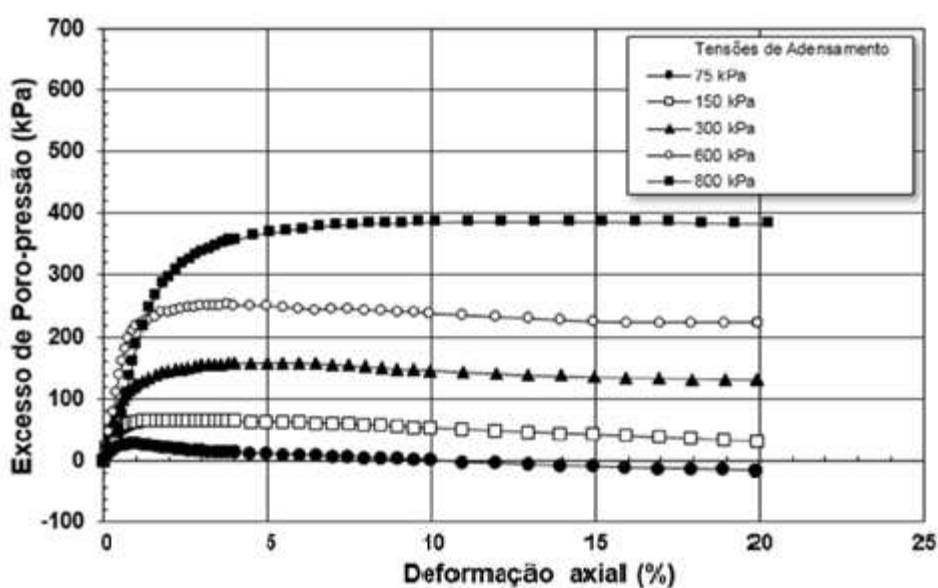
Na Figura 64, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e, na Figura 65, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

Figura 64 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

Figura 65 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 4% de bentonita)



Fonte: Autoria própria

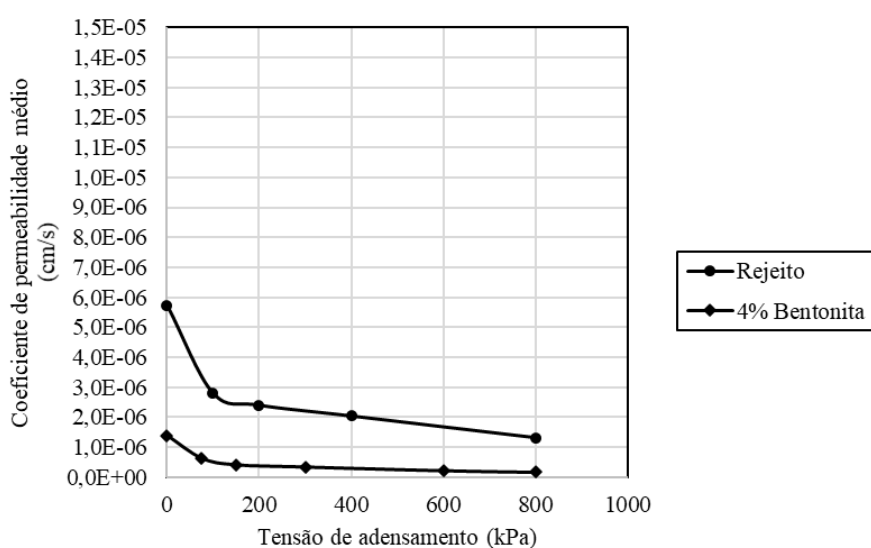
Conforme observado na Figura 63, o aumento da tensão de adensamento também gera uma tendência do rejeito com 4% de bentonita em passar do comportamento dilatante para o comportamento contrátil. Essa situação é observada principalmente na trajetória de tensões de 800kPa de tensão de adensamento. Isto indica que, em pilhas de elevadas alturas, o rejeito com 4% de bentonita pode apresentar condições de resistência não drenada, o que reduz a capacidade resistente da estrutura, reduzindo também o FS da mesma.

Por fim, na Figura 65, pode ser observado que para tensões de 75 kPa o rejeito com 4% de bentonita apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento deste CP. No CP de 150 kPa pode ser observado que a tendência também se mantém, mas a geração de poropressão negativa não é identificada pela limitação de deformação do CP no ensaio. Já para as tensões de 300 kPa, 600 kPa e 800 kPa a poropressão é positiva e aproximadamente linear, com tendência de queda para 300 kPa e 600 kPa, e sem tendência de queda para 800 kPa.

#### 5.3.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na Figura 66, são apresentadas as variações do coeficiente permeabilidade do rejeito puro e de sua mistura com 4% de bentonita em função da tensão de adensamento dos corpos de prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 16, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.

Figura 66 – Variação da permeabilidade do rejeito com 4% de bentonita



Fonte: Autoria própria

Tabela 16 – Permeabilidade do rejeito + 4% de bentonita de acordo com os níveis de tensões de adensamento

<b>CP</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tensão (kPa)</b>	0	75	150	300	600	800
<b><i>k</i> (cm/s)</b>	$1,38 \times 10^{-6}$	$6,32 \times 10^{-7}$	$4,13 \times 10^{-7}$	$3,39 \times 10^{-7}$	$2,15 \times 10^{-7}$	$1,62 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, com o aumento da tensão de adensamento, as partículas do rejeito com 4% de bentonita tendem a se organizarem melhor, de modo que os vazios sejam reduzidos. Conseqüentemente, ocorre também a redução do coeficiente de permeabilidade do material, de modo que o fluxo por entre as partículas torna-se mais difícil. A redução da permeabilidade em solos (areia siltosa) estabilizados com bentonita também foram identificados nos estudos desenvolvidos por Khalid *et al.* (2019).

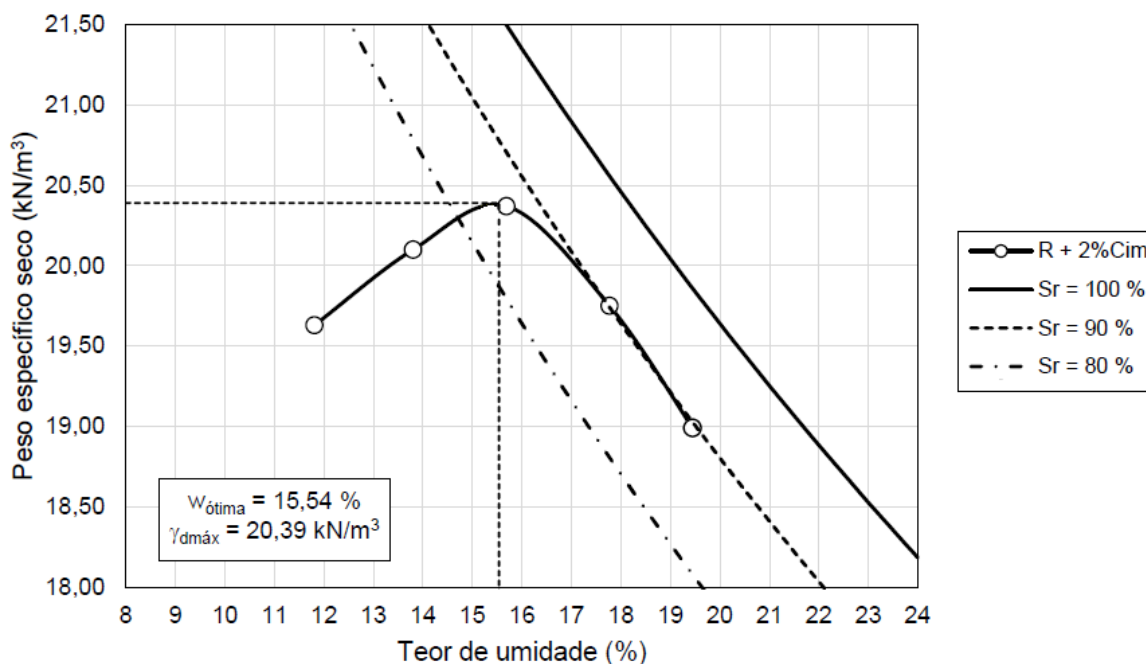
## **5.4.MISTURAS DE REJEITO E CIMENTO**

### **5.4.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO**

#### **5.4.1.1. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE CIMENTO**

Na Figura 67, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 2% de cimento e, na Tabela 17, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,54% e o peso específico seco máximo foi de 20,39 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,56 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 67 – Curva de compactação do rejeito + 2% de cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de cimento

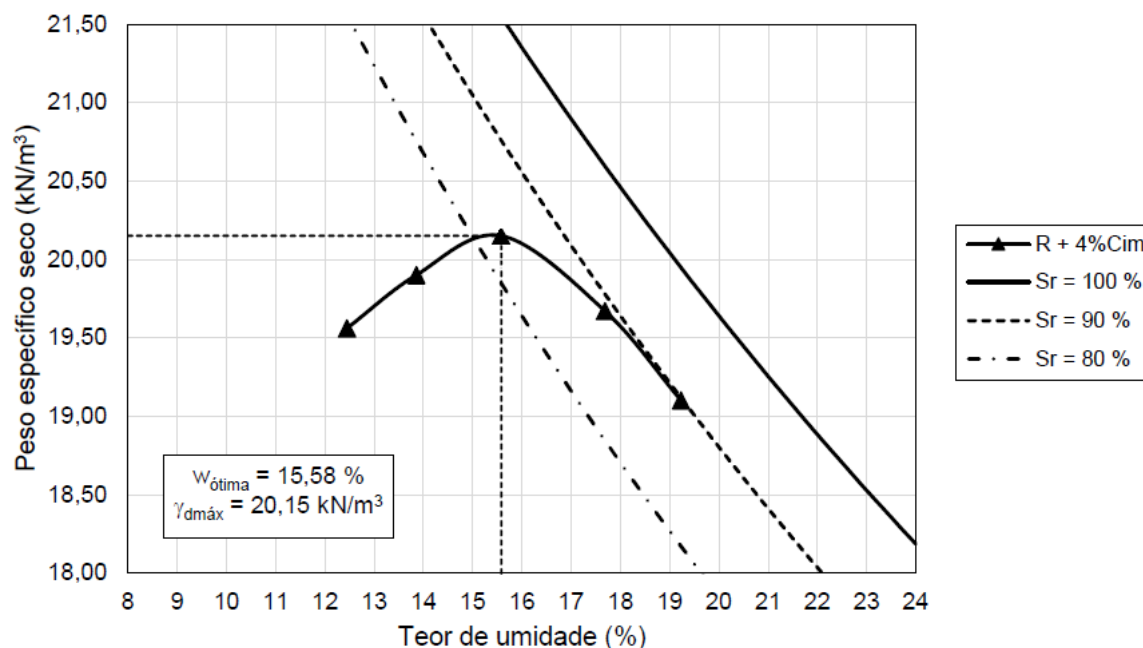
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,81	13,80	15,69	17,77	19,45
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,63	20,10	20,37	19,75	18,99

Fonte: Autoria própria

#### 5.4.1.2. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE CIMENTO

Na Figura 68, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 4% de cimento e, na Tabela 18, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,58% e o peso específico seco máximo foi de 20,15 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,29 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 68 – Curva de compactação do rejeito + 4% de cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 18 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de cimento

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,45	13,86	15,58	17,69	19,23
$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	19,56	19,90	20,15	19,67	19,10

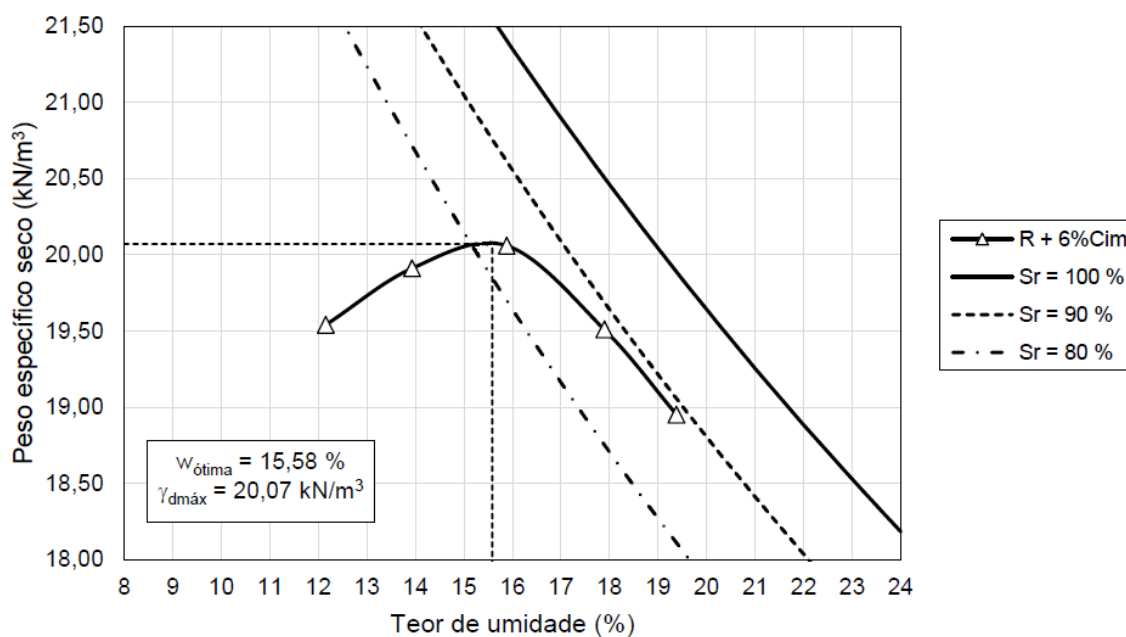
Fonte: Autoria própria

#### 5.4.1.3. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE CIMENTO

Na Figura 69, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 6% de cimento e, na Tabela 19, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,58% e o peso específico seco máximo foi de 20,07  $\text{kN/m}^3$ . Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,20  $\text{kN/m}^3$ .



Figura 69 – Curva de compactação do rejeito + 6% de cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 19 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de cimento

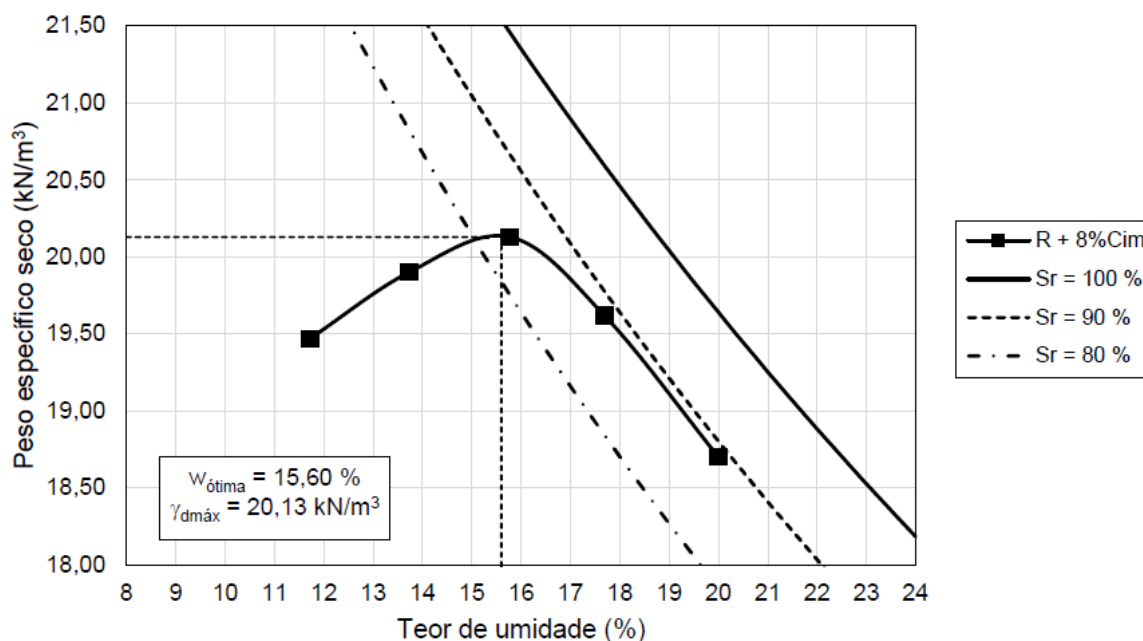
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,15	13,93	15,88	17,89	19,38
$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	19,54	19,91	20,06	19,51	18,95

Fonte: Autoria própria

#### 5.4.1.4. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE CIMENTO

Na Figura 70, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 8% de cimento e, na Tabela 20, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,60% e o peso específico seco máximo foi de 20,13 kN/m³. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,27 kN/m³.

Figura 70 – Curva de compactação do rejeito + 8% de cimento



Fonte: Autoria própria

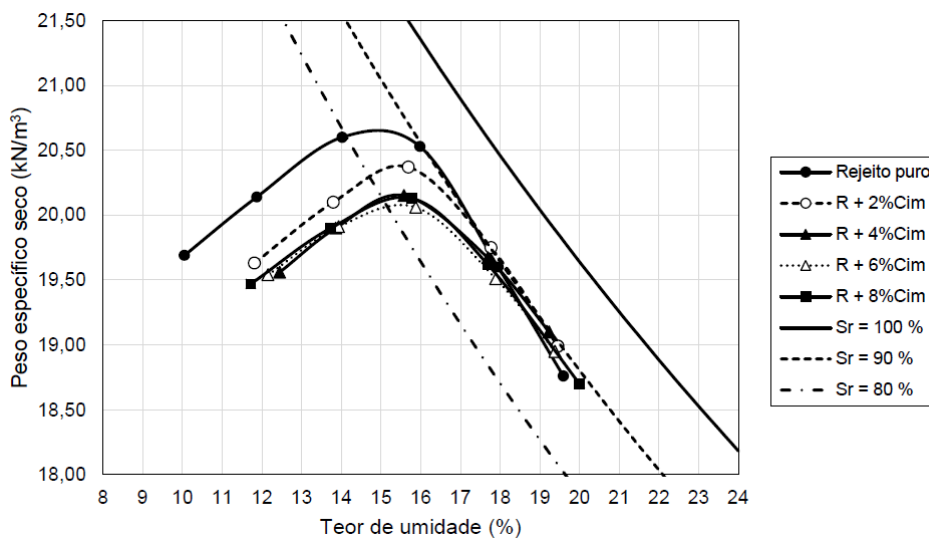
Tabela 20 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de cimento

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,72	13,73	15,77	17,69	20,00
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,47	19,90	20,13	19,62	18,70

Fonte: Autoria própria

Na Figura 71, são apresentadas as curvas de compactação do rejeito puro e de das misturas com cimento, na qual pode ser identificado o aumento da umidade ótima e redução da massa específica seca máxima, com o teor de 2% de cimento na mistura. A partir do teor de 4% de cimento na mistura, não foi identificada grande variação dos resultados entre as misturas. Comportamento este semelhante aos resultados encontrados por Barati *et al.* (2020), em estudos de estabilização de rejeito de minério de ferro com misturas com cimento para utilização como elementos construtivos de estradas.

Figura 71 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com cimento



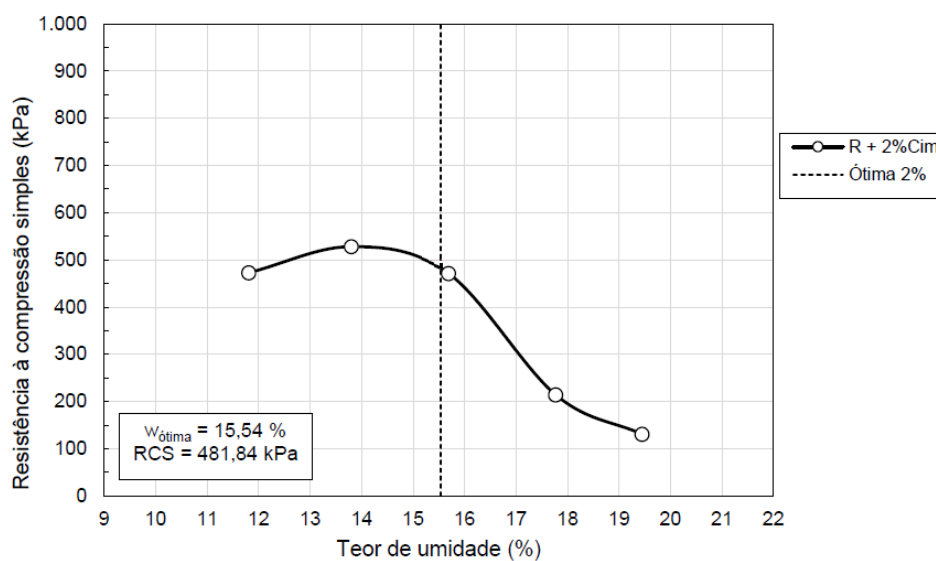
Fonte: Autoria própria

## 5.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

### 5.4.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE CIMENTO

Na Figura 72 e na Tabela 21, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 72 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cimento



Fonte: Autoria própria

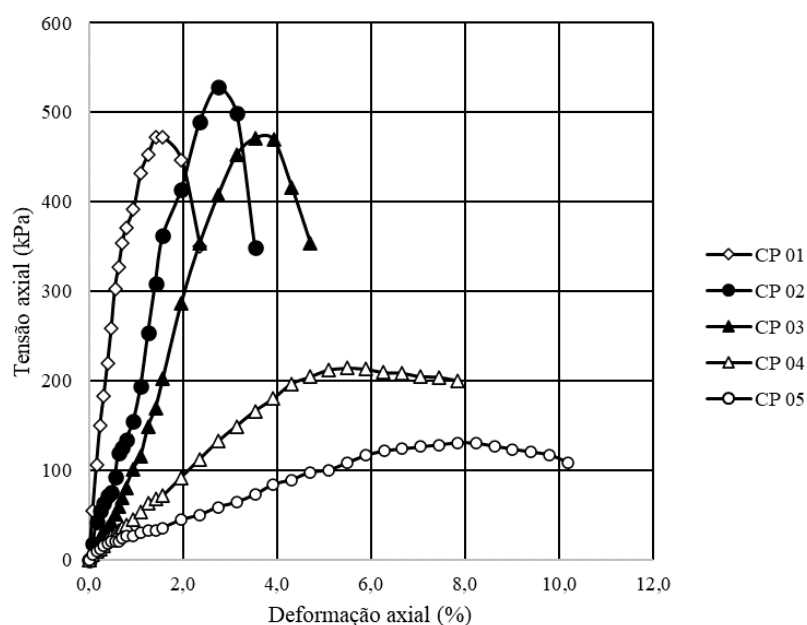
Tabela 21 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cimento

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,81	13,80	15,69	17,77	19,45
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	472,76	527,96	471,32	214,22	130,61

Fonte: Autoria própria

Na Figura 73, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cimento. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 73 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de cimento

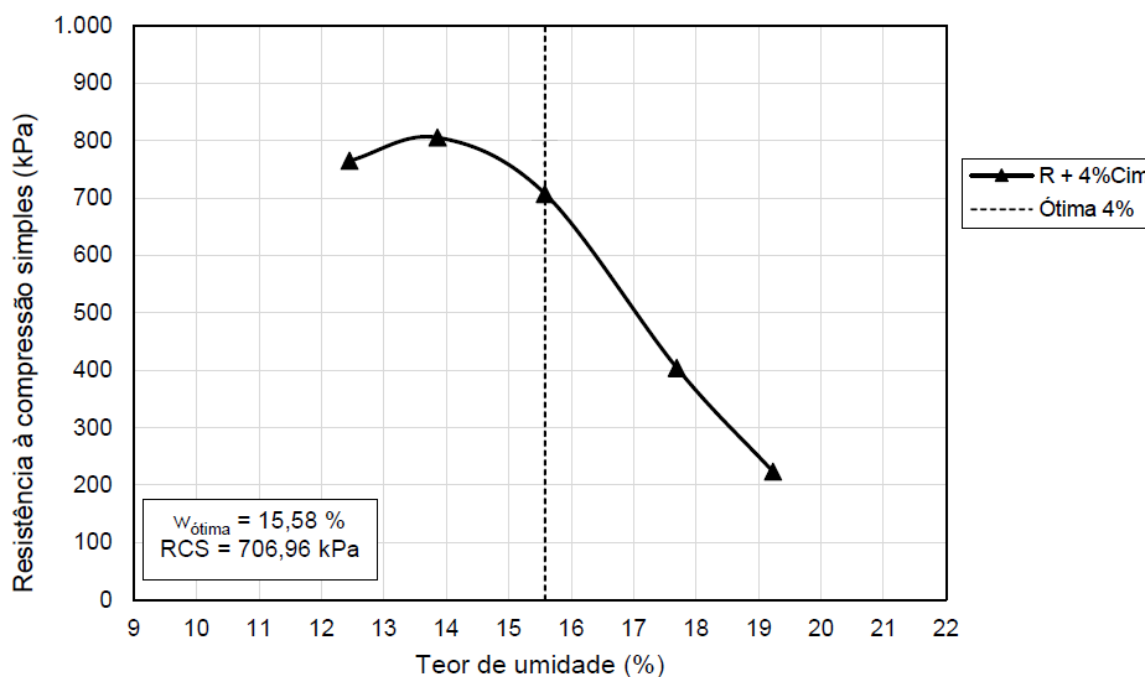


Fonte: Autoria própria

#### 5.4.2.2.RCS DE REJEITO + 4% DE CIMENTO

Na Figura 74 e na Tabela 22, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 74 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cimento



Fonte: Autoria própria

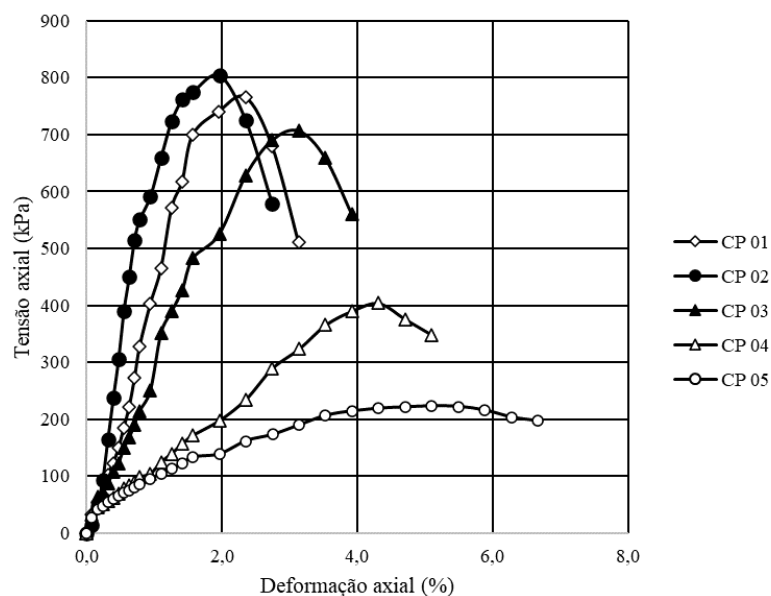
Tabela 22 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cimento

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,45	13,86	15,58	17,69	19,23
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	764,69	804,25	706,96	404,02	223,25

Fonte: Autoria própria

Na Figura 75, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cimento. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 75 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de cimento

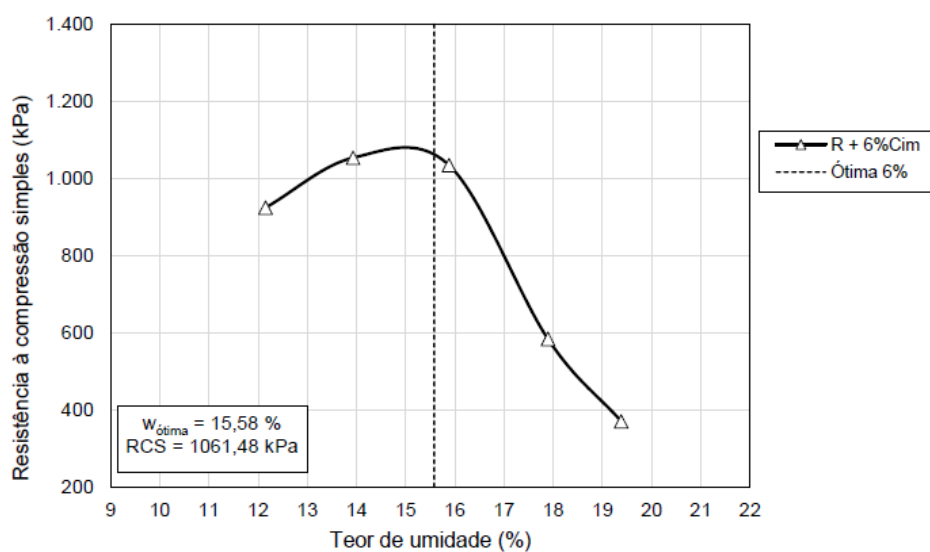


Fonte: Autoria própria

#### 5.4.2.3.RCS DE REJEITO + 6% DE CIMENTO

Na Figura 76 e na Tabela 23, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 76 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cimento



Fonte: Autoria própria

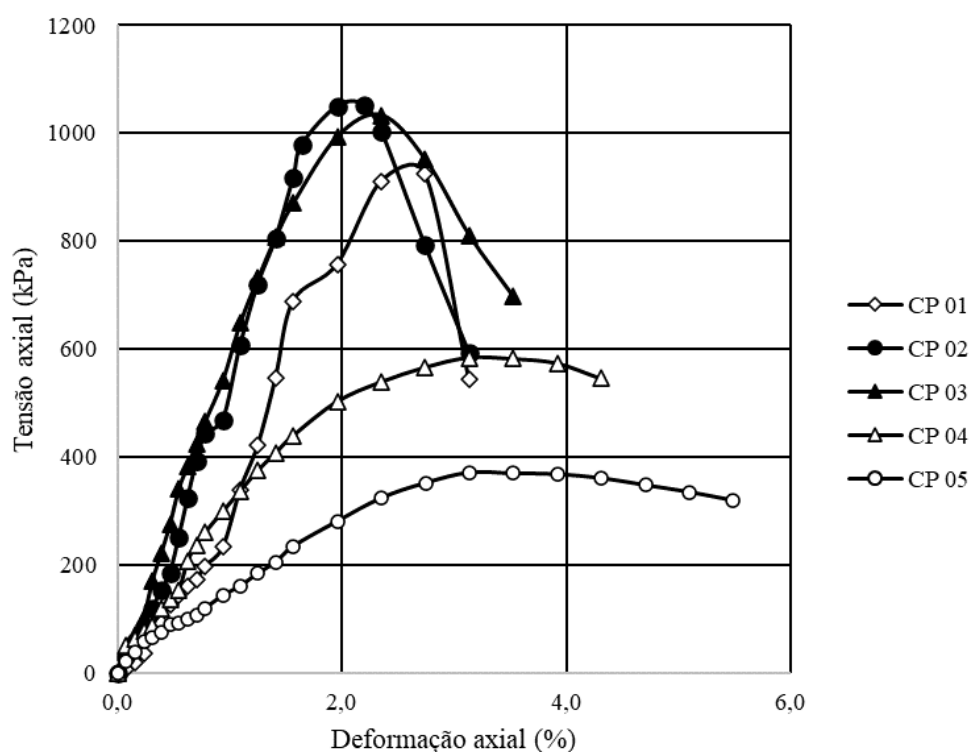
Tabela 23 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cimento

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,15	13,93	15,88	17,89	19,38
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	923,94	1053,04	1033,68	584,26	371,01

Fonte: Autoria própria

Na Figura 77, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cimento. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 77 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de cimento

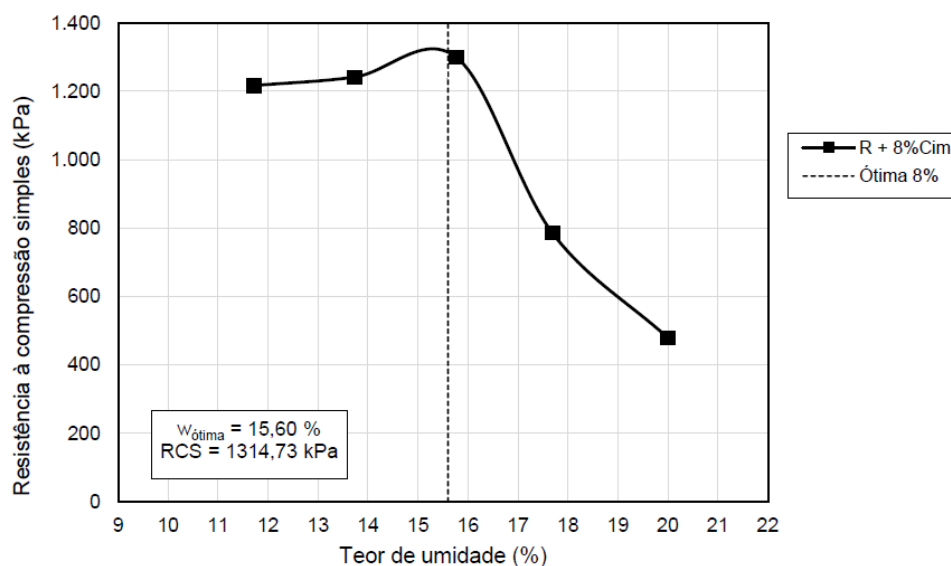


Fonte: Autoria própria

#### 5.4.2.4.RCS DE REJEITO + 8% DE CIMENTO

Na Figura 78 e na Tabela 24, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 78 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 24 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cimento

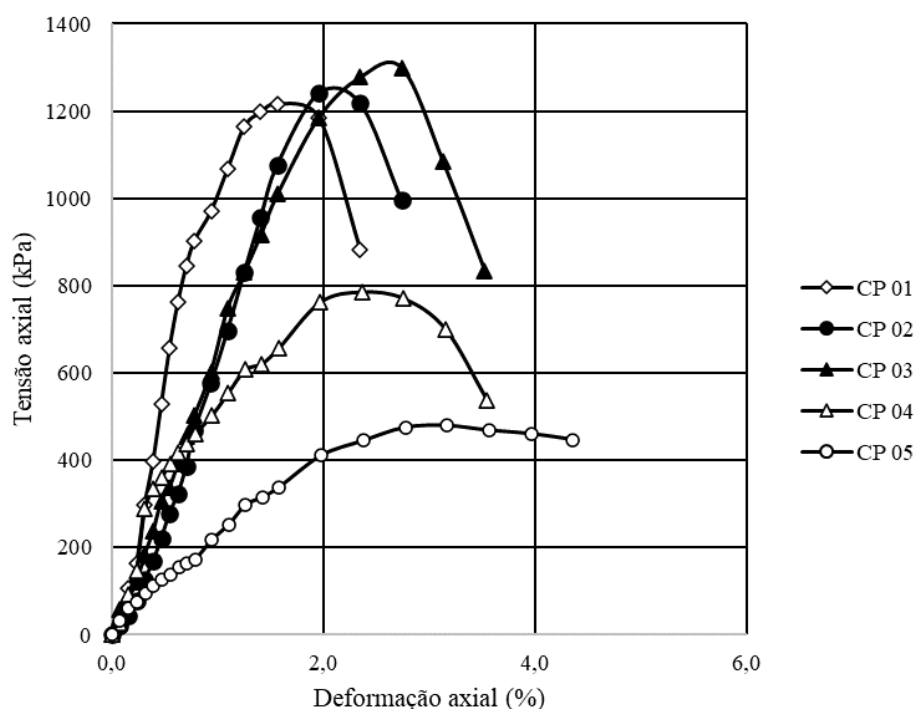
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,72	13,73	15,77	17,69	20,00
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	1217,13	1241,85	1299,38	786,30	479,16

Fonte: Autoria própria

Na Figura 79, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cimento. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).



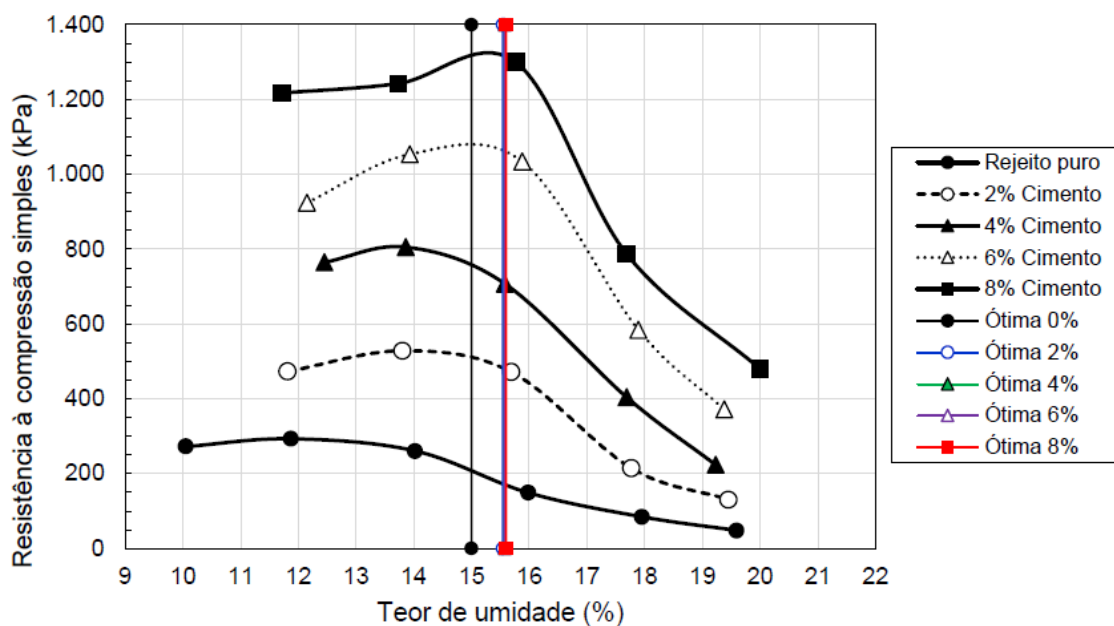
Figura 79 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de cimento



Fonte: Autoria própria

Na Figura 80, são apresentadas todas as curvas de resistência à compressão simples obtidas para as misturas de rejeito com as diversas proporções de cimento. É indicado, neste mesmo gráfico, a resistência de cada uma das misturas de acordo com a umidade ótima destes materiais ensaiados. Por meio deste gráfico pode-se observar que para os percentuais de mistura indicaram umidade ótima bem próximas e crescimentos constante das resistências à compressão simples de acordo com o aumento da utilização do cimento. Barati *et al.* (2020) também identificou em seus estudos que a adição de cimento como material estabilizante do rejeito de minério de ferro garante ganhos consideráveis quanto à resistência à compressão simples do material (RCS) Deste modo, tomando como base a Tabela 25, em que a adição de cimento com menor percentual de aditivo apresentou ganho considerável de resistência, 132,04% de aumento, pelo que se optou pela utilização do percentual de 2% de mistura de cimento para a realização dos ensaios de triaxial CIU<sub>SAT</sub>, afinal o ganho de resistência já se apresentava satisfatório.

Figura 80 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 25 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima

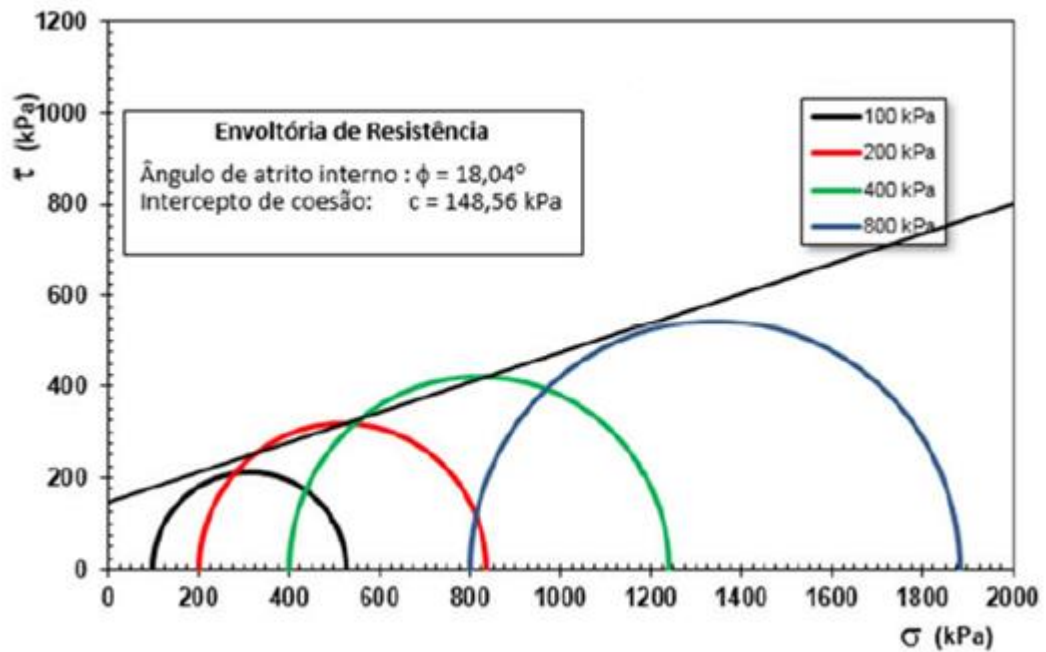
Rejeito (R) e misturas	Puro (R 0%)	R + 2% cimento	R + 4% cimento	R + 6% cimento	R + 8% cimento
$w_{ótima}$ (%)	15,00	15,54	15,58	15,58	15,60
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	207,65	481,84	706,96	1061,48	1314,73
Varição da RCS (%)	0	+ 132,04	+ 240,46	+ 411,19	+ 533,15

Fonte: Autoria própria

### 5.4.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

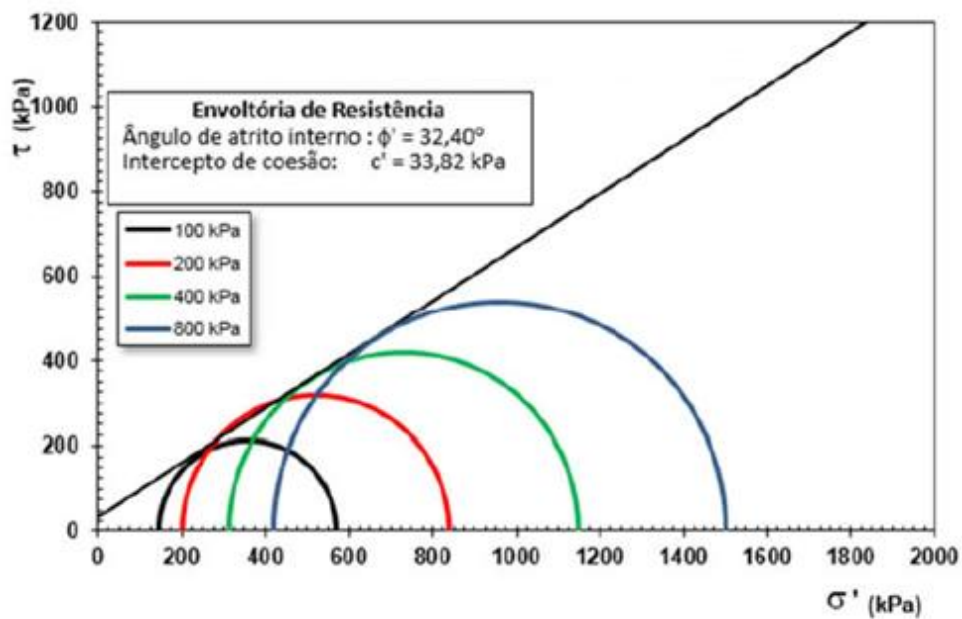
Os corpos de prova de rejeito com 2% de cimento para os ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> foram moldados buscando-se atingir a umidade ótima e o grau de compactação igual a 100% do Proctor normal. Na Figura 81 e na Figura 82, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e efetivas.

Figura 81 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

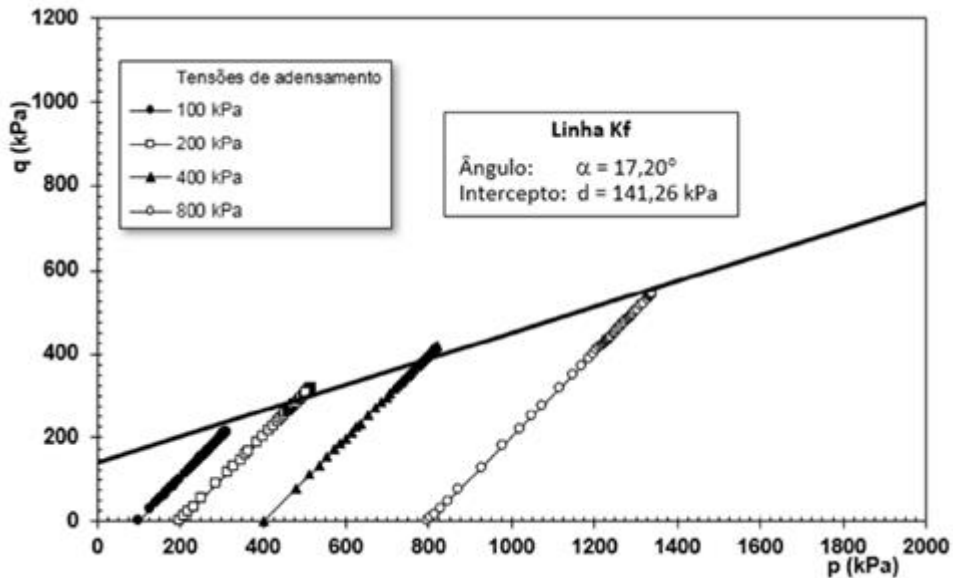
Figura 82 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

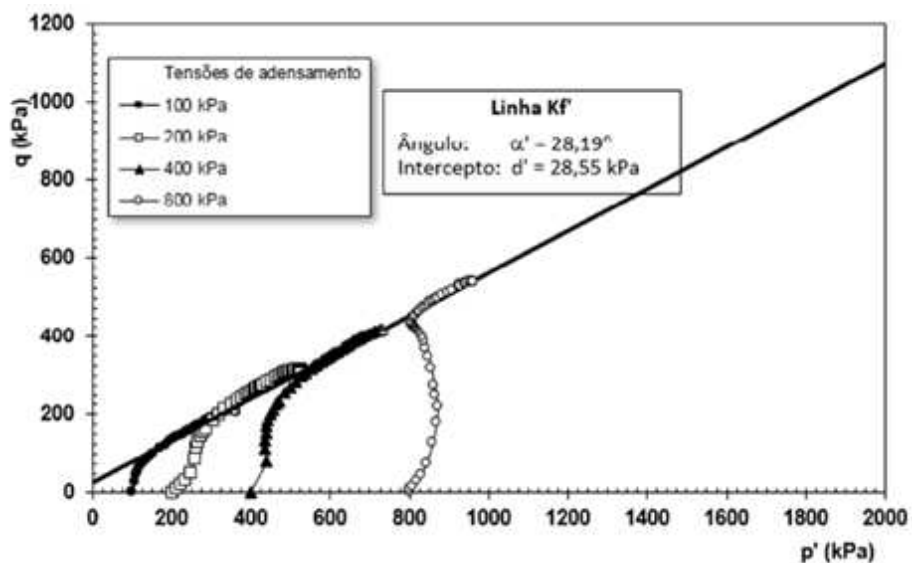
Na Figura 83 e na Figura 84, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas do rejeito com 2% de cimento, respectivamente.

Figura 83 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

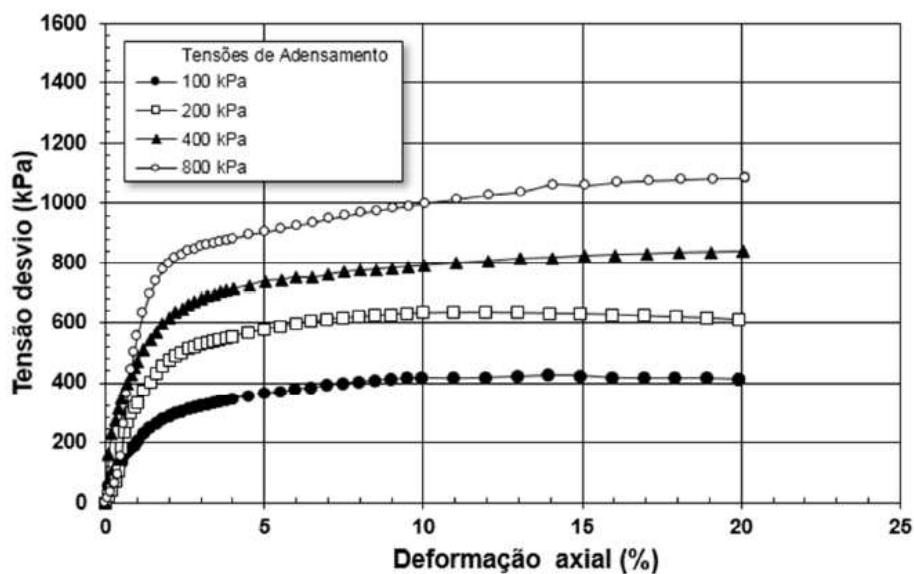
Figura 84 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

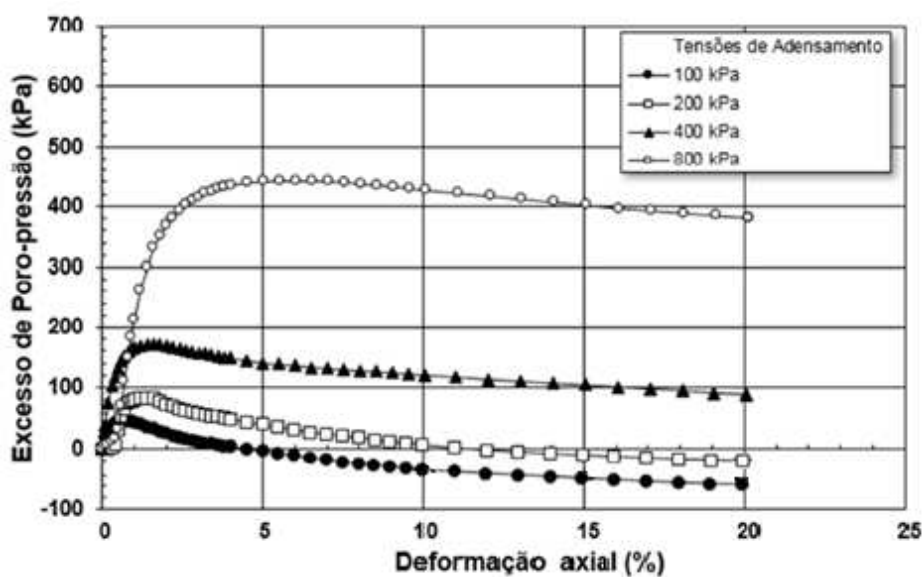
Na Figura 85, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e, na Figura 86, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

Figura 85 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

Figura 86 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cimento)



Fonte: Autoria própria

Como observado na Figura 84, o aumento da tensão de adensamento gera uma tendência do rejeito com 2% de cimento em passar do comportamento dilatante para o comportamento contrátil. Essa situação é observada principalmente na trajetória de tensões de 800kPa de tensão de adensamento, porém, de forma bem menos acentuada que o rejeito puro e a mistura de rejeito com bentonita. Mesmo assim, isto indica que em pilhas de elevadas alturas, o rejeito com 2% de cimento pode apresentar condições de resistência não drenada, o que reduz a capacidade resistente da estrutura, reduzindo também o FS da mesma.

Este comportamento dilatante para tensões de até 200 kPa também foi identificado nos estudos desenvolvidos por Consoli (2022), no qual a existência de ligações cimentícias entre as partículas de rejeitos (devido às misturas de rejeitos com cimento *Portland*) evita que o rejeito se comporte de forma contrátil e melhora o seu comportamento mecânico. Já para maiores níveis de tensões, autores como Consoli *et al.* (2013), Coop *et al.* (2003) e Airey (1993) também indicaram a existência de comportamento contrátil destas misturas.

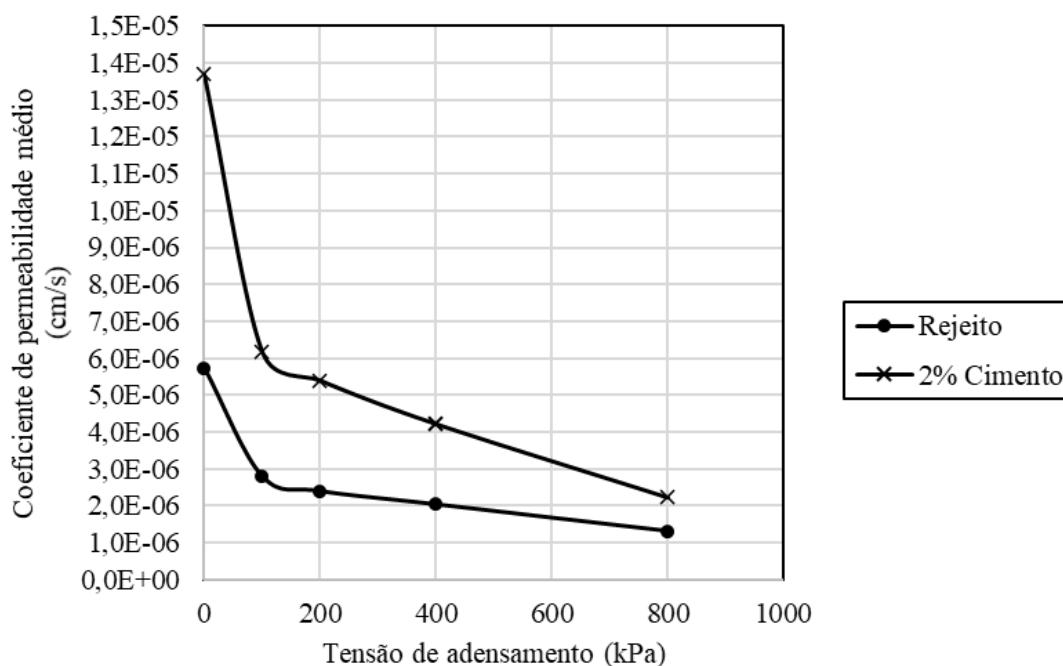
Diambra *et al.* (2017) indicam que esta boa resposta mecânica existente na cimentação do material aditivado está relacionada à boa distribuição granulométrica do material, com presença de silte, areia fina e argila, indicando relativamente uma boa distribuição granulométrica. Rios *et al.* (2013) também indicam que em condições mineralógicas semelhantes, a distribuição granulométrica é o fator mais relevante na avaliação da eficácia da utilização do cimento como aditivo em solos. Estes itens puderam ser confirmados nos resultados dos ensaios desenvolvidos para as misturas de rejeito e cimento.

Por fim, na Figura 86, pode ser observado que, para tensões de 100kPa e 200 kPa, o rejeito com 2% de cimento apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento destes CPs. Já para as tensões de 400kPa e 800 kPa a poropressão é positiva, mas apresenta a tendência de redução com o andamento do ensaio.

#### **5.4.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE**

Na Figura 87, são apresentadas as variações do coeficiente permeabilidade do rejeito puro e de sua mistura com 2% de cimento em função da tensão de adensamento dos corpos de prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 26, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.

Figura 87 – Variação da permeabilidade do rejeito com 2% de cimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 26 – Permeabilidade do rejeito + 2% de cimento de acordo com os níveis de tensões de adensamento

CP	1	2	3	4	5
<b>Tensão (kPa)</b>	0	100	200	400	800
<b><i>k</i> (cm/s)</b>	$1,37 \times 10^{-5}$	$6,18 \times 10^{-6}$	$5,40 \times 10^{-6}$	$4,22 \times 10^{-6}$	$2,22 \times 10^{-6}$

Fonte: Autoria própria

Para a mistura do rejeito com 2% de cimento foi observado aumento da permeabilidade ( $k$ ) em relação ao rejeito puro, o que provavelmente foi devido à liberação de cal no início do processo de hidratação do cimento, que pode ter provocado floculação de partículas. Como materiais com estruturas floculadas são mais permeáveis, justifica-se então o comportamento observado. Porém, verifica-se que, com o aumento da tensão de adensamento, a redução da permeabilidade ( $k$ ) na mistura rejeito com cimento foi bem mais acentuada em relação ao rejeito puro. Provavelmente pelo reflexo de quebra e fechamento da estrutura floculada para maiores níveis de tensões.

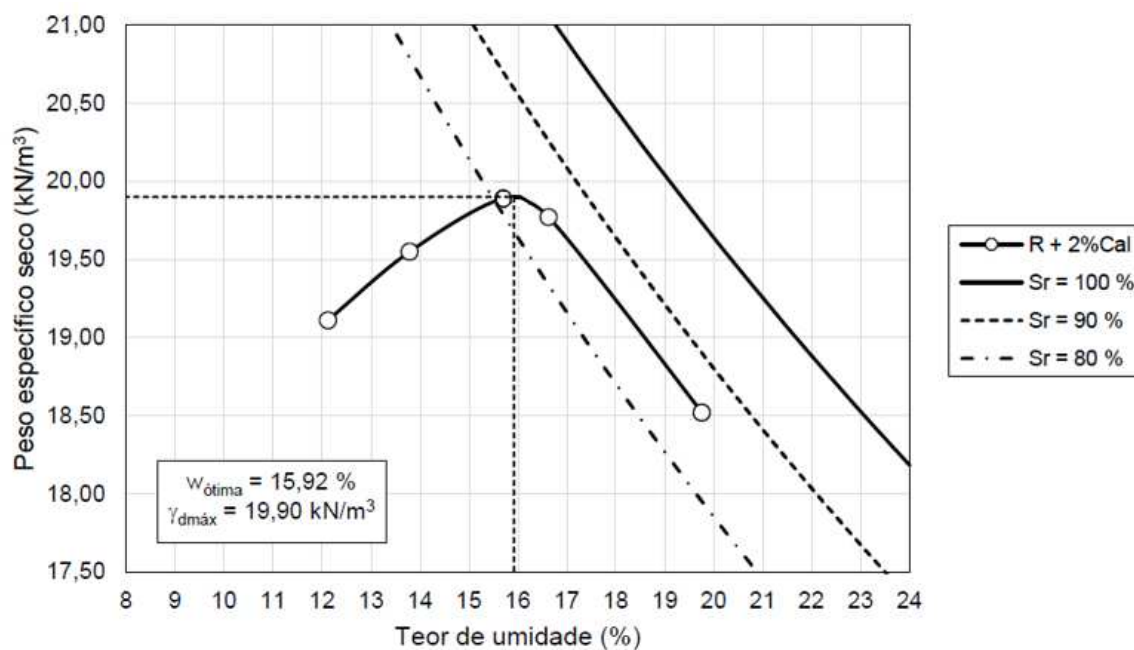
## 5.5. MISTURAS DE REJEITO E CAL

### 5.5.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

#### 5.5.1.1. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE CAL

Na Figura 88, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 2% de cal e, na Tabela 27, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,92% e o peso específico seco máximo foi de 19,90 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,07 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 88 – Curva de compactação do rejeito + 2% de cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 27 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,12	13,79	15,70	16,63	19,76
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,11	19,55	19,89	19,77	18,52

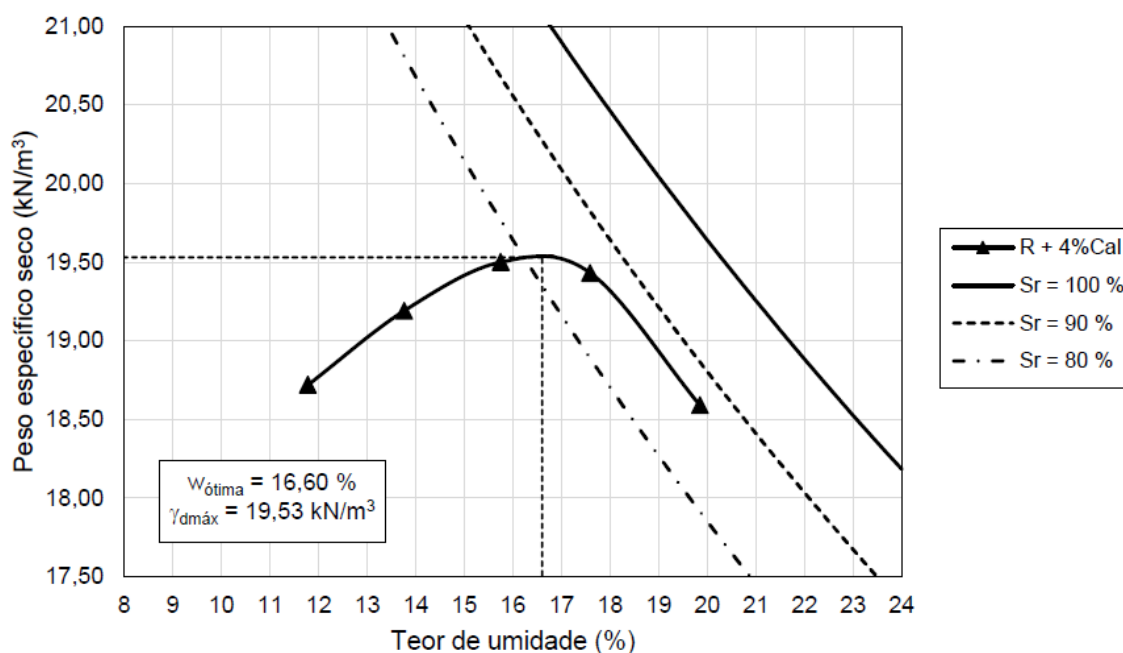
Fonte: Autoria própria



### 5.5.1.2. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE CAL

Na Figura 89, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 4% de cal e, na Tabela 28, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,60% e o peso específico seco máximo foi de 19,53 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,77 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 89 – Curva de compactação do rejeito + 4% de cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 28 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,78	13,76	15,75	17,59	19,85
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,72	19,19	19,50	19,43	18,59

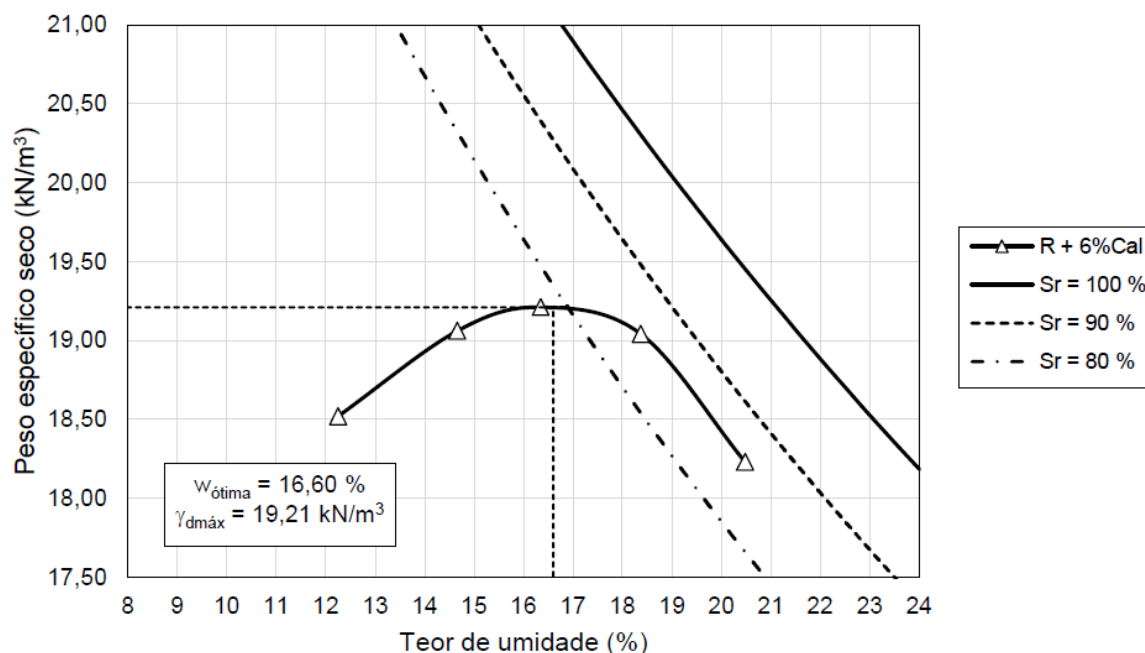
Fonte: Autoria própria

### 5.5.1.3. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE CAL

Na Figura 90, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 6% de cal e, na Tabela 29, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,60% e o peso

específico seco máximo foi de 19,21 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,40 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 90 – Curva de compactação do rejeito + 6% de cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 29 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de cal

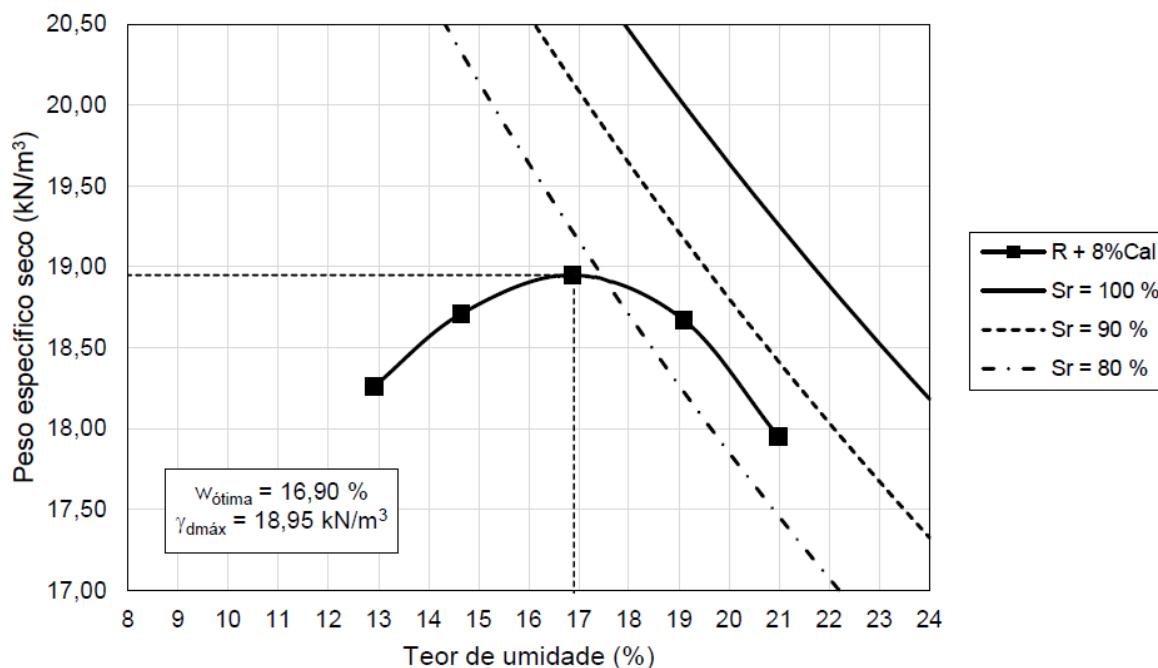
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,25	14,66	16,35	18,37	20,48
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,52	19,06	19,21	19,04	18,23

Fonte: Autoria própria

#### 5.5.1.4. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE CAL

Na Figura 91, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 8% de cal e, na Tabela 30, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,90% e o peso específico seco máximo foi de 18,95 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,15 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 91 – Curva de compactação do rejeito + 8% de cal



Fonte: Autoria própria

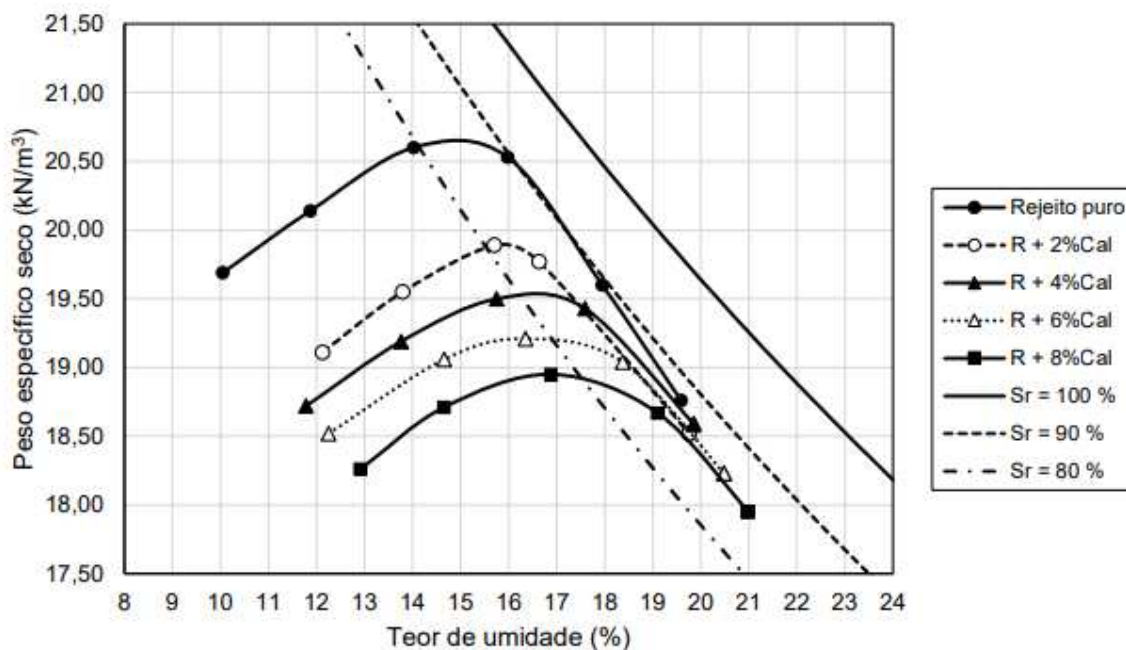
Tabela 30 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,91	14,65	16,88	19,10	20,98
$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	18,26	18,71	18,95	18,67	17,95

Fonte: Autoria própria

Na Figura 92, são apresentadas as curvas de compactação do rejeito puro e das misturas com cal, na qual pode ser identificada a tendência foi de aumento da umidade ótima e de redução da massa específica seca máxima, com o aumento do teor de cal na mistura.

Figura 92 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com cal



Fonte: Autoria própria

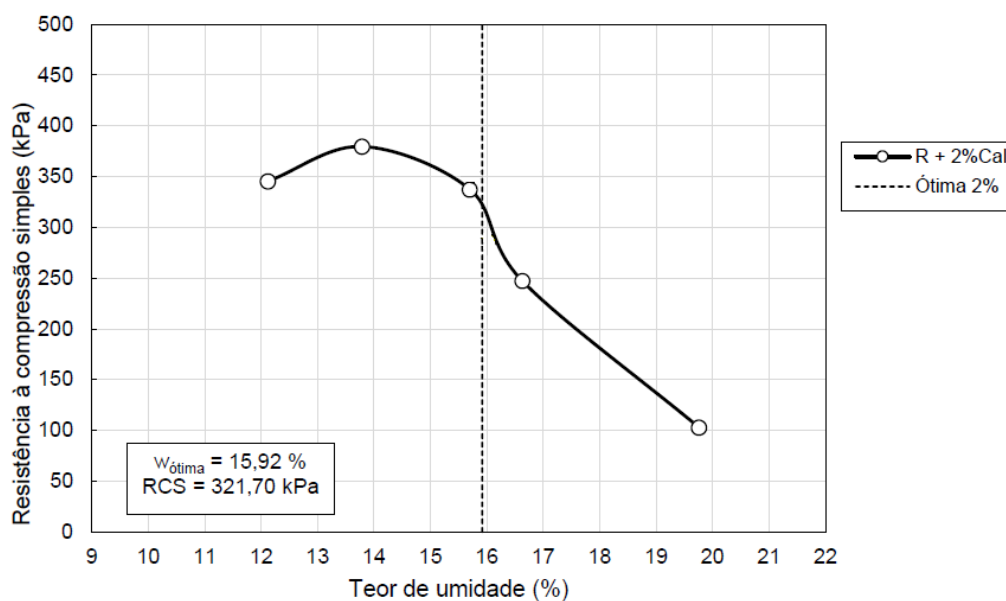
Assim como identificado no estudo desenvolvido por Moh *et al.* (1997), as misturas de cal com algumas tipologias de solo apresentaram redução do peso específico seco máximo e o aumento da umidade ótima. No rejeito este comportamento apresenta-se de forma semelhante.

## 5.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

### 5.5.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE CAL

Na Figura 93 e na Tabela 31, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 93 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cal



Fonte: Autoria própria

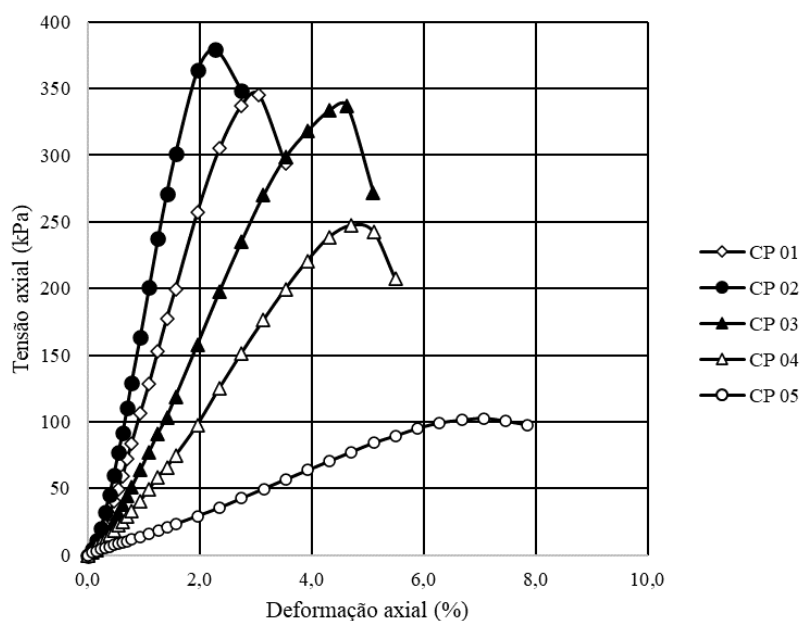
Tabela 31 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
w (%)	12,12	13,79	15,70	16,63	19,76
RCS (kN/m <sup>2</sup> )	345,25	379,55	337,16	247,21	102,79

Fonte: Autoria própria

Na Figura 94, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 2% de cal. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 94 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de cal

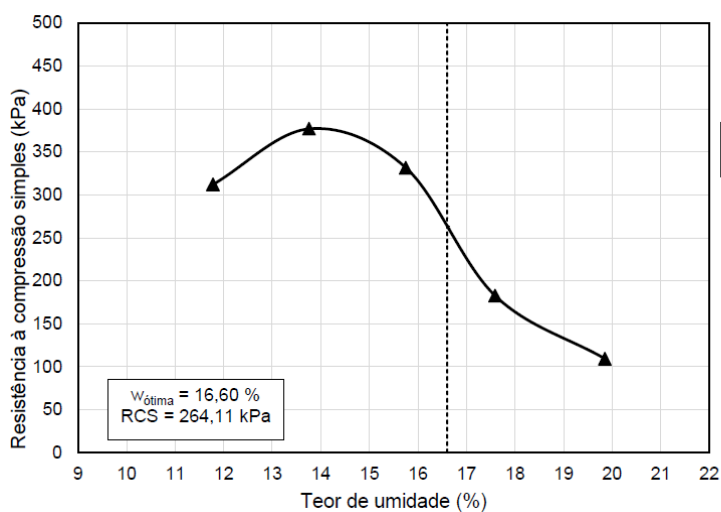


Fonte: Autoria própria

### 5.5.2.2.RCS DE REJEITO + 4% DE CAL

Na Figura 95 e na Tabela 32, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 95 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cal



Fonte: Autoria própria

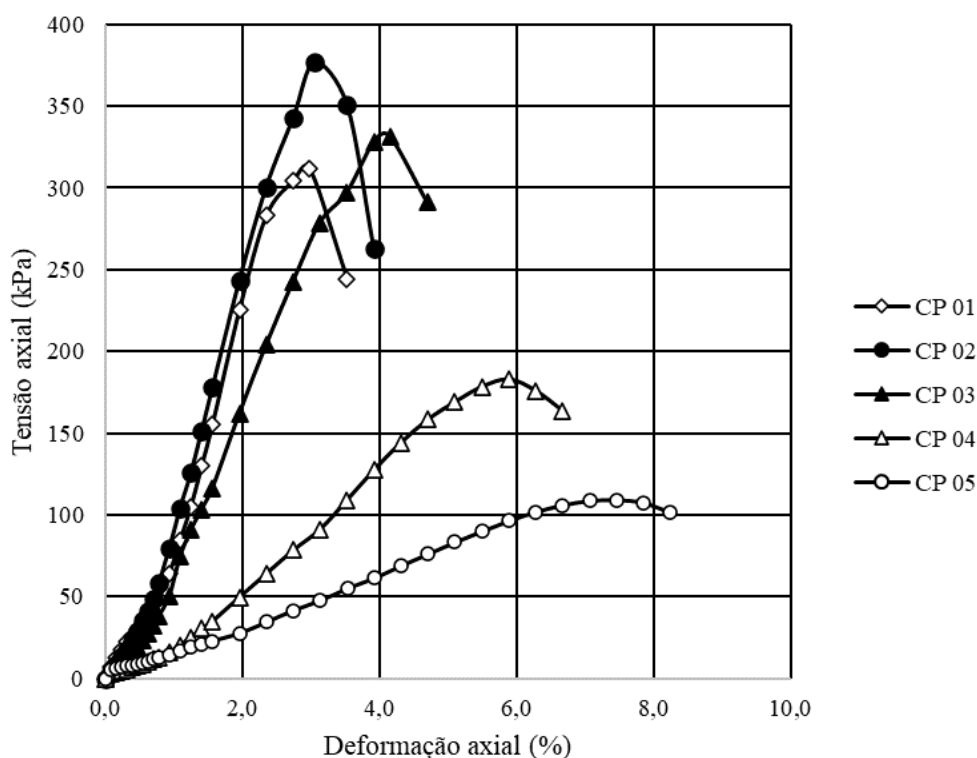
Tabela 32 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,78	13,76	15,75	17,59	19,85
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	312,07	376,87	331,64	182,77	109,29

Fonte: Autoria própria

Na Figura 96, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 4% de cal. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 96 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de cal

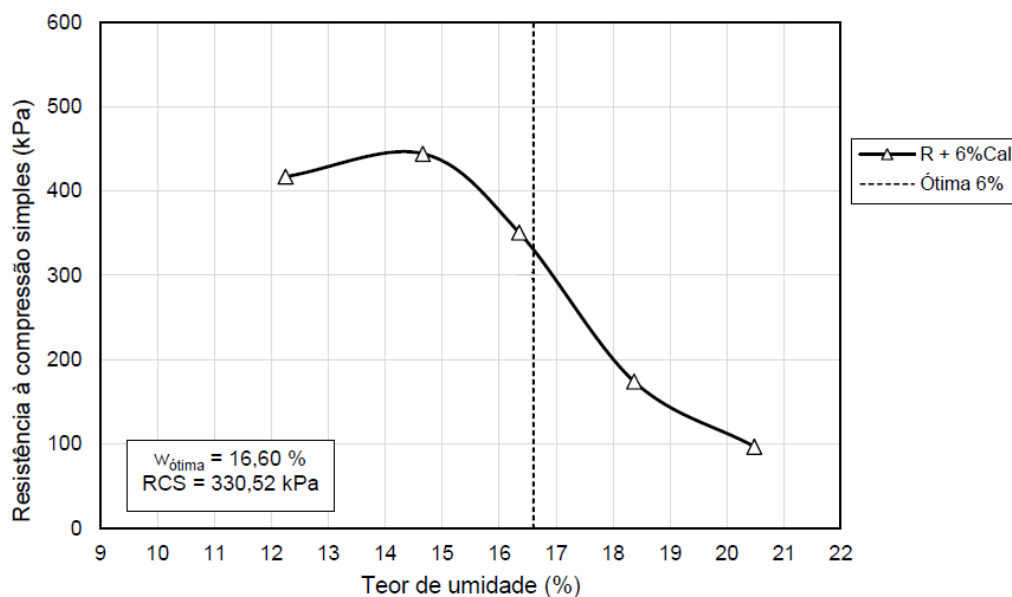


Fonte: Autoria própria

### 5.5.2.3.RCS DE REJEITO + 6% DE CAL

Na Figura 97 e na Tabela 33, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 97 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 33 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cal

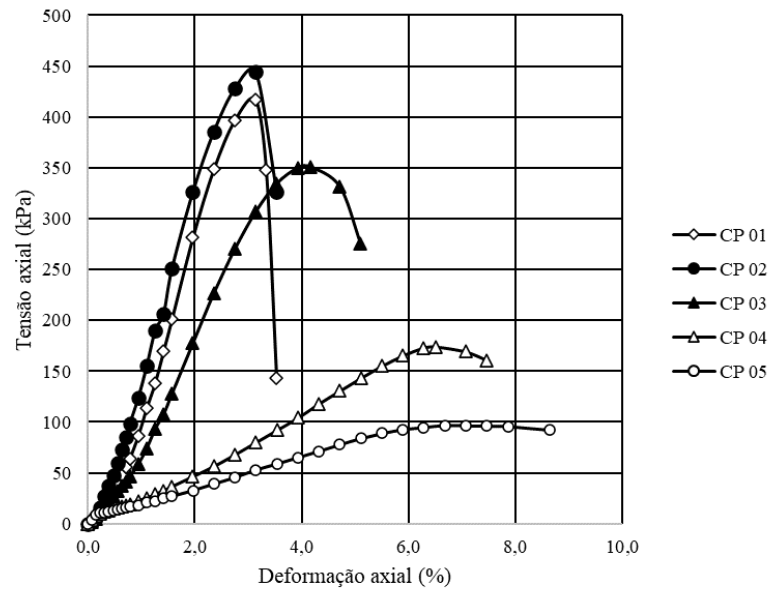
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	12,25	14,66	16,35	18,37	20,48
<b>RCS (kN/m<sup>2</sup>)</b>	416,87	444,10	350,68	174,19	96,92

Fonte: Autoria própria

Na Figura 98, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 6% de cal. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).



Figura 98 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de cal

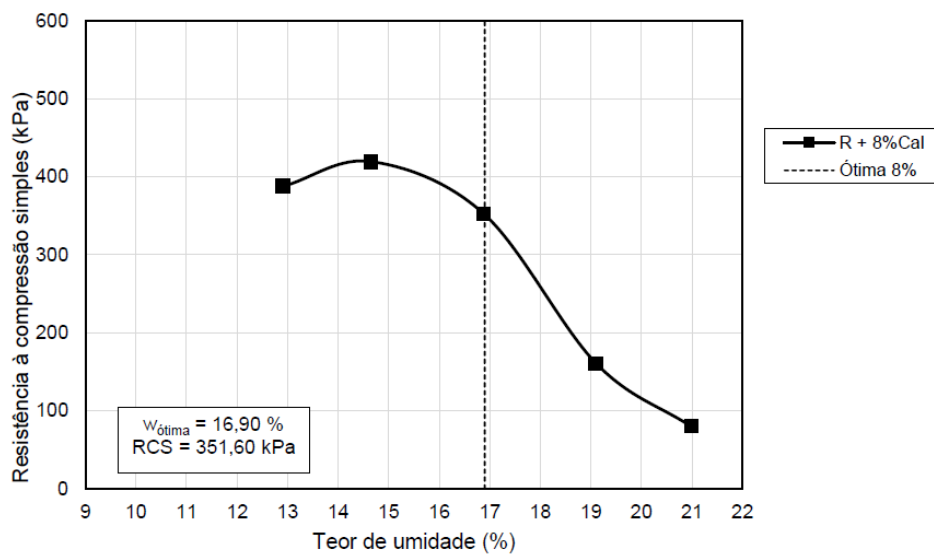


Fonte: Autoria própria

#### 5.5.2.4.RCS DE REJEITO + 8% DE CAL

Na Figura 99 e na Tabela 34, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 99 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cal



Fonte: Autoria própria

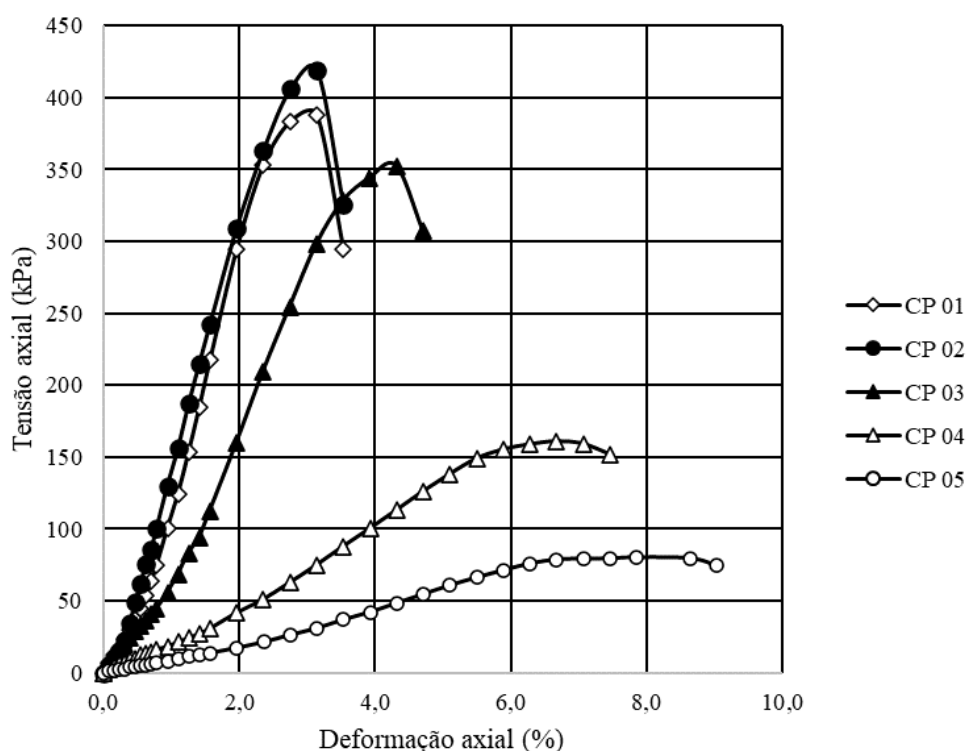
Tabela 34 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cal

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,91	14,65	16,88	19,10	20,98
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	387,82	419,41	352,62	160,95	80,15

Fonte: Autoria própria

Na Figura 100, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 8% de cal. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 100 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de cal



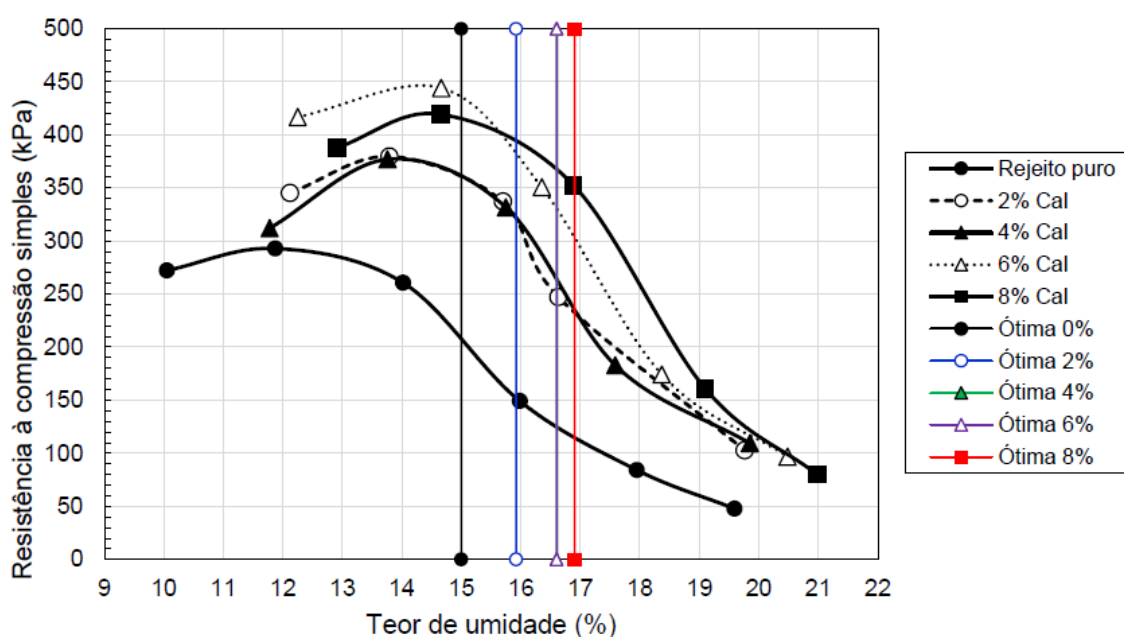
Fonte: Autoria própria

Na Figura 101, são apresentadas todas as curvas de resistência à compressão simples realizadas para as misturas de rejeito com as diversas proporções de cal. É indicado neste

mesmo gráfico a resistência de cada uma das misturas de acordo com a umidade ótima dos materiais ensaiados. Da análise desse gráfico e da Tabela 35 se pode observar que apesar da adição de 2% de cal ter proporcionado aumento da RCS em relação ao rejeito puro, acima desse teor o ganho de resistência foi muito pequeno, observando-se inclusive queda para o teor de 4% de cal, em relação ao teor de 2%. Conforme indicado por Bell *et al.* (1996), Narasimha Rao *et al.* (1996), Rajasekaran *et al.* (2002), Wang *et al.* (2018a), Wang *et al.* (2018b) e Wang *et al.* (2019), a estabilização do solo com cal é uma técnica química que resulta em melhorias nas características de resistência, compactação e compressibilidade. Com base nesse comportamento, foi selecionado o teor igual a 2% para a execução do ensaio de compressão triaxial CIU<sub>SAT</sub>.

A Figura 101 não indica a linha correspondente à umidade ótima do teor de cal igual a 4% (linha e triângulo verdes) porque esta foi sobreposta pela linha do teor de 6%, uma vez que as umidades ótimas desses teores foram iguais (16,60%).

Figura 101 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 35 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima

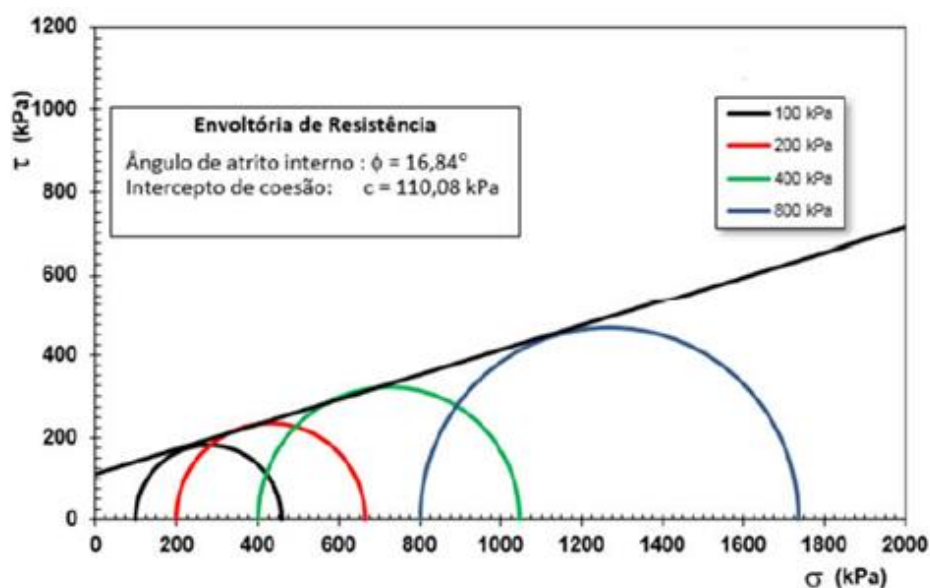
Rejeito (R) e misturas	Puro (R 0%)	R + 2% cal	R + 4% cal	R + 6% cal	R + 8% cal
$w_{ótima}$ (%)	15,00	15,92	16,60	16,60	16,90
RCS ( $kN/m^2$ )	207,65	321,70	264,11	330,52	351,60
Varição da RCS (%)	0	+ 54,92	+ 27,19	+ 59,17	+ 69,32

Fonte: Autoria própria

### 5.5.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

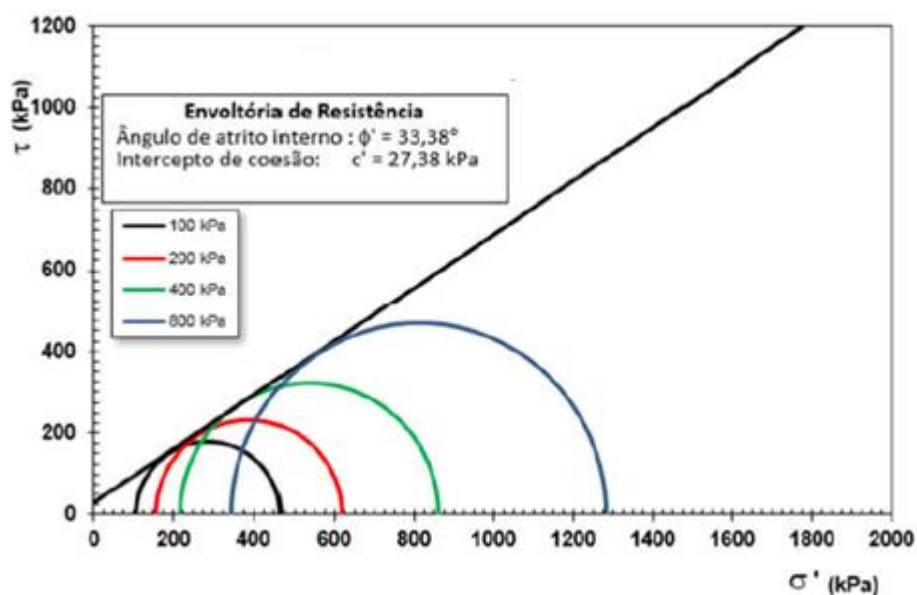
Os corpos de prova de rejeito com 2% de cal para os ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> foram moldados buscando-se atingir a umidade ótima e o grau de compactação igual a 100% do Proctor normal. Na Figura 102 e na Figura 103, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e efetivas.

Figura 102 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

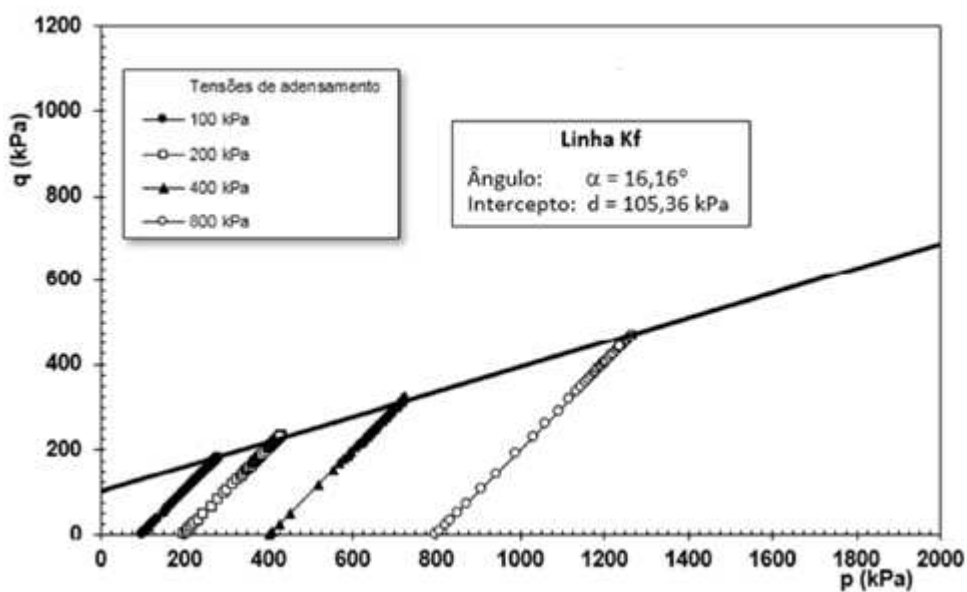
Figura 103 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

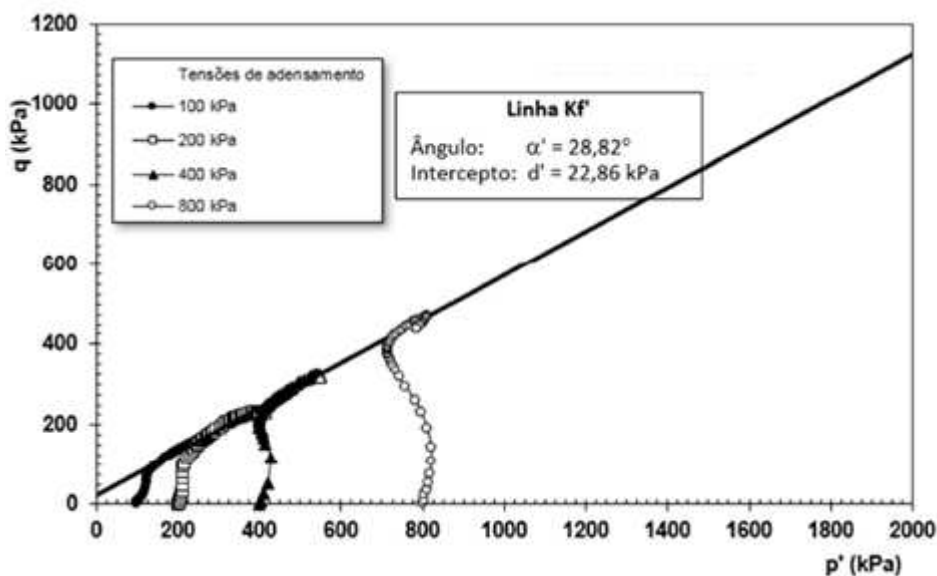
Na Figura 104 e na Figura 105, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas do rejeito com 2% de cal, respectivamente.

Figura 104 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

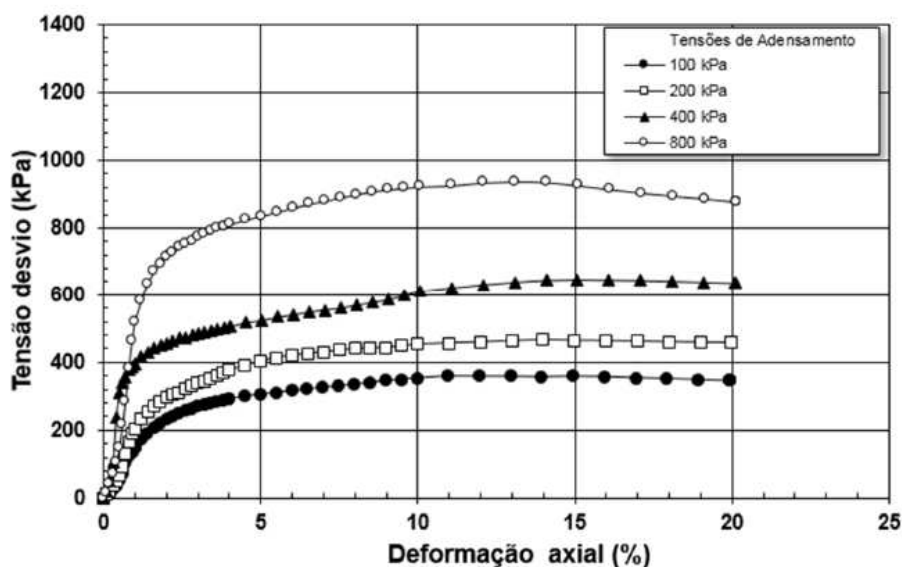
Figura 105 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

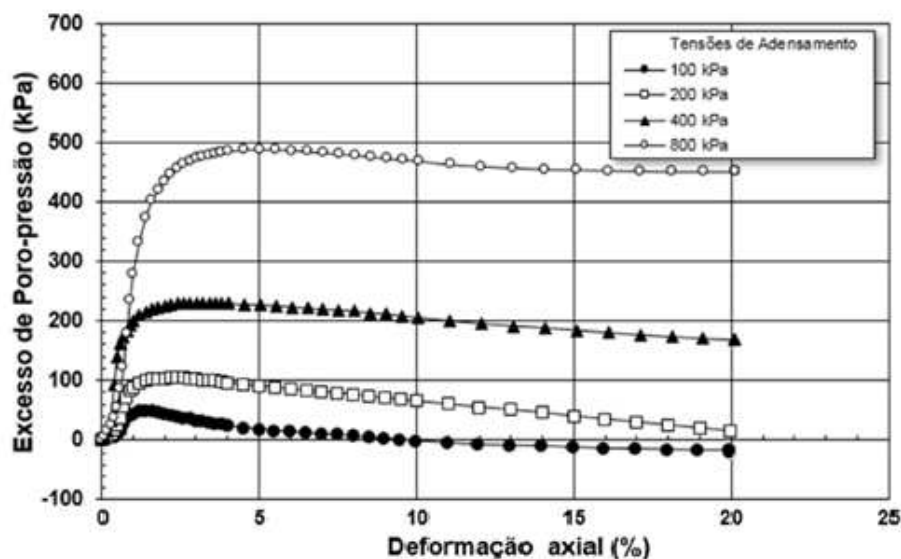
Na Figura 106, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e, na Figura 107, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

Figura 106 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

Figura 107 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 2% de cal)



Fonte: Autoria própria

Como observado na Figura 105, o aumento da tensão de adensamento gera uma tendência do rejeito com 2% de cal em passar do comportamento dilatante para o comportamento contrátil. Situação observada principalmente nas trajetórias de tensões de 800 kPa de tensão de adensamento, apresentando comportamento contrátil em tensões inferiores aos do rejeito puro, com bentonita e com cimento. Isto indica que em pilhas de elevadas alturas, o rejeito pode apresentar condições de resistência não drenada, o que reduz a capacidade resistente da estrutura, reduzindo o FS da mesma.

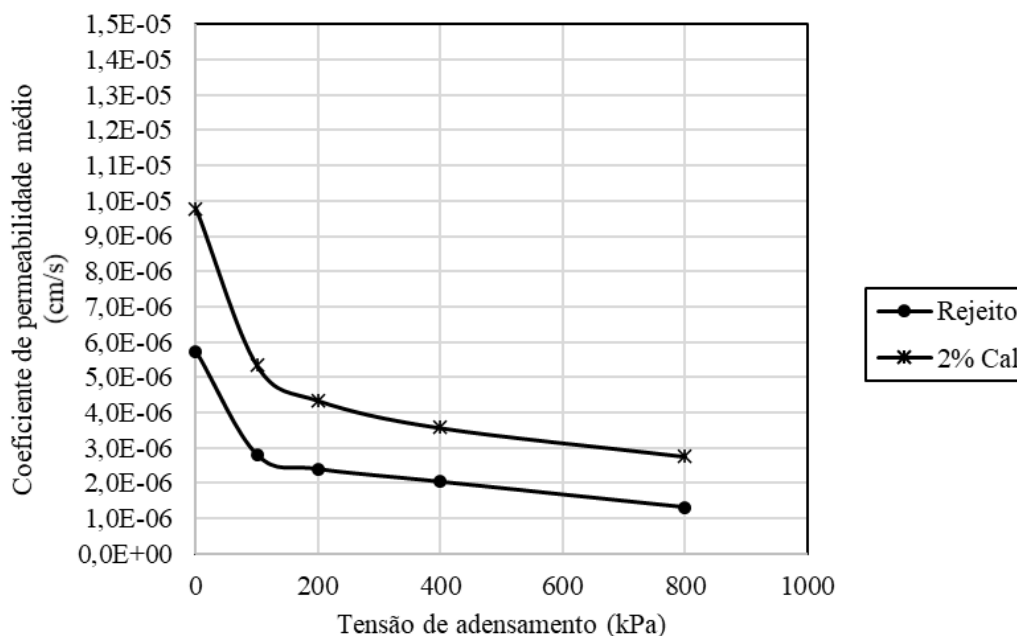
Por fim, na Figura 107, pode ser observado que, para tensões de 100 kPa, o rejeito com 2% de cal apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento deste CP. No CP de 200 kPa pode ser observado que a tendência também se mantém, mas a geração de poropressão negativa não é identificada pela limitação de deformação do CP no ensaio. Já para as tensões de 400 kPa e 800 kPa a poropressão é positiva, mas apresenta a tendência de redução com o andamento do ensaio.

#### 5.5.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na Figura 108, são apresentadas as variações do coeficiente permeabilidade do rejeito puro e de sua mistura com 2% de cal em função da tensão de adensamento dos corpos de

prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 36, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.

Figura 108 – Variação da permeabilidade do rejeito com 2% de cal



Fonte: Autoria própria

Tabela 36 – Permeabilidade do rejeito + 2% de cal de acordo com os níveis de tensões de adensamento

CP	1	2	3	4	5
Tensão (kPa)	0	100	200	400	800
$k$ (cm/s)	9,78 x 10 <sup>-6</sup>	5,33 x 10 <sup>-6</sup>	4,34 x 10 <sup>-6</sup>	3,57 x 10 <sup>-6</sup>	2,76 x 10 <sup>-6</sup>

Fonte: Autoria própria

Para a mistura do rejeito com 2% de cal foi observado aumento da permeabilidade ( $k$ ) em relação ao rejeito puro, o que provavelmente foi devido à floculação de partículas. Como materiais com estruturas floculadas são mais permeáveis, justifica-se então o comportamento observado. Verifica-se também que com o aumento da tensão de adensamento, ocorre a redução da permeabilidade ( $k$ ) da mistura. Esse comportamento pode ser explicado com base na redução do índice de vazios dos corpos de prova, decorrente do processo de adensamento.



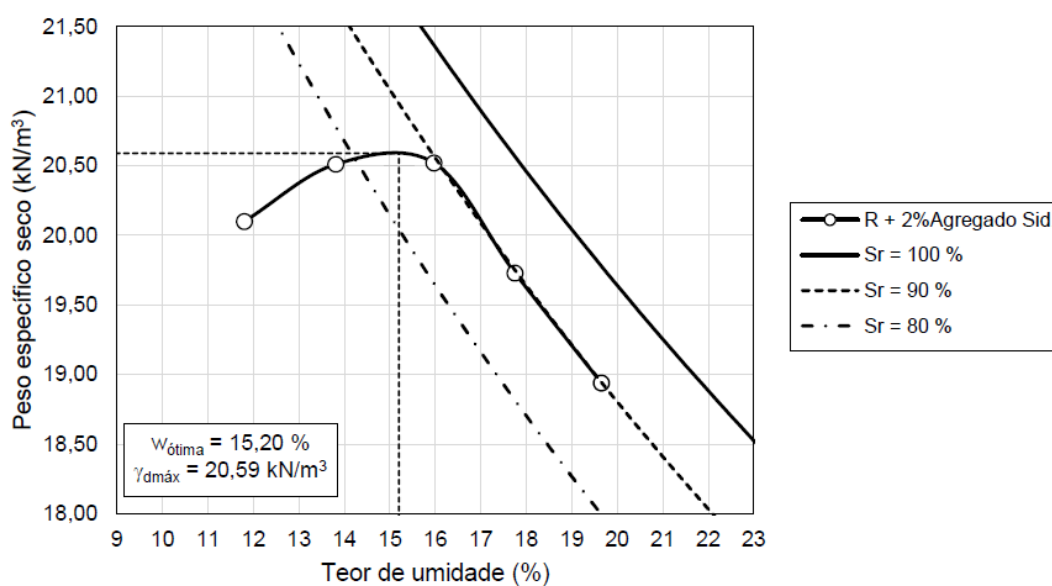
## 5.6. MISTURAS DE REJEITO E AGREGADO SIDERÚRGICO

### 5.6.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

#### 5.6.1.1. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 2% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 109, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 2% de agregado siderúrgico e, na Tabela 37, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,20% e o peso específico seco máximo foi de 20,59 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,72 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 109 – Curva de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

Tabela 37 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico

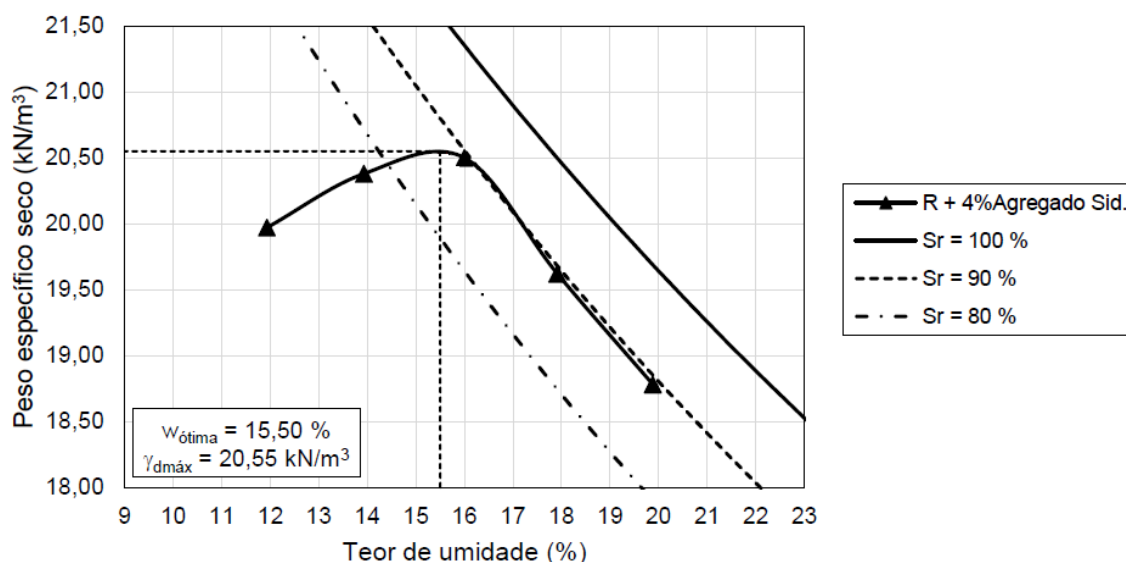
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,80	13,81	15,97	17,75	19,65
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,10	20,51	20,52	19,73	20,41

Fonte: Autoria própria

### 5.6.1.2. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 4% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 110, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 4% de agregado siderúrgico e, na Tabela 38, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,50% e o peso específico seco máximo foi de 20,55 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,74 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 110 – Curva de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

Tabela 38 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,93	13,93	16,00	17,91	19,88
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,97	20,38	20,50	19,62	18,78

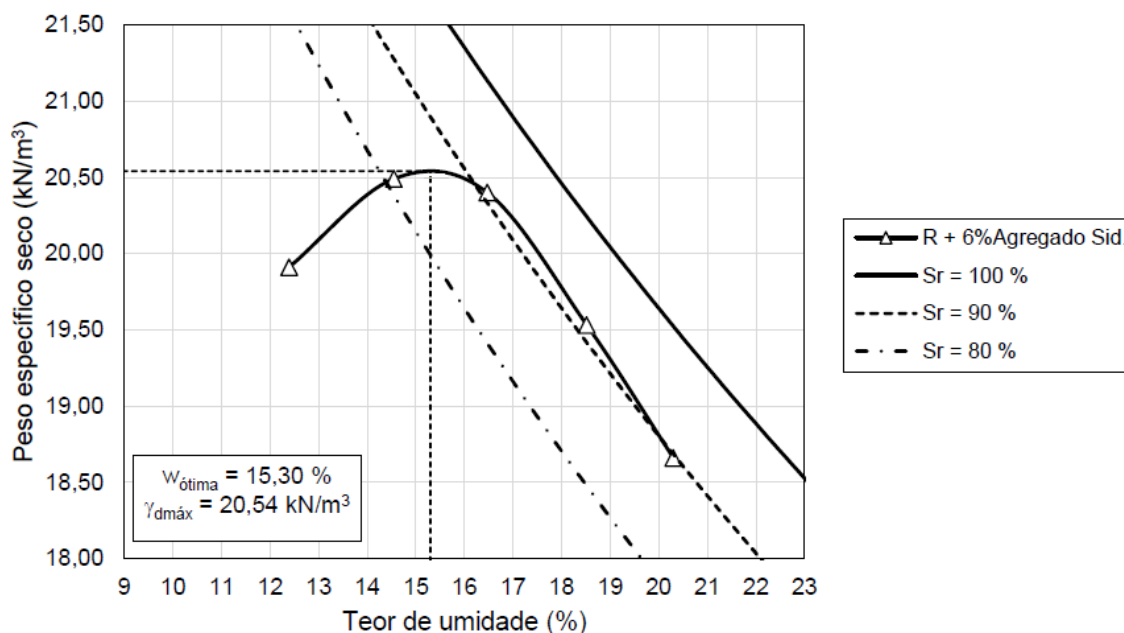
Fonte: Autoria própria

### 5.6.1.3. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 111, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 6% de agregado siderúrgico e, na Tabela 39, são indicados os pontos desta curva de compactação.

Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,30% e o peso específico seco máximo foi de 20,54 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,68 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 111 – Curva de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

Tabela 39 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,39	14,55	16,47	18,52	20,30
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,91	20,49	20,40	19,53	18,66

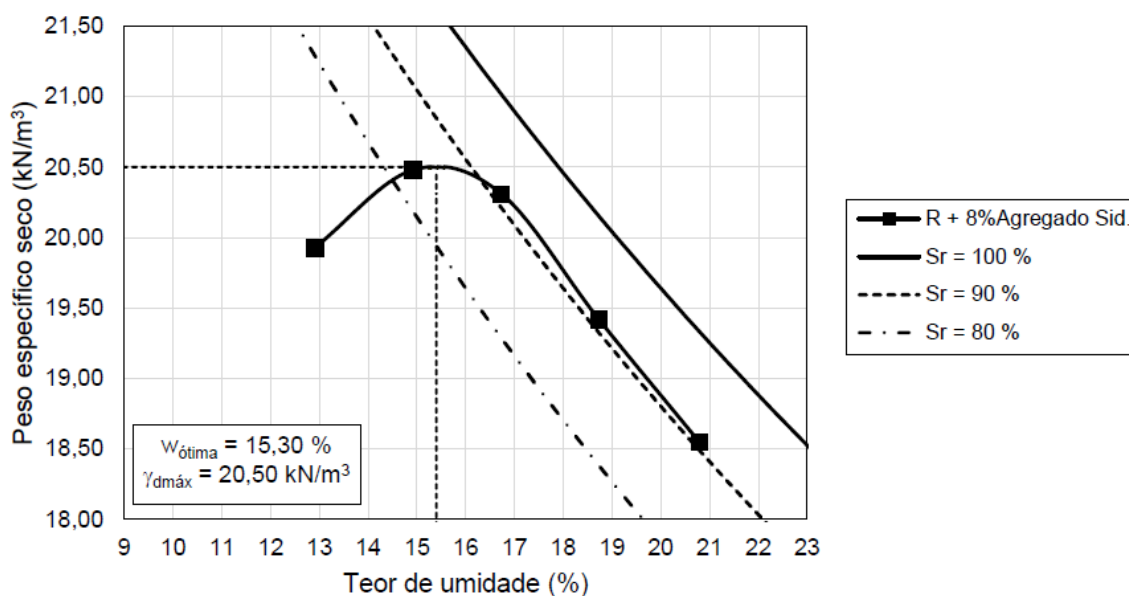
Fonte: Autoria própria

#### 5.6.1.4. COMPACTAÇÃO DO REJEITO + 8% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 112, é apresentada a curva de compactação do rejeito aditivado com 8% de agregado siderúrgico e, na Tabela 40, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,30% e o peso específico seco máximo foi de 20,50 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma

compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,64 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 112 – Curva de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

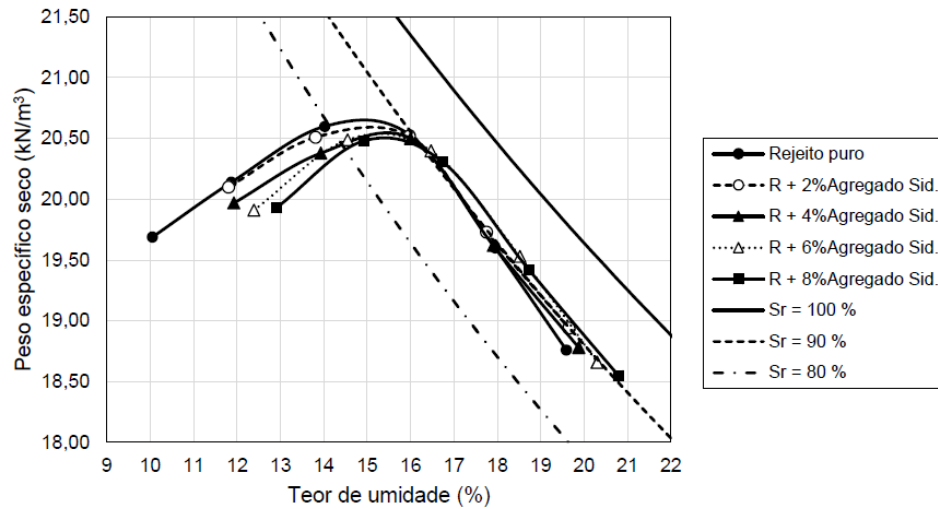
Tabela 40 – Pontos da curva de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,91	14,92	16,73	18,73	20,79
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,93	20,48	20,31	19,42	18,55

Fonte: Autoria própria

Na Figura 113, são apresentadas as curvas de compactação do rejeito puro e das misturas com agregado siderúrgico, na qual pode ser identificada a tendência de todas as misturas estudadas terem curvas de compactação muito próximas e com tendência de proximidade do ramo úmido ao longo da curva de saturação de 90%.

Figura 113 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com agregado siderúrgico



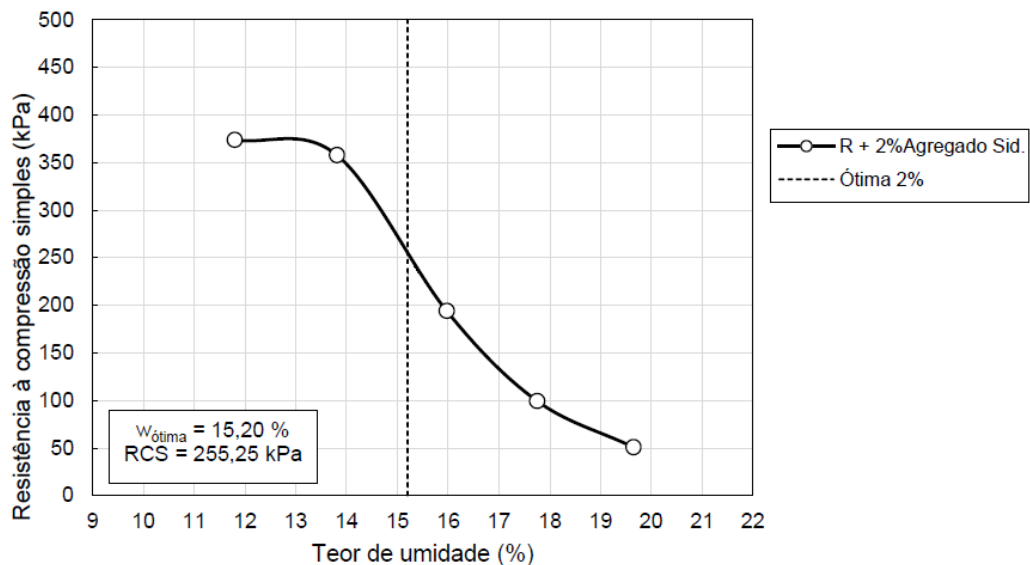
Fonte: Autoria própria

## 5.6.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

### 5.6.2.1. RCS DE REJEITO + 2% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 114 e na Tabela 41, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 114 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

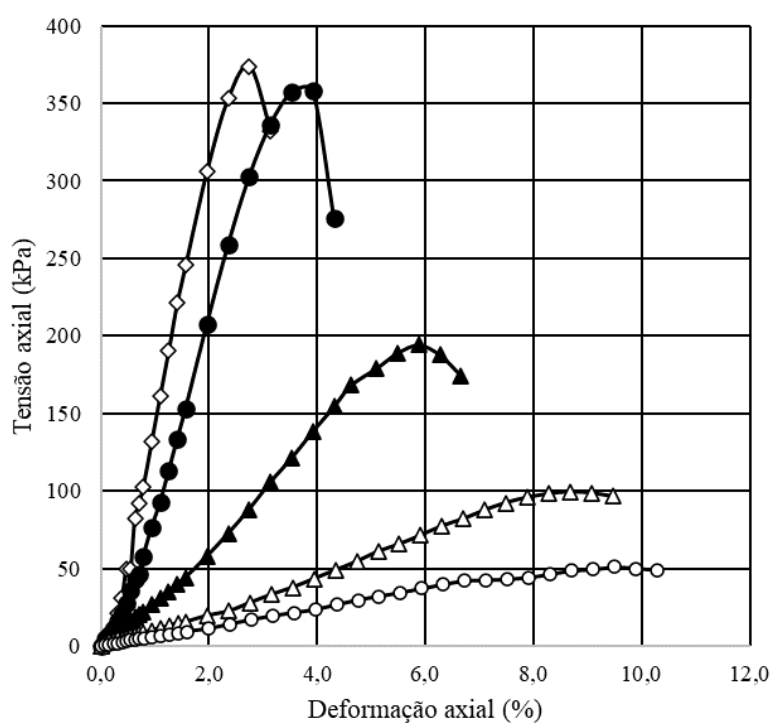
Tabela 41 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,80	13,81	15,97	17,75	19,65
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	373,83	357,75	194,10	99,33	50,90

Fonte: Autoria própria

Na Figura 133, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 2% de agregado siderúrgico. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 115 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 2% de agregado siderúrgico

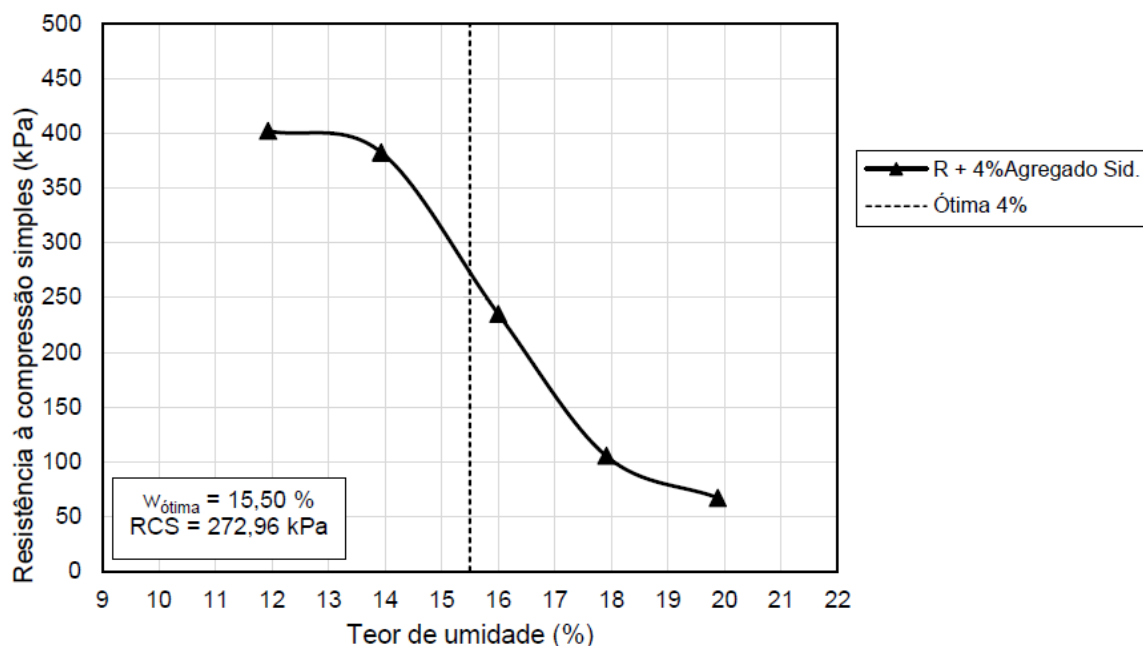


Fonte: Autoria própria

### 5.6.2.2.RCS DE REJEITO + 4% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 116 e na Tabela 42, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 116 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

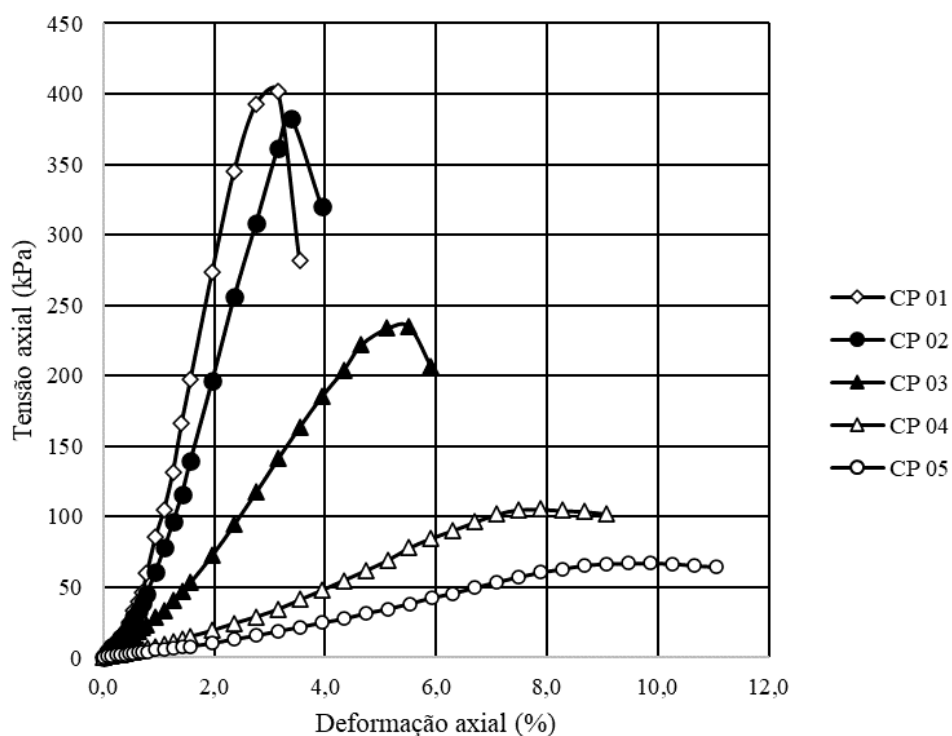
Tabela 42 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
w (%)	11,93	13,93	16,00	17,91	19,88
RCS (kN/m <sup>2</sup> )	402,10	382,63	234,94	105,37	66,94

Fonte: Autoria própria

Na Figura 117, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 4% de agregado siderúrgico. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 117 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 4% de agregado siderúrgico



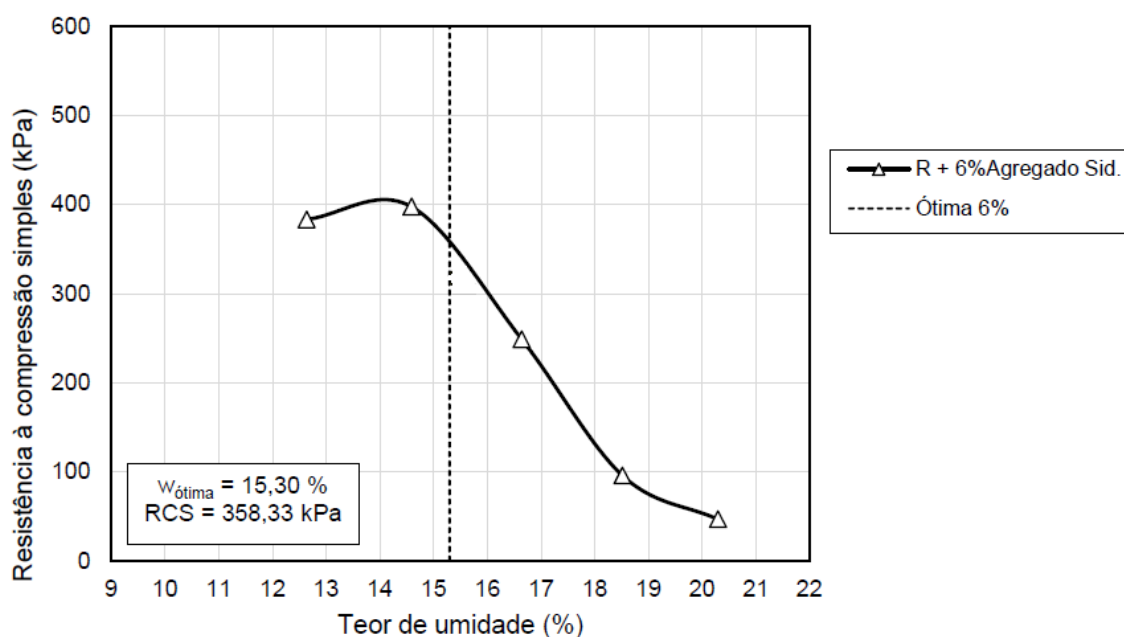
Fonte: Autoria própria

### 5.6.2.3.RCS DE REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 118 e na Tabela 43, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.



Figura 118 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

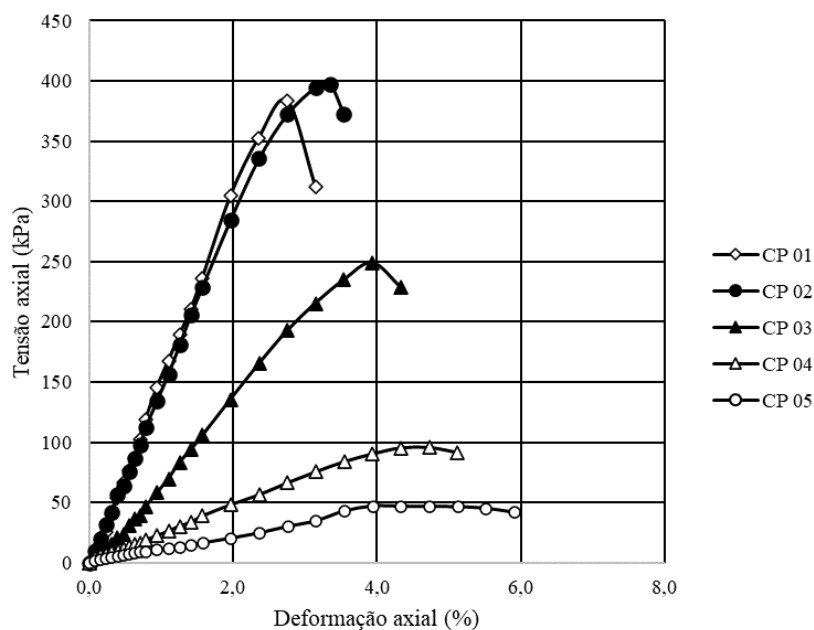
Tabela 43 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	12,39	14,55	16,47	18,52	20,30
<b>RCS (kN/m<sup>2</sup>)</b>	383,30	397,66	248,96	95,76	46,83

Fonte: Autoria própria

Na Figura 119, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 6% de agregado siderúrgico. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 119 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 6% de agregado siderúrgico

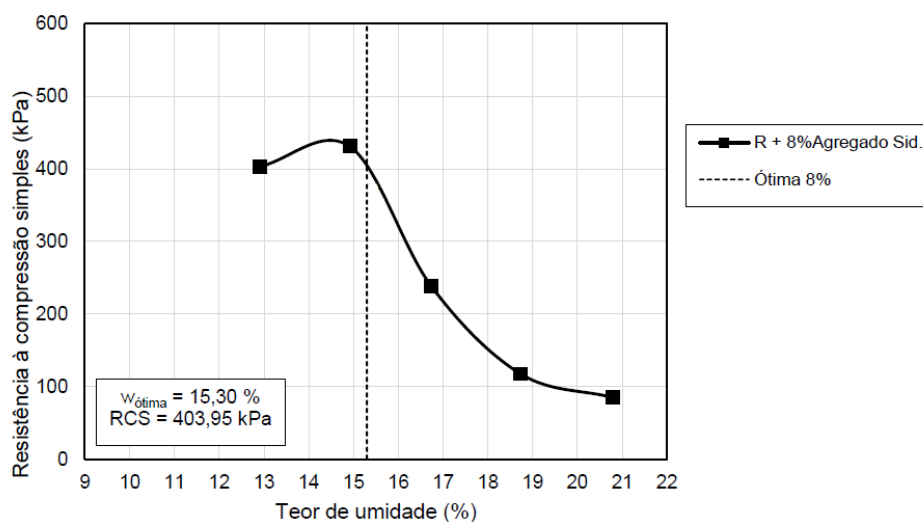


Fonte: Autoria própria

#### 5.6.2.4.RCS DE REJEITO + 8% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Na Figura 120 e na Tabela 44, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 120 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

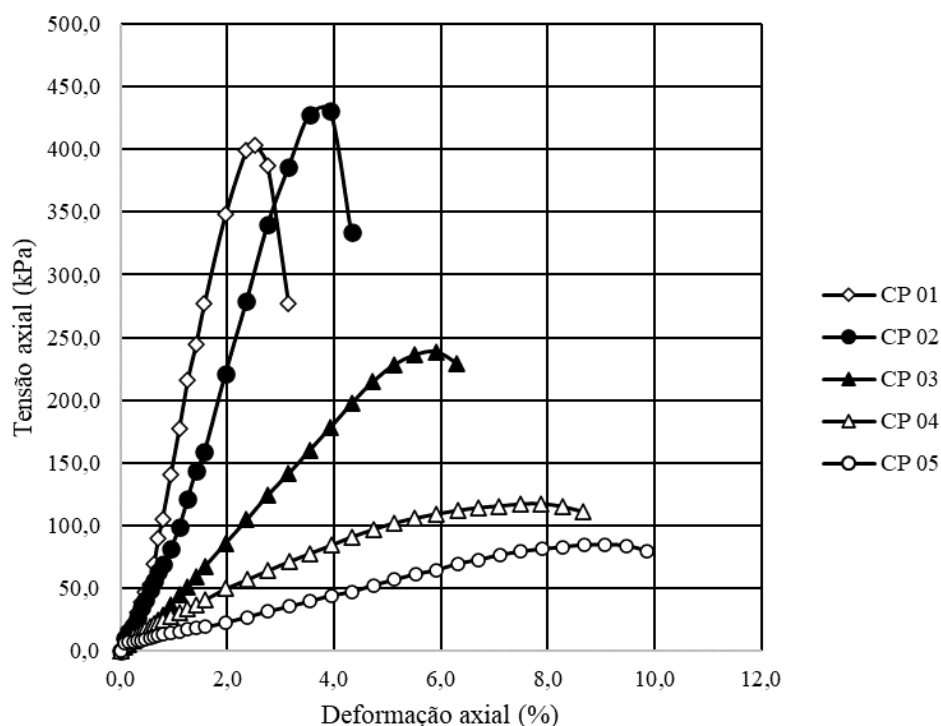
Tabela 44 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,91	14,92	16,73	18,73	20,79
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	403,09	430,74	238,66	117,46	84,91

Fonte: Autoria própria

Na Figura 121, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação do rejeito + 8% de agregado siderúrgico. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 121 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de rejeito + 8% de agregado siderúrgico

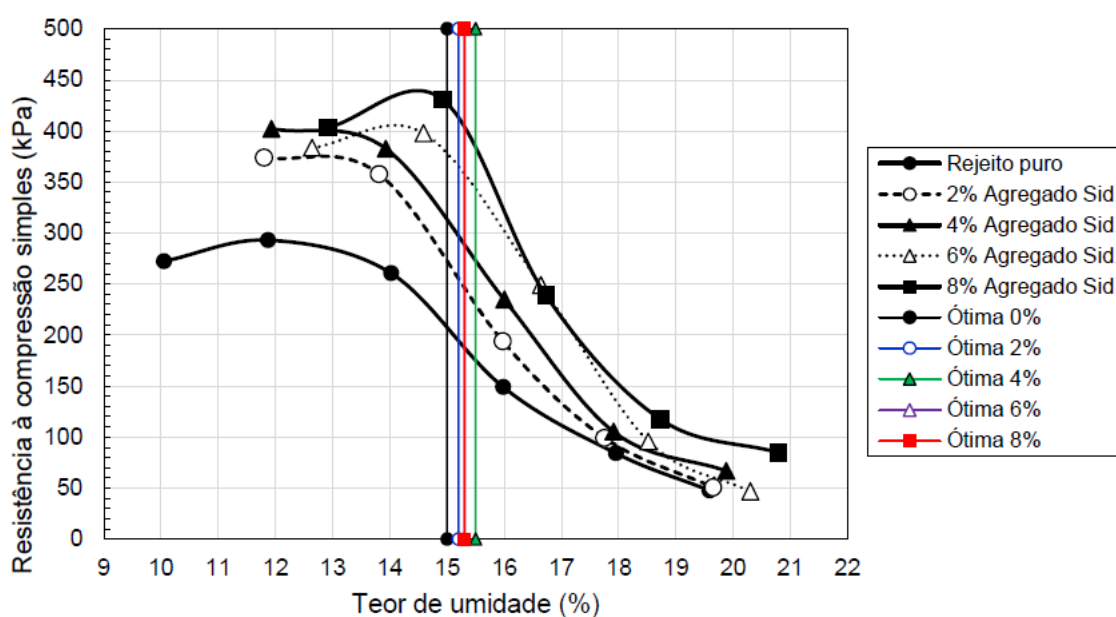


Fonte: Autoria própria

Na Figura 122 e na Tabela 45, são apresentadas todas as curvas de resistência à compressão simples realizadas para as misturas de rejeito com as diversas proporções de

agregado siderúrgico. É indicada, neste mesmo gráfico, a resistência de cada uma das misturas de acordo com a umidade ótima destes materiais ensaiados. Comparando as resistências dos pontos correspondentes à umidade ótima das misturas, com a do rejeito puro, percebe-se que houve um pequeno aumento da RCS para os teores de 2% e 4% de agregado siderúrgico, sendo observados maiores incrementos para os teores de 6% e 8%. Este comportamento mostra-se semelhante à pesquisa desenvolvida por Abdila *et al.* (2022), em que as misturas de solos de argilosos de baixa competência com agregado siderúrgico também apresentaram a mesma tendência de melhoramento. Com base nesse comportamento, foi selecionado o teor igual a 6% para a execução do ensaio de compressão triaxial CIUSAT devido ao maior incremento de resistência e pela proximidade de umidade ótima entre os percentuais de cada uma das misturas.

Figura 122 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

Tabela 45 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima

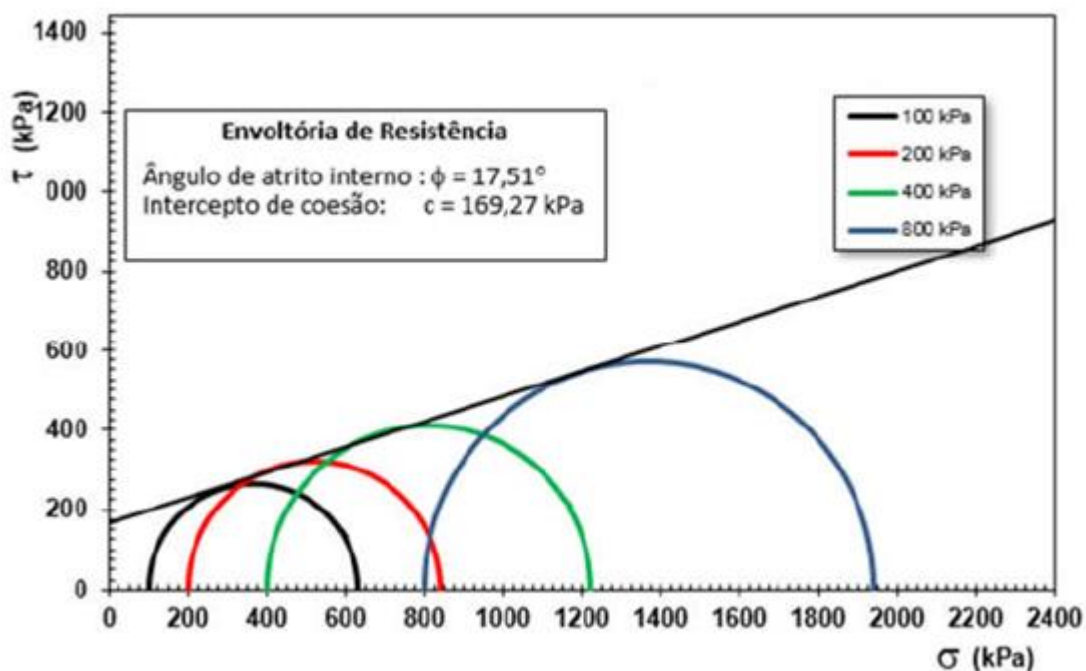
Rejeito (R) e misturas	Puro (R 0%)	R + 2% a. sider.	R + 4% a. sider.	R + 6% a. sider.	R + 8% a. sider.
$w_{ótima}$ (%)	15,00	15,20	15,50	15,30	15,30
RCS ( $kN/m^2$ )	207,65	255,25	272,96	358,33	403,95
Varição da RCS (%)	0	+ 22,92	+ 31,45	+ 72,56	+ 94,53

Fonte: Autoria própria

### 5.6.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

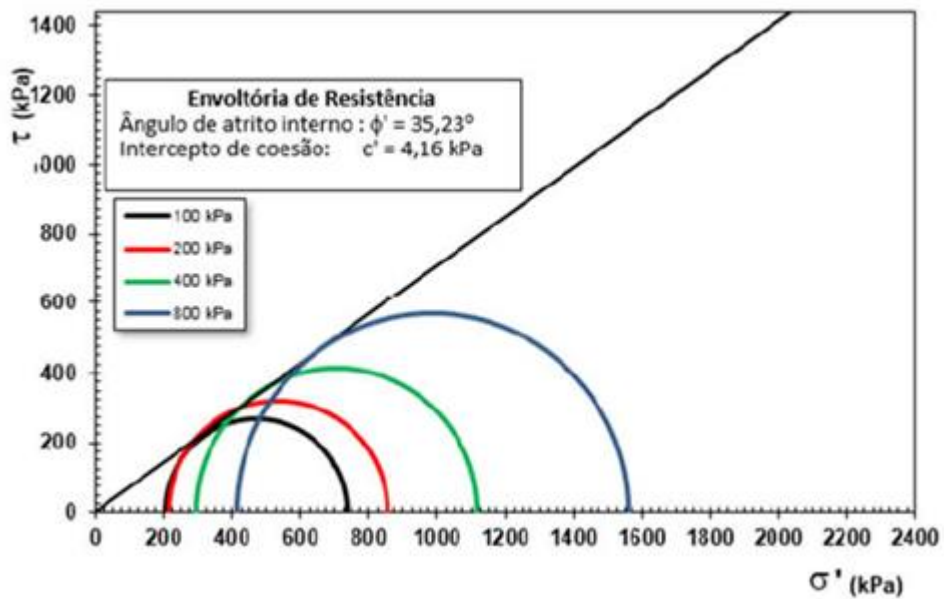
Os corpos de prova de rejeito com 6% de agregado siderúrgico para os ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> foram moldados buscando atingir a umidade ótima e o grau de compactação igual a 100% do Proctor normal. Na Figura 123 e na Figura 124, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas.

Figura 123 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

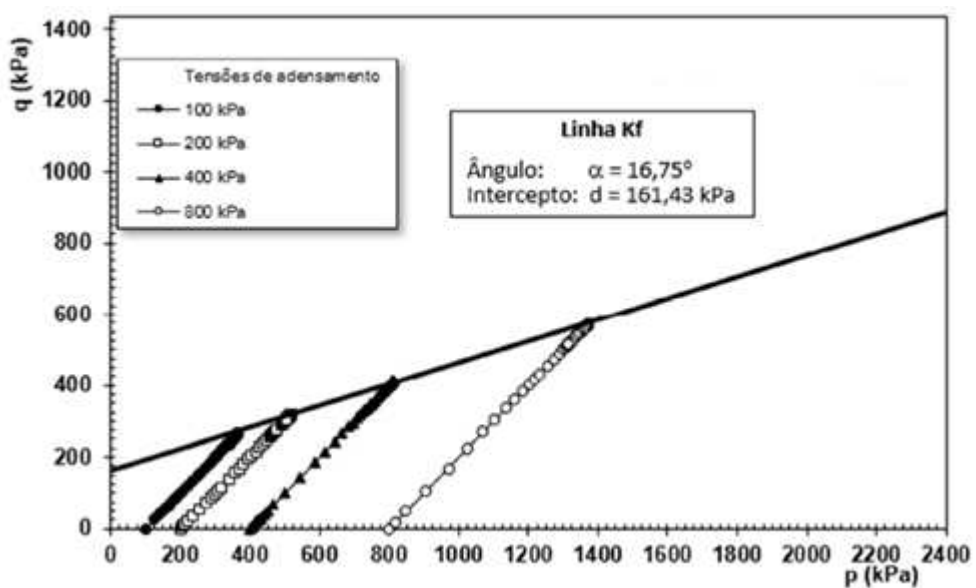
Figura 124 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

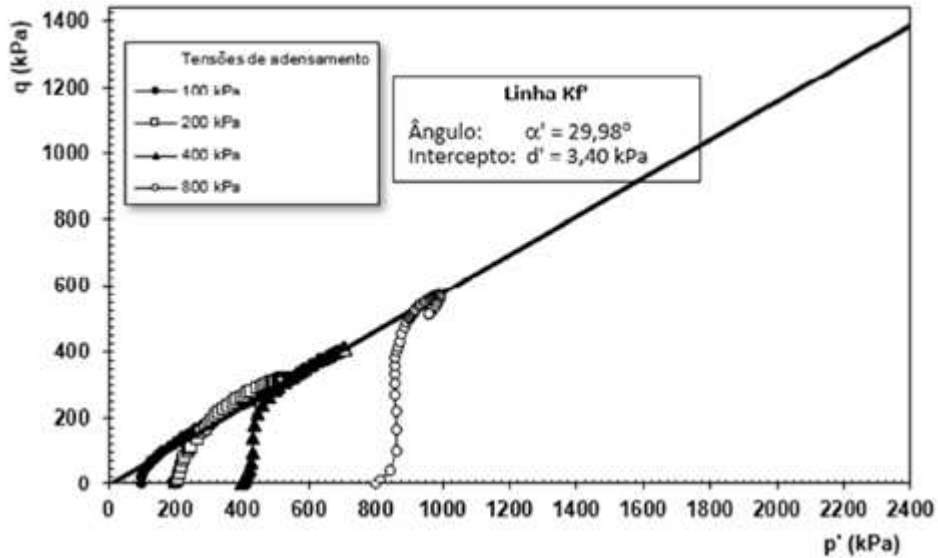
Na Figura 125 e na Figura 126, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas do rejeito com 6% de agregado siderúrgico, respectivamente.

Figura 125 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

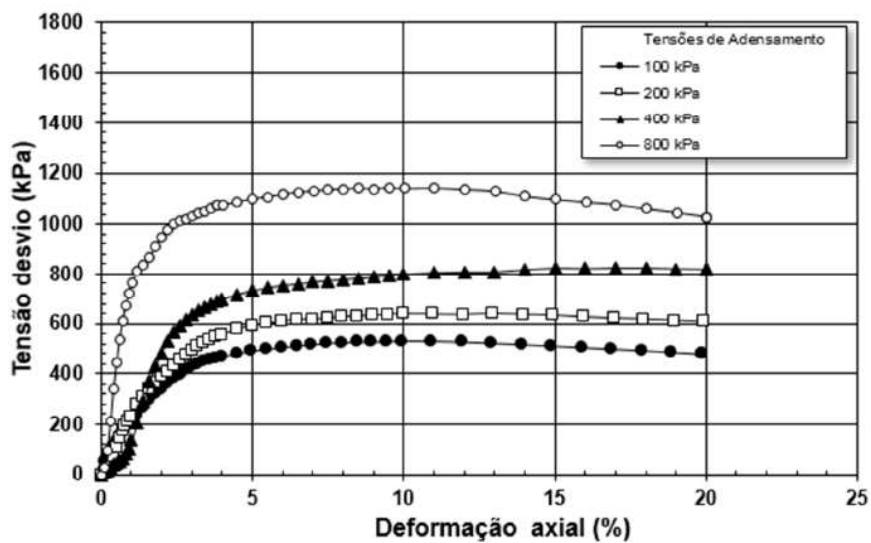
Figura 126 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

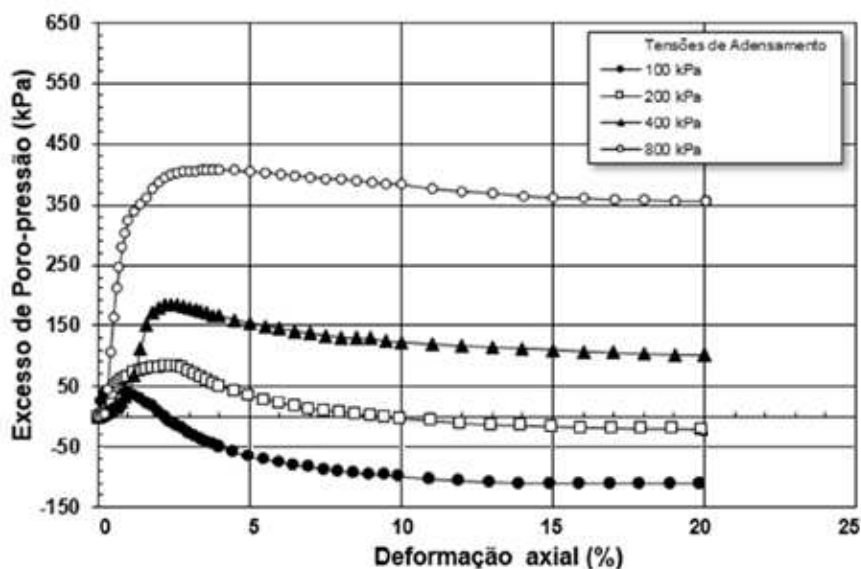
Na Figura 127, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e, na Figura 128, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

Figura 127 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

Figura 128 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de rejeito com 6% de agregado siderúrgico)



Fonte: Autoria própria

Como observado na Figura 126, o rejeito com 6% de agregado siderúrgico não apresentou tendência de alteração do comportamento dilatante para contrátil para as tensões de adensamento ensaiadas.

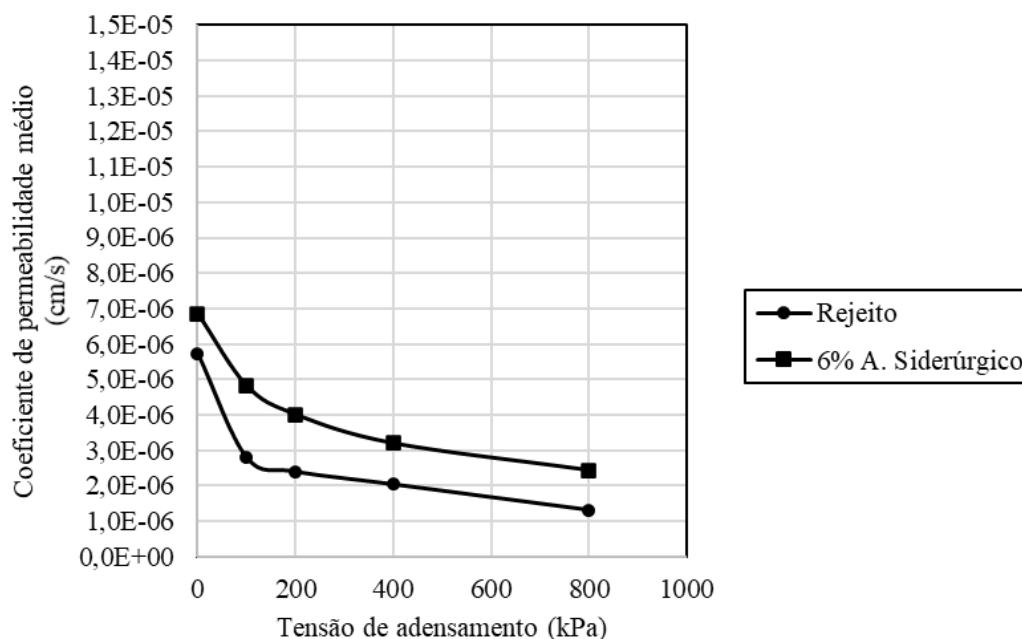
Por fim, na Figura 128, pode ser observado que, para tensões de 100 kPa e 200 kPa, o rejeito com 6% de agregado siderúrgico apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento destes CPs. Já para as tensões de 400 kPa e 800 kPa a poropressão é positiva, mas apresenta a tendência de redução com o andamento do ensaio.

#### 5.6.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na Figura 129, são apresentadas as variações do coeficiente permeabilidade do rejeito puro e de sua mistura com 6% de agregado siderúrgico em função da tensão de adensamento dos corpos de prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 46, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.



Figura 129 – Variação da permeabilidade do rejeito com 6% de agregado siderúrgico



Fonte: Autoria própria

Tabela 46 – Permeabilidade do rejeito + 6% de agregado siderúrgico de acordo com os níveis de tensões de adensamento

CP	1	2	3	4	5
<b>Tensão (kPa)</b>	0	100	200	400	800
<b><i>k</i> (cm/s)</b>	6,85 x 10 <sup>-6</sup>	4,82 x 10 <sup>-6</sup>	4,01 x 10 <sup>-6</sup>	3,20 x 10 <sup>-6</sup>	2,44 x 10 <sup>-6</sup>

Fonte: Autoria própria

Para a mistura do rejeito com 6% de agregado siderúrgico foi observado aumento da permeabilidade ( $k$ ) em relação ao rejeito puro, o que pode ser explicado com base na granulometria do agregado siderúrgico que, por ser mais granular que o rejeito puro, é constituída por 80% de fração areia, resultou em um material com maior condutividade hidráulica ao ser adicionado ao rejeito. Verifica-se também que com o aumento da tensão de adensamento, ocorre a redução da permeabilidade ( $k$ ) da mistura. Esse comportamento pode ser explicado com base na redução do índice de vazios dos corpos de prova, decorrente do processo de adensamento.

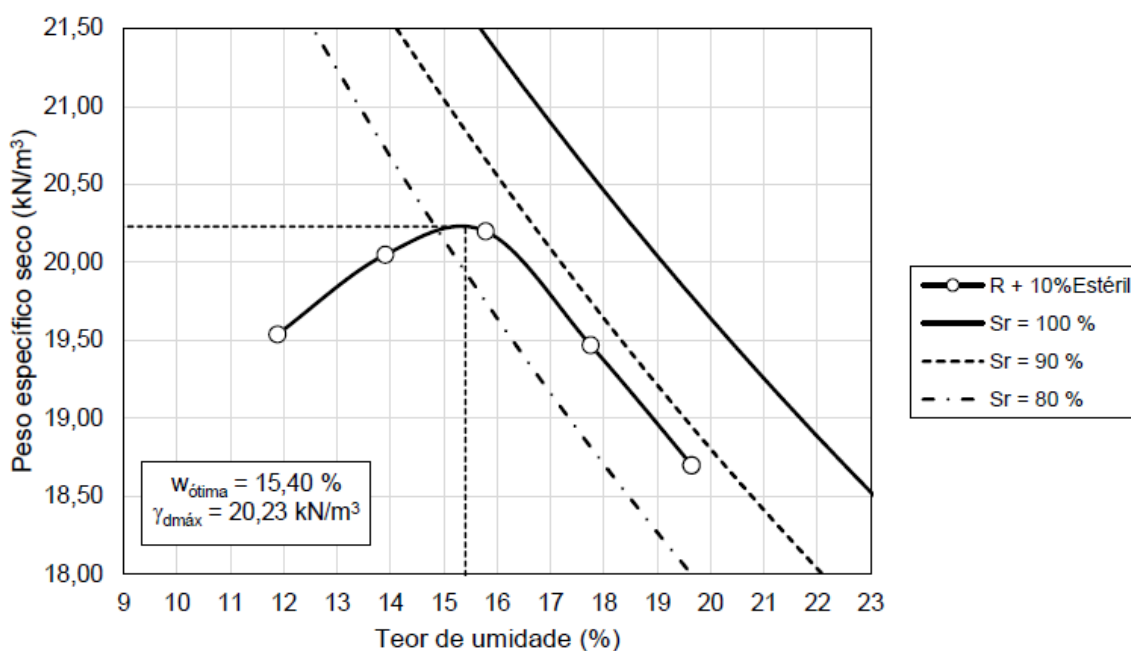
## 5.7. MISTURAS DE REJEITO E ESTÉRIL

### 5.7.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

#### 5.7.1.1. COMPACTAÇÃO DE 90% DE REJEITO COM 10% DE ESTÉRIL

Na Figura 130, é apresentada a curva de compactação de 90% de rejeito aditivado com 10% de estéril e, na Tabela 47, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,40% e o peso específico seco máximo foi de 20,23 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 23,35 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 130 – Curva de compactação de 90% de rejeito com 10% de estéril



Fonte: Autoria própria

Tabela 47 – Pontos da curva de compactação de 90% de rejeito com 10% de estéril

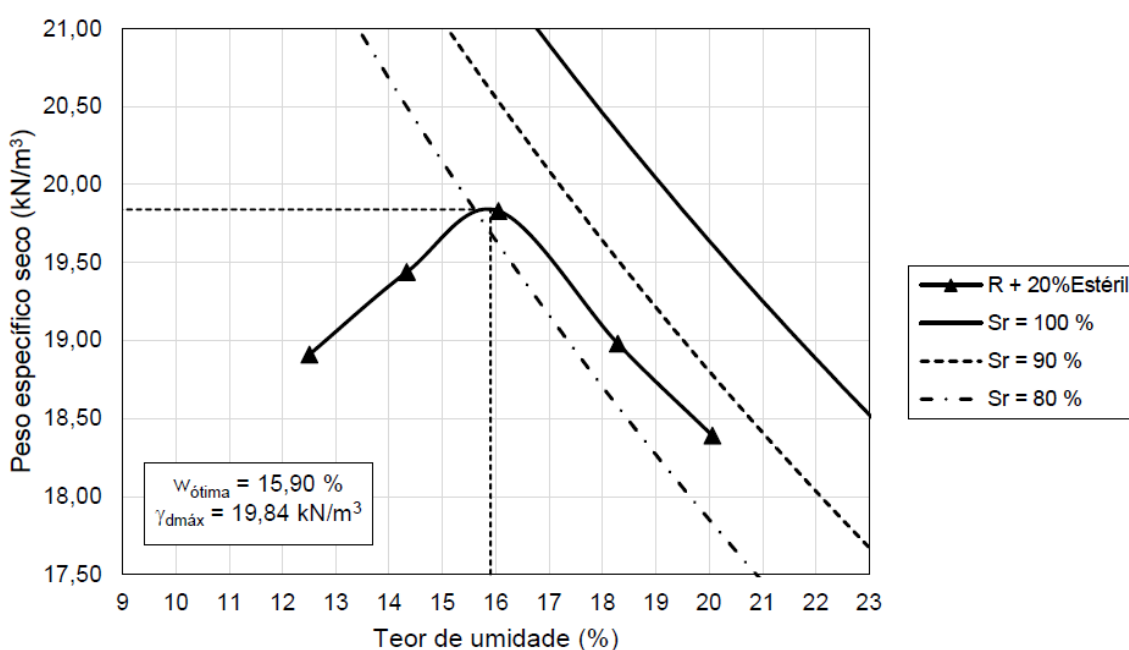
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	11,88	13,90	15,78	17,75	19,64
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,54	20,05	20,20	19,47	18,70

Fonte: Autoria própria

### 5.7.1.2. COMPACTAÇÃO DE 80% DE REJEITO COM 20% DE ESTÉRIL

Na Figura 131, é apresentada a curva de compactação de 80% de rejeito aditivado com 20% de estéril e, na Tabela 48, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 15,90% e o peso específico seco máximo foi de 19,84 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,99 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 131 – Curva de compactação de 80% de rejeito com 20% de estéril



Fonte: Autoria própria

Tabela 48 – Pontos da curva de compactação de 80% de rejeito com 20% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,50	14,33	16,05	18,29	20,06
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,91	19,44	19,83	18,98	18,39

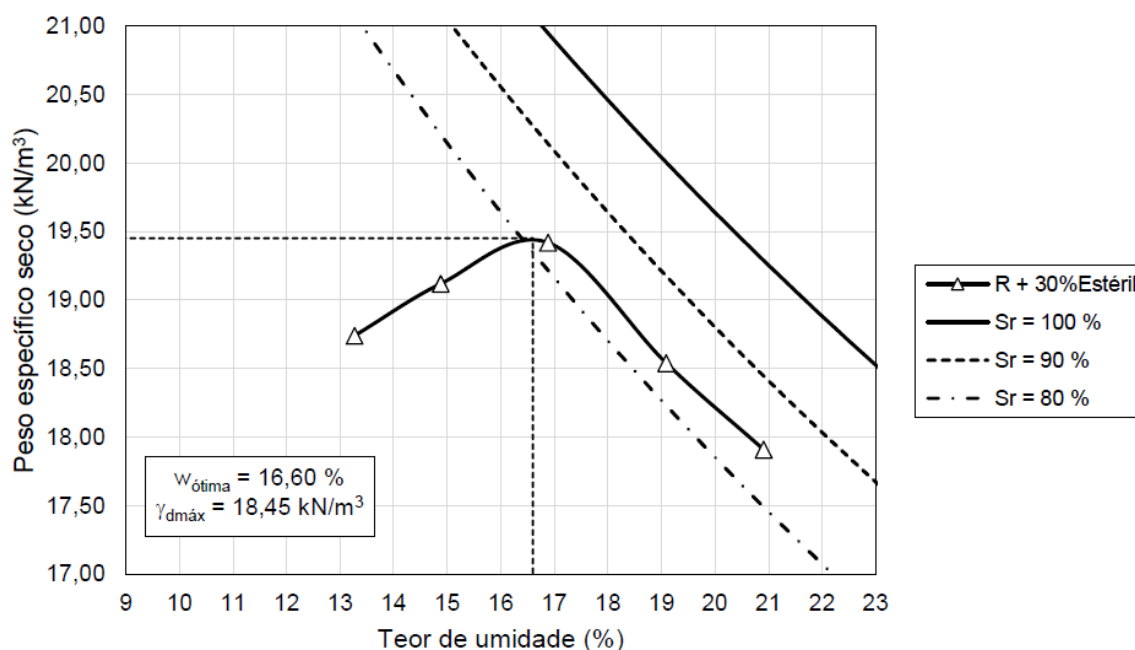
Fonte: Autoria própria

### 5.7.1.3. COMPACTAÇÃO DE 70% DE REJEITO COM 30% DE ESTÉRIL

Na Figura 132, é apresentada a curva de compactação de 70% de rejeito aditivado com 30% de estéril e, na Tabela 49, são indicados os pontos desta curva de compactação.

Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 16,60% e o peso específico seco máximo foi de 18,45 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 21,51 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 132 – Curva de compactação de 70% de rejeito com 30% de estéril



Fonte: Autoria própria

Tabela 49 – Pontos da curva de compactação de 70% de rejeito com 30% de estéril

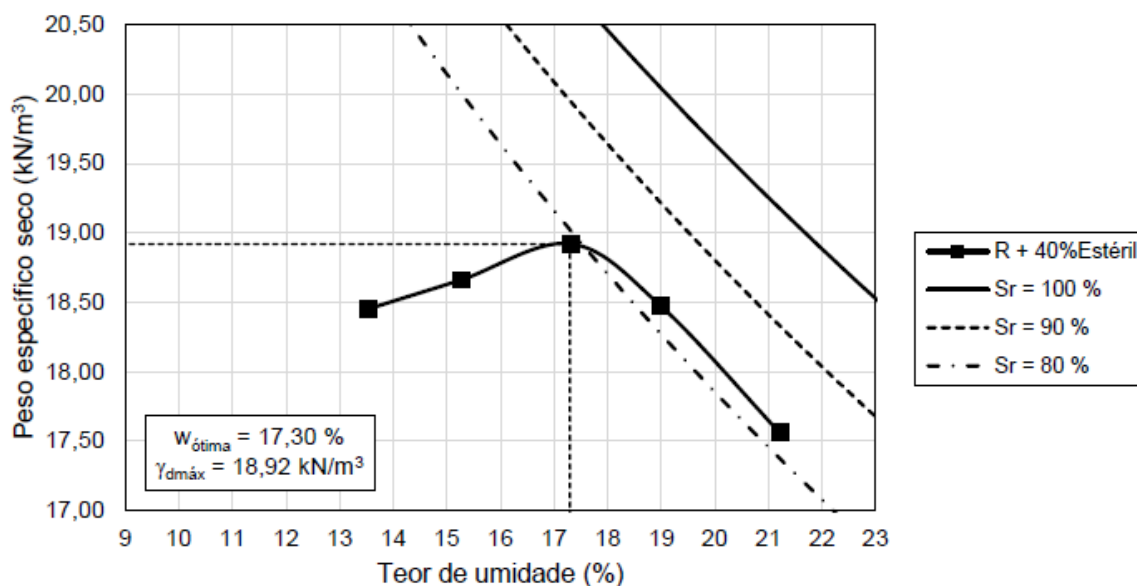
Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	13,27	14,88	16,88	19,09	20,91
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,74	19,12	19,42	18,54	17,91

Fonte: Autoria própria

#### 5.7.1.4. COMPACTAÇÃO DE 60% DE REJEITO COM 40% DE ESTÉRIL

Na Figura 133, é apresentada a curva de compactação de 60% de rejeito aditivado com 40% de estéril e, na Tabela 50, são indicados os pontos desta curva de compactação. Conforme pode ser observado, o valor de umidade ótima alcançado pelo material foi de 17,30% e o peso específico seco máximo foi de 18,92 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, considerando uma compactação de 100% do Proctor normal, tal material atingiria um peso específico úmido de 22,19 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 133 – Curva de compactação de 60% de rejeito com 40% de estéril



Fonte: Autoria própria

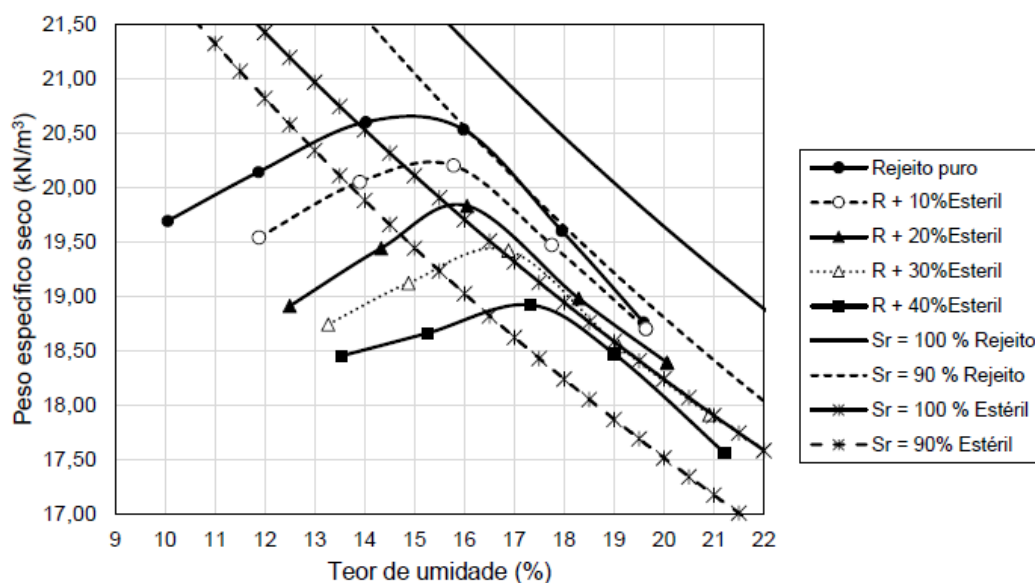
Tabela 50 – Pontos da curva de compactação de 60% de rejeito com 40% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	13,53	15,26	17,31	19,00	21,21
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,45	18,66	18,92	18,47	17,56

Fonte: Autoria própria

Na Figura 134, são apresentadas as curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com o estéril. Conforme pode ser observado, com o aumento da quantidade de material estéril na mistura, houve tendência de aumento da umidade ótima e redução do peso específico seco máximo.

Figura 134 – Curvas de compactação do rejeito puro e de suas misturas com estéril



Fonte: Autoria própria

Conforme observado, o comportamento nas curvas de compactação das misturas do rejeito com o estéril, mostrou uma tendência de afastamento dos ramos úmidos dessas curvas, em relação à linha de saturação do rejeito correspondente a 90%. Esse comportamento pode ser explicado com base nos valores dos pesos específicos das partículas sólidas do rejeito ( $\gamma_s = 32,76 \text{ kN/m}^3$ ) e do material estéril ( $\gamma_s = 29,04 \text{ kN/m}^3$ ).

Assim, considerando que o traçado das linhas de saturação é feito com base na Equação 16, que relaciona o peso específico seco ( $\gamma_d$ ), com o grau de saturação ( $S_r$ ), o teor de umidade ( $w$ ) e o valor do peso específico das partículas sólidas do material ( $\gamma_s$ ), em que  $\gamma_w$ , é o peso específico da água, pode-se observar que, com o aumento de estéril na mistura, tem-se como consequência uma redução do peso específico do material compactado, fazendo com que suas linhas de saturação do estéril também se desloquem em relação à do rejeito puro. Este comportamento também é ilustrado na Figura 134, na qual são apresentadas as curvas de compactação e as posições relativas das linhas de saturação do rejeito e do estéril puros.

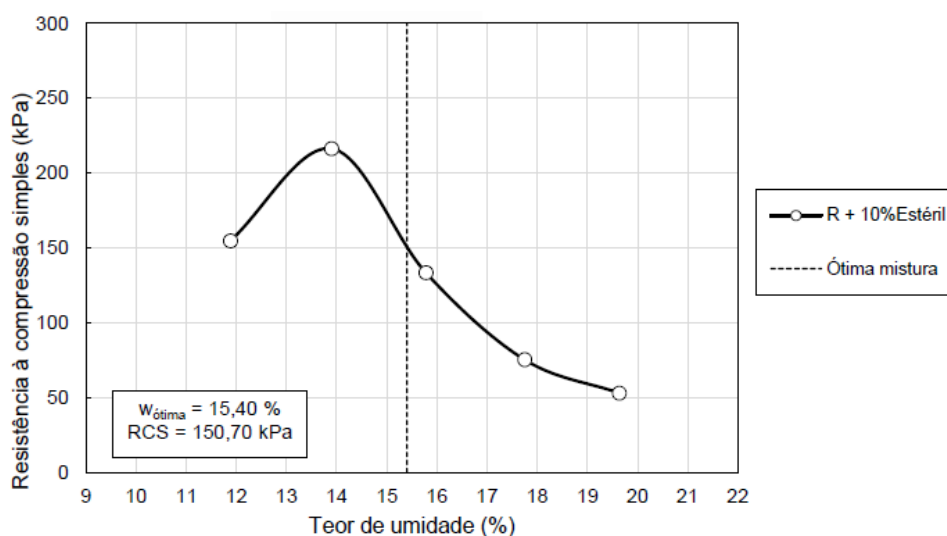
$$\gamma_d = \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot \gamma_s}{S_r \cdot \gamma_w + w \cdot \gamma_s} \quad (\text{Equação 16})$$

## 5.7.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

### 5.7.2.1. RCS DE 90% REJEITO + 10% DE ESTÉRIL

Na Figura 135 e na Tabela 51, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 135 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 90% de rejeito + 10% de estéril



Fonte: Autoria própria

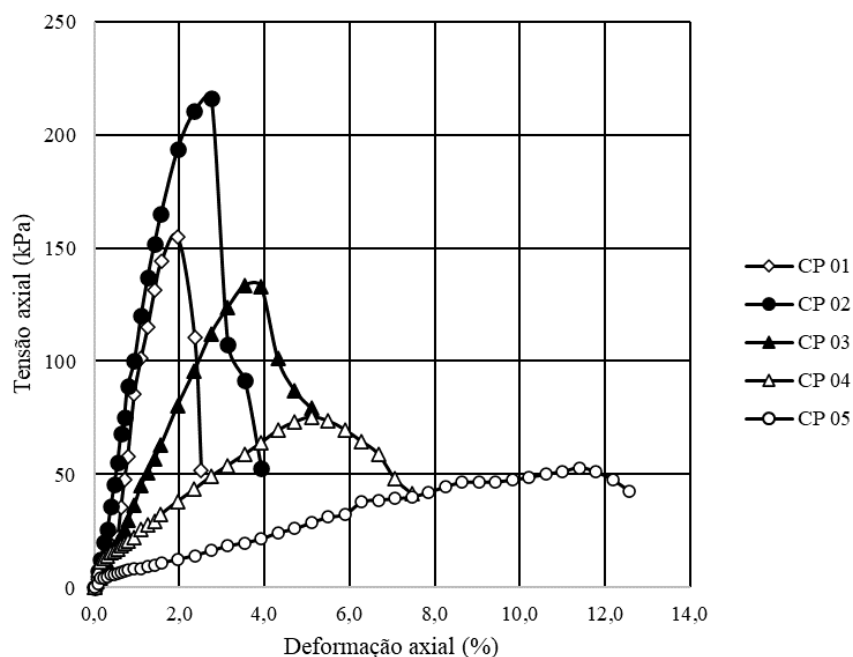
Tabela 51 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 90% de rejeito + 10% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	11,88	13,90	15,78	17,75	19,64
<b>RCS (kN/m<sup>2</sup>)</b>	154,69	216,30	133,37	75,30	53,01

Fonte: Autoria própria

Na Figura 136, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação de 90% de rejeito + 10% de estéril. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 136 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 90% de rejeito + 10% de estéril

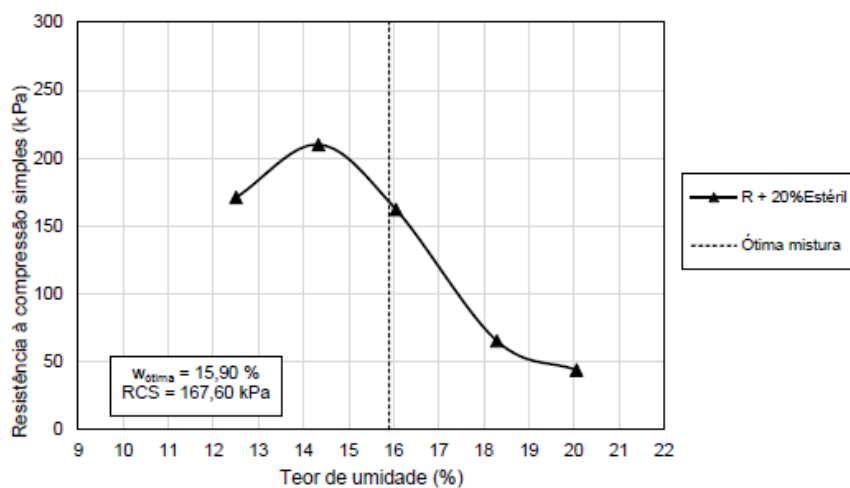


Fonte: Autoria própria

### 5.7.2.2.RCS DE 80% REJEITO + 20% DE ESTÉRIL

Na Figura 137 e na Tabela 52, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 137 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 80% de rejeito + 20% de estéril



Fonte: Autoria própria



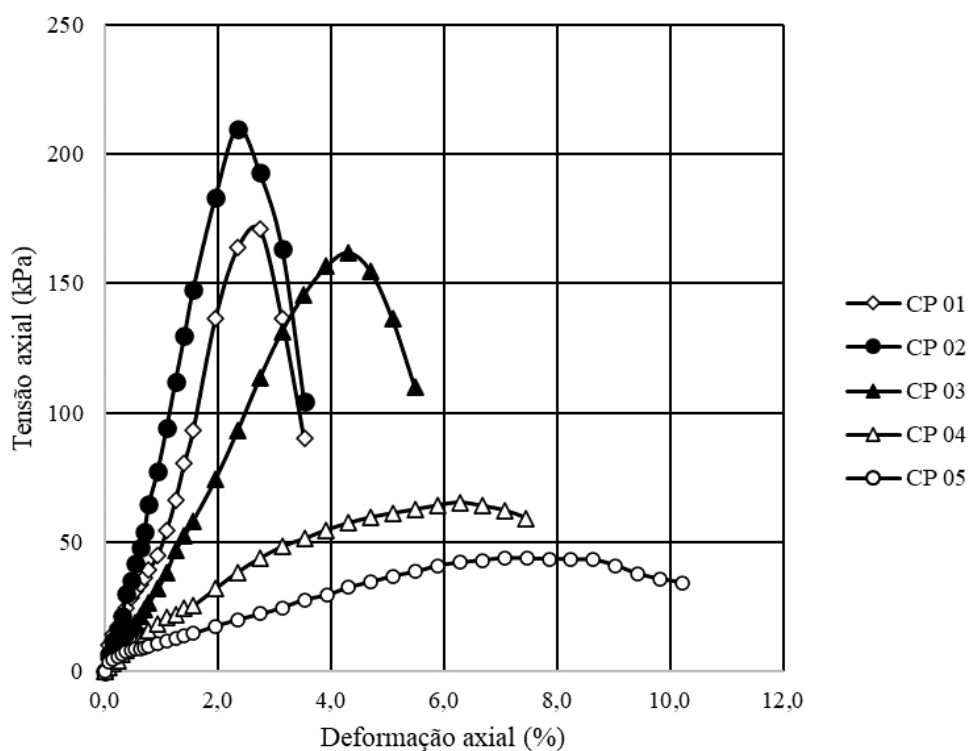
Tabela 52 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 80% de rejeito + 20% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	12,50	14,33	16,05	18,29	20,06
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	171,01	209,86	162,04	65,24	43,78

Fonte: Autoria própria

Na Figura 138, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação de 80% de rejeito + 20% de estéril. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 138 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 80% de rejeito + 20% de estéril

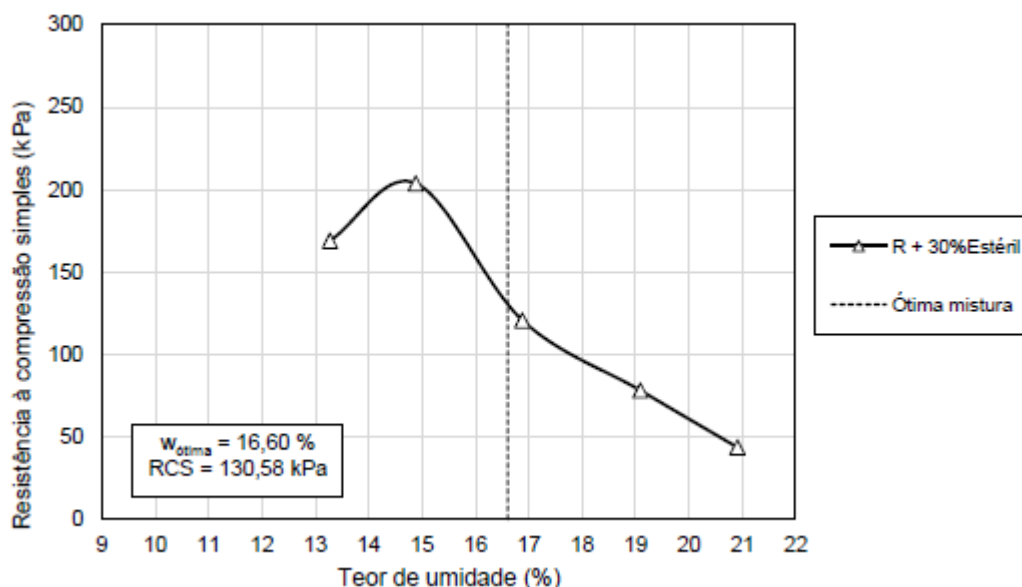


Fonte: Autoria própria

### 5.7.2.3.RCS DE 70% REJEITO + 30% DE ESTÉRIL

Na Figura 139 e na Tabela 53, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 139 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 70% de rejeito + 30% de estéril



Fonte: Autoria própria

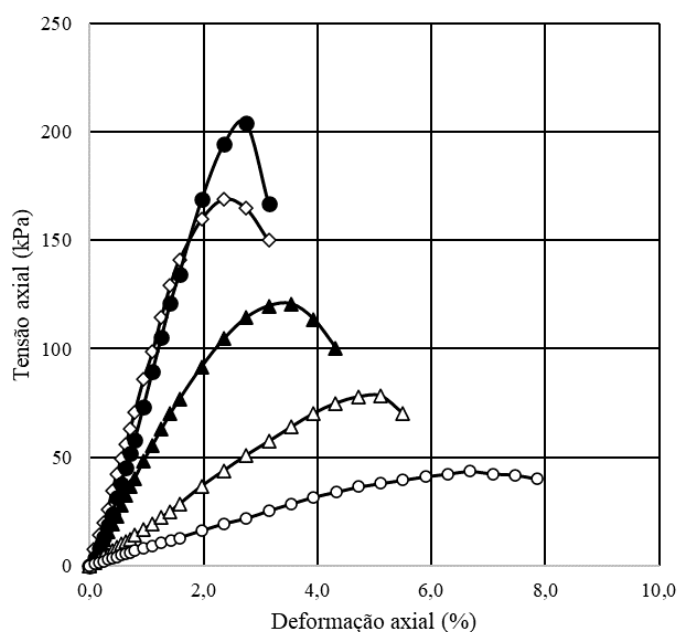
Tabela 53 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 70% de rejeito + 30% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
<b>w (%)</b>	13,27	14,88	16,84	19,09	20,91
<b>RCS (kN/m<sup>2</sup>)</b>	169,02	203,84	120,62	78,19	43,63

Fonte: Autoria própria

Na Figura 140, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação de 70% de rejeito + 30% de estéril. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 140 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 70% de rejeito + 30% de estéril

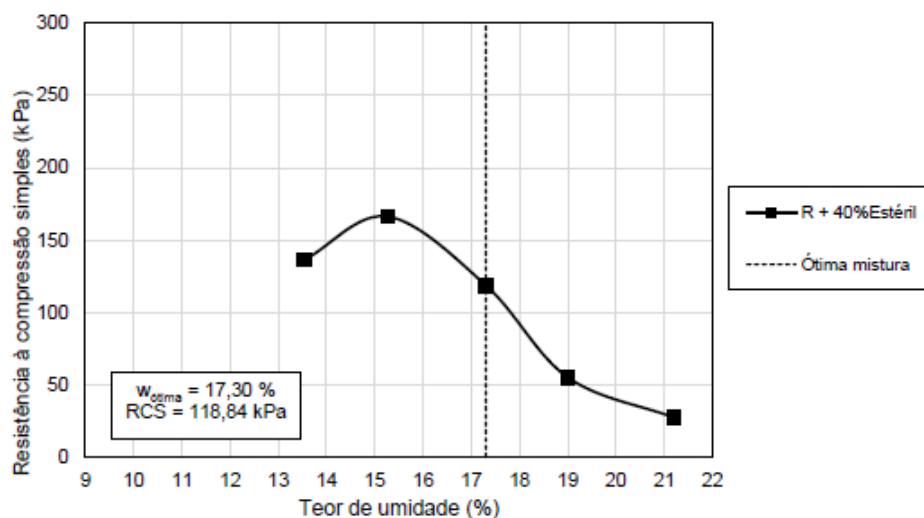


Fonte: Autoria própria

#### 5.7.2.4.RCS DE 60% REJEITO + 40% DE ESTÉRIL

Na Figura 141 e na Tabela 54, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples ao longo dos pontos da curva de compactação.

Figura 141 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 60% de rejeito + 40% de estéril



Fonte: Autoria própria

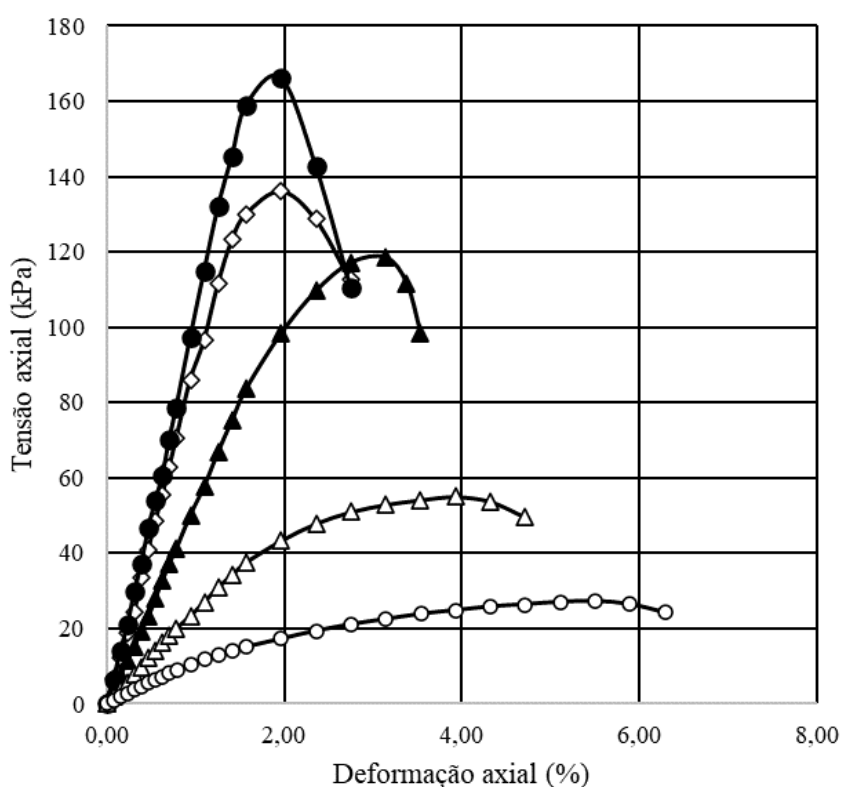
Tabela 54 – Resistência à compressão simples dos pontos do ensaio de compactação de 60% de rejeito + 40% de estéril

Ponto da Curva	1	2	3	4	5
$w$ (%)	13,17	14,81	17,14	18,91	20,86
$RCS$ ( $kN/m^2$ )	136,22	166,26	118,55	55,07	27,22

Fonte: Autoria própria

Na Figura 142, se encontram as curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de compactação de 60% de rejeito + 40% de estéril. Como pode ser observado, este comportamento também se apresenta de forma similar ao comportamento do rejeito puro e ao comportamento característico de materiais compactados, apresentado no capítulo 5.2.2, conforme indicado anteriormente, segundo Lambe e Whitman (1979).

Figura 142 – Curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova do ensaio de RCS de 60% de rejeito + 40% de estéril

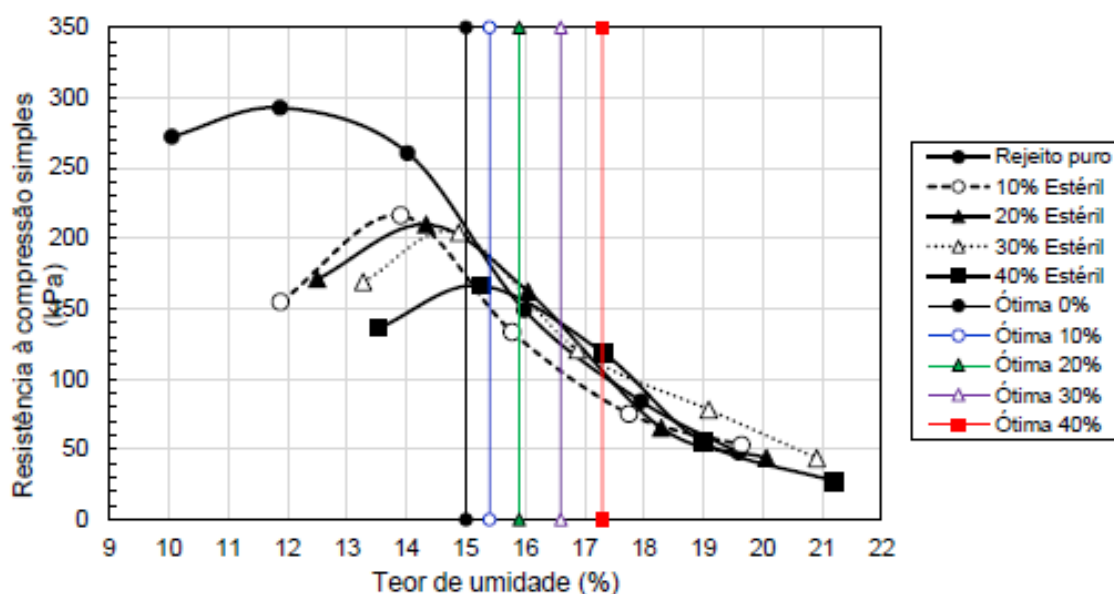


Fonte: Autoria própria

Na Figura 143 e na Tabela 55, são apresentadas todas as curvas de resistência à compressão simples realizadas para as misturas de rejeito com as diversas proporções de estéril. É indicada, neste mesmo gráfico, a resistência de cada uma das misturas, de acordo com a umidade ótima destes materiais ensaiados. Comparando as resistências dos pontos correspondentes à umidade ótima das misturas com a do rejeito puro, verifica-se que houve uma contínua queda da RCS com o aumento do teor de estéril na mistura. Esta observação é justificada principalmente pela identificação de um aumento da atividade de Skempton, que passa de 0,71 do rejeito puro para 2,37 na mistura com estéril, indicando alteração do estado de material inativo para ativo. Este comportamento geralmente indica materiais com menor capacidade de suporte.

Por fim, como para a mistura com o teor de estéril igual a 20% foi observada a menor queda de resistência, mesmo sem considerar o aumento da umidade ótima. optou-se por selecionar este teor para a execução do ensaio de compressão triaxial CIU<sub>SAT</sub>.

Figura 143 – Curvas de variação da resistência à compressão simples nas misturas com estéril



Fonte: Autoria própria

Tabela 55 – Valores da resistência à compressão simples nos pontos de ótima

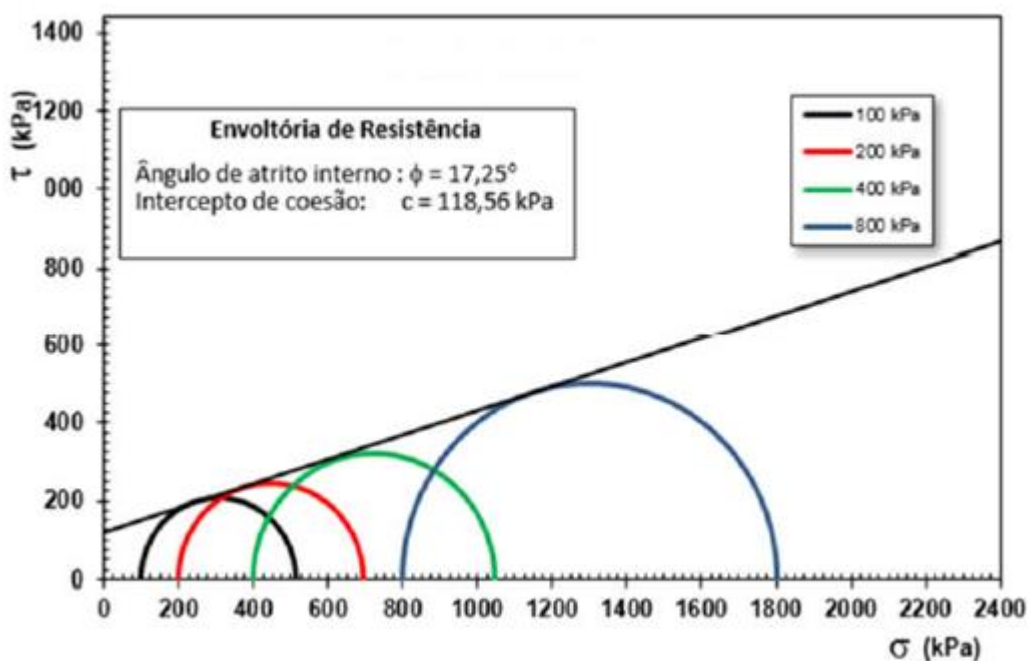
Rejeito (R) e misturas	Puro (R 0%)	90% R + 10% estéril	80% R + 20% estéril	70% R + 30% estéril	60% R + 40% estéril
$w_{ótima}$ (%)	15,00	15,40	15,90	16,60	17,30
RCS ( $kN/m^2$ )	207,65	150,70	167,60	130,58	118,84
Varição da RCS (%)	0	- 27,42	- 19,29	- 37,11	- 42,77

Fonte: Autoria própria

### 5.7.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

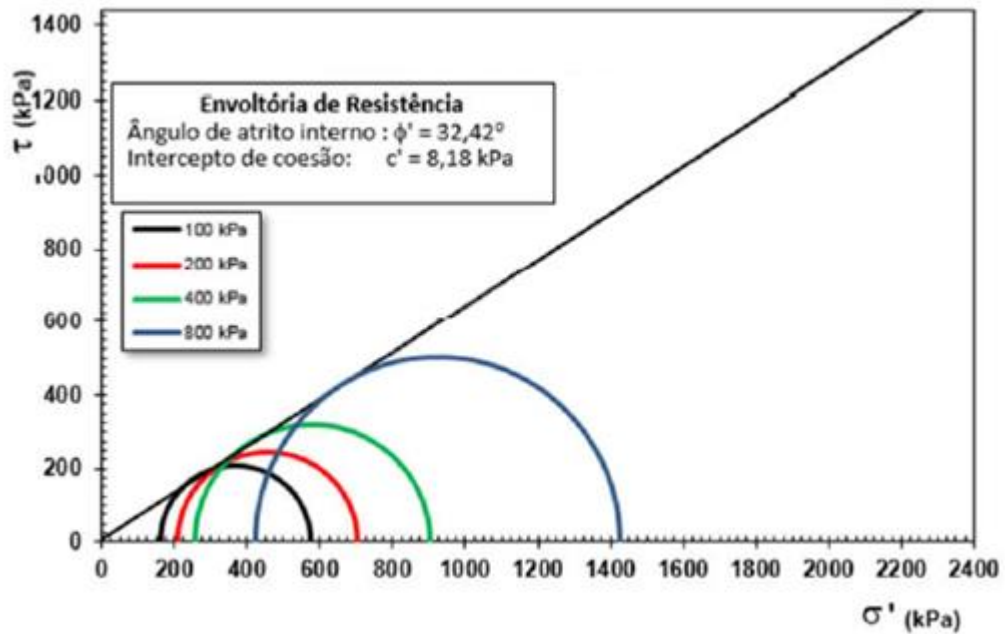
Os corpos de prova de 80% de rejeito com 20% de estéril para os ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> foram moldados buscando-se atingir a umidade ótima e o grau de compactação igual a 100% do Proctor normal. Na Figura 144 e na Figura 145, se encontram os círculos de Mohr e a envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e efetivas.

Figura 144 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria

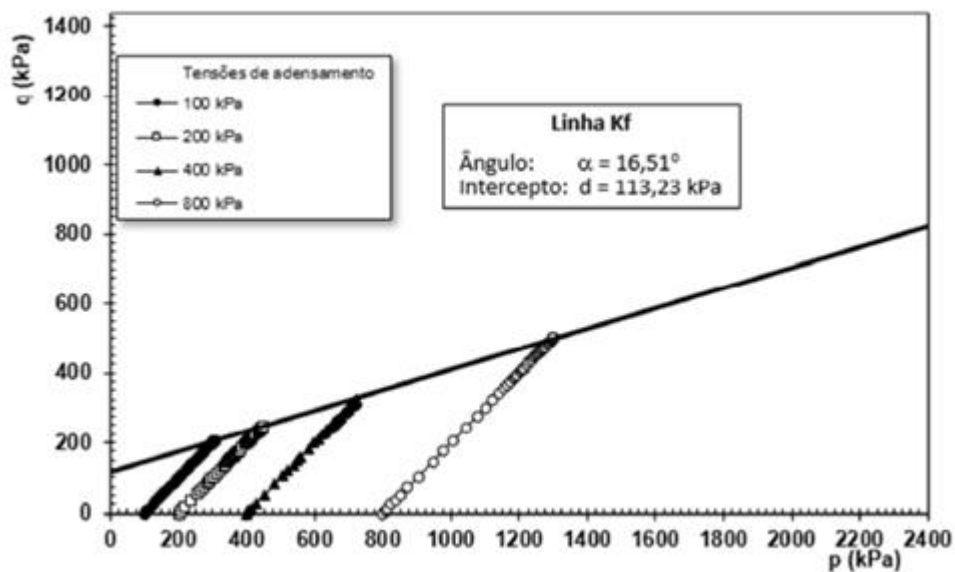
Figura 145 – Círculos de Mohr e envoltória de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria

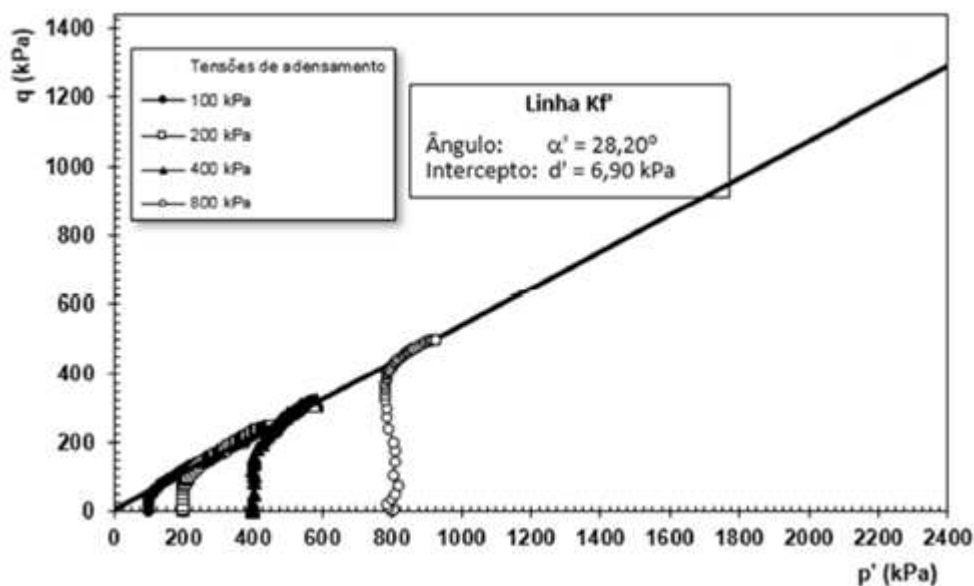
Na Figura 146 e na Figura 147, se encontram as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas de 80% de rejeito com 20% de estéril, respectivamente.

Figura 146 – Trajetórias de tensões totais (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria

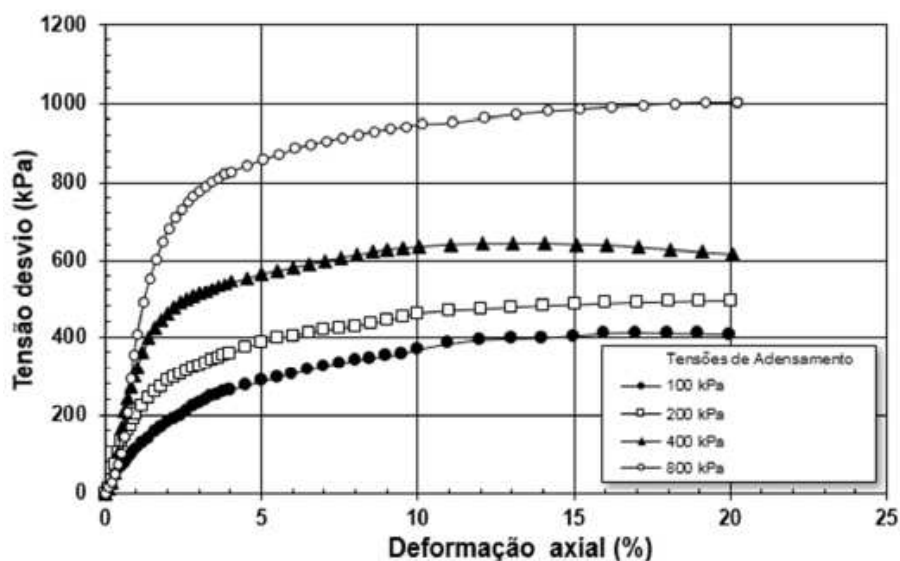
Figura 147 – Trajetórias de tensões efetivas (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria

Na Figura 148, são apresentadas as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial e, na Figura 149, é mostrada a variação do excesso de poropressão durante a fase de cisalhamento de cada CP ensaiado.

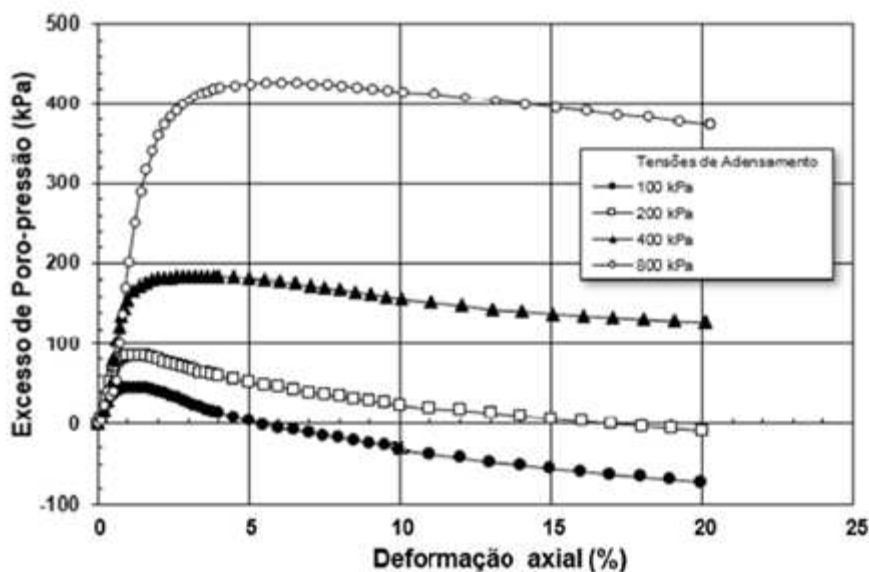
Figura 148 – Tensão desvio *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria



Figura 149 – Excesso de poropressão *versus* deformação axial (Ensaio triaxial CIU<sub>SAT</sub> de 80% de rejeito com 20% de estéril)



Fonte: Autoria própria

Como observado na Figura 147, a mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril não apresentou tendência de alteração do comportamento dilatante para contrátil para as tensões de adensamento ensaiadas.

Este comportamento vai de encontro com resultados encontrados por Borja *et al.* (2020), em que misturas de rejeito filtrado com estéril proporcionaram uma redução do comportamento contrátil do rejeito em determinados níveis de tensões, além de resultar em uma menor deformação dos CPs.

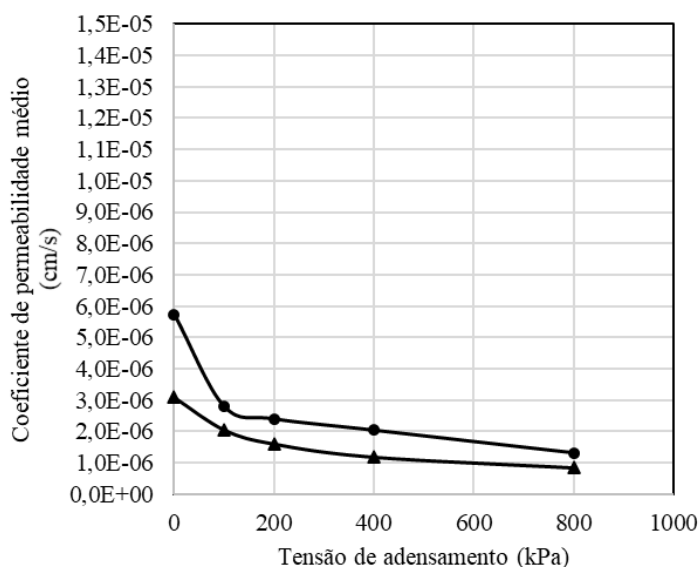
Por fim, na Figura 149, pode ser observado que, para tensões de 100 kPa e 200 kPa, a mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril apresentou a geração de excesso de poropressão negativa ao final dos ensaios, o que indica que a tensão de pré-adensamento gerada pelo Proctor normal é maior que a tensão de adensamento destes CPs. Já para as tensões de 400 kPa e 800 kPa a poropressão é positiva, mas apresenta a tendência de redução com o andamento do ensaio.

#### 5.7.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na Figura 150, são apresentadas as variações do coeficiente permeabilidade do rejeito puro e da mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril em função da tensão de adensamento

dos corpos de prova no triaxial CIU<sub>SAT</sub> realizado e, na Tabela 56, se encontram os respectivos valores de  $k$  para cada CP ensaiado.

Figura 150 – Variação da permeabilidade de 80% de rejeito com 20% de estéril



Fonte: Autoria própria

Tabela 56 – Permeabilidade de 80% de rejeito + 20% de estéril de acordo com os níveis de tensões de adensamento

CP	1	2	3	4	5
<b>Tensão (kPa)</b>	0	100	200	400	800
<b><math>k</math> (cm/s)</b>	$3,09 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-6}$	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,18 \times 10^{-6}$	$8,36 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoria própria

Para a mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril foi observada redução da permeabilidade ( $k$ ) em relação ao rejeito puro, o que se deve principalmente ao fato do estéril ser um material com presença de finos plásticos. Assim, como materiais mais finos e plásticos tendem a ter menores permeabilidades, a sua presença em misturas faz com que também haja redução dessa propriedade. Verifica-se também que com o aumento da tensão de adensamento, ocorre a redução da permeabilidade ( $k$ ) da mistura. Esse comportamento pode ser explicado com base na redução do índice de vazios dos corpos de prova, decorrente do processo de adensamento.

## 5.8. COMPARATIVOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Avaliando-se os resultados dos ensaios de compactação pelo método de Proctor, pode-se observar que inicialmente a mistura de rejeito com bentonita proporcionou um aumento da umidade ótima e uma redução do peso específico seco máximo, se comparado com o rejeito puro. Enquanto o rejeito puro apresentou resultados de umidade ótima de 15,00% e peso específico seco máximo de 20,65 kN/m<sup>3</sup>, a bentonita para o percentual de 4% apresentou os resultados de 15,80% e 20,00 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

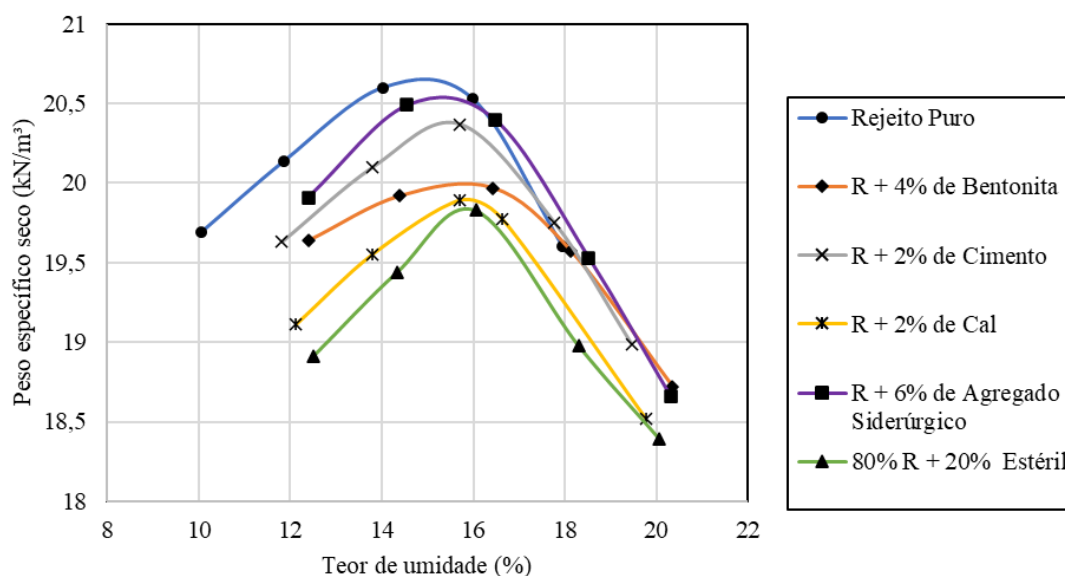
Já na mistura com 2% de cimento o aumento da umidade ótima e a redução do peso específico seco máximo também ocorreu, porém de forma bem menos expressiva do que se comparada com a mistura com 4% de bentonita. O resultado da umidade ótima alcançado foi de 15,80% e do peso específico seco máximo foi de 20,39 kN/m<sup>3</sup>.

Para o rejeito mais 2% de cal observou-se que dentre as misturas, esta foi a amostra com maior umidade ótima, 15,92%. Já o peso específico seco máximo também apresentou uma redução para 19,90 kN/m<sup>3</sup>.

A mistura com 6% de agregado siderúrgico apresentou valor de umidade ótima foi de 15,30% e o peso específico seco máximo de 20,54 kN/m<sup>3</sup>.

Por fim, para a mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril, assim como para todas as demais misturas, identificou-se o aumento da umidade ótima, 15,90%, e a redução do peso específico seco máximo, 19,84 kN/m<sup>3</sup>. É importante mencionar que a mistura com o estéril apresentou a maior redução do valor do peso específico seco máximo. Na Figura 151, se encontra um gráfico comparativo do rejeito puro e das misturas com as conclusões descritas acima sobre a compactação dos materiais.

Figura 151 – Comparativo ensaio de compactação pelo método de Proctor



Fonte: Autoria própria

Para a determinação dos valores do peso específico úmido, considerou-se que cada corpo de prova fosse compactado em 100% do Proctor normal e na umidade ótima. Deste modo, observou-se que o material com maior peso específico úmido é o rejeito puro, 23,75 kN/m<sup>3</sup>. Para as misturas, as amostras com maior e menor peso específico úmido são respectivamente a mistura com 6% de agregado siderúrgico (23,68 kN/m<sup>3</sup>) e 80% de rejeito com 20% de estéril (22,99 kN/m<sup>3</sup>).

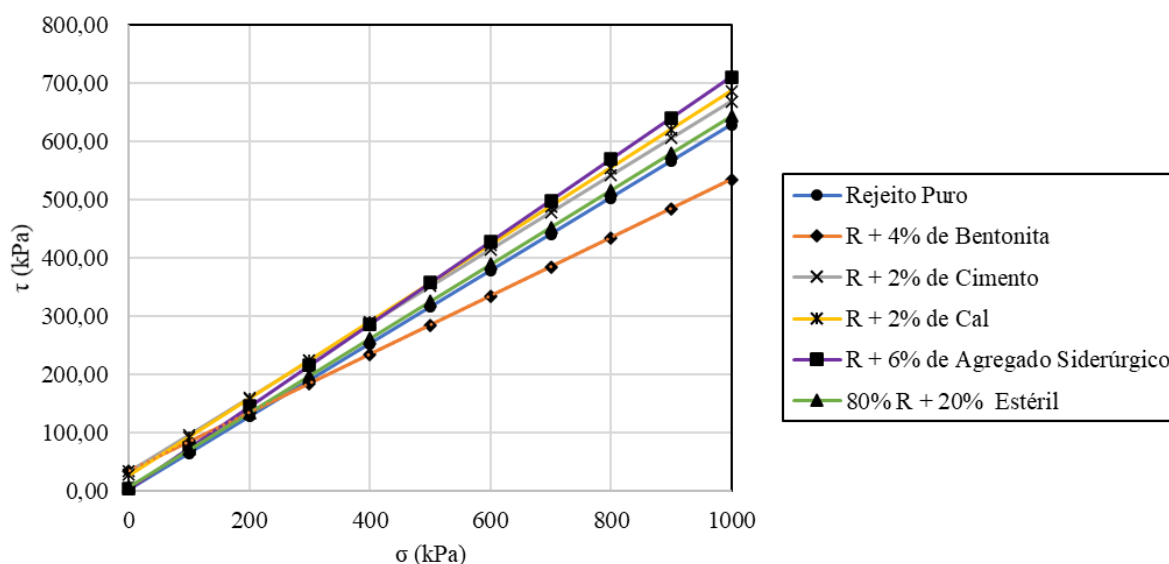
É importante mencionar que as comparações de umidade ótima e peso específico seco máximo não foram realizadas para demais percentuais de misturas, afinal estas avaliações foram feitas anteriormente para a definição dos percentuais ideais para a execução do triaxial CIU<sub>SAT</sub>.

Já sobre os parâmetros de resistência, pode-se identificar que as misturas selecionadas de bentonita, cimento e cal apresentaram ganho considerável da coesão efetiva ( $c'$ ), sendo que a mistura de 4% de bentonita foi a amostra que apresentou um aumento de 2,53 kPa (rejeito puro) para 34,41 kPa. As demais amostras de agregado siderúrgico e estéril também apresentaram ganhos de coesão efetiva, mas menos expressivos.

Para o ângulo de atrito efetivo ( $\varphi'$ ), observou-se que as misturas que apresentaram maiores ganhos foram a cal e o agregado siderúrgico, sendo que a mistura de 6% de agregado siderúrgico apresentou um aumento de 32,02° (rejeito puro) para 35,23°. A mistura com 4% de

bentonita foi a única mistura com redução do ângulo de atrito efetivo ( $26,56^\circ$ ). Já as demais amostras tiveram um pequeno aumento neste parâmetro de resistência. Na Figura 152, se encontram as envoltórias de resistência do rejeito puro e de cada uma das misturas.

Figura 152 – Comparativo das envoltórias de resistência efetivas (delimitadas pela máxima tensão desenvolvida nos ensaios)



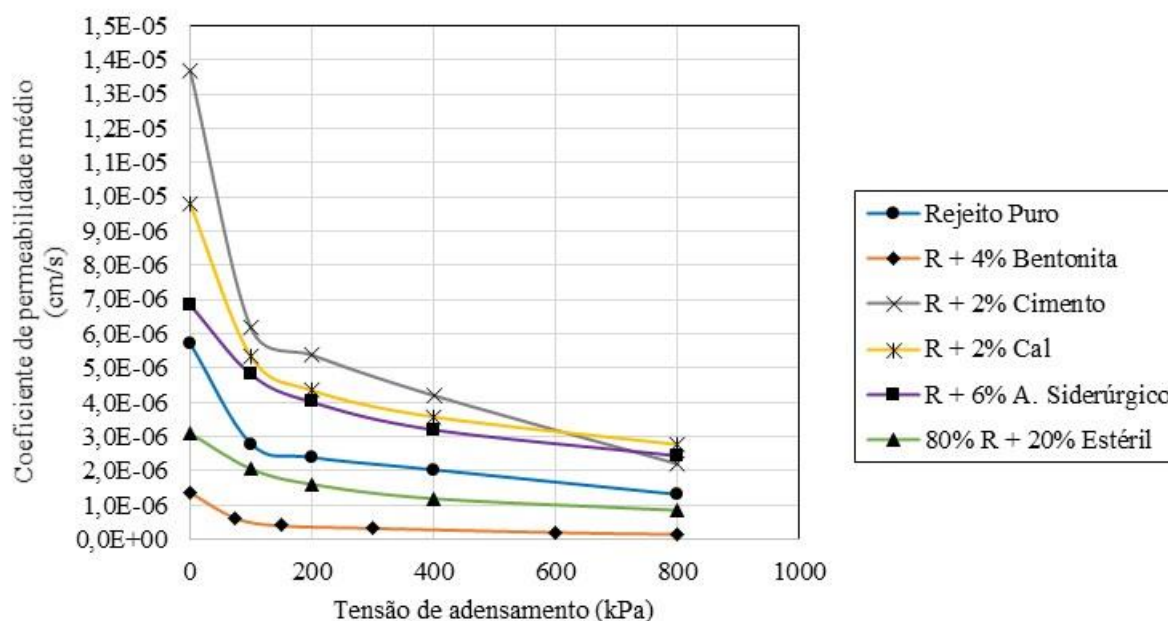
Fonte: Autoria própria

É importante mencionar que as misturas que apresentaram comportamento dilatante em todos os níveis de tensões ensaiados foram o agregado siderúrgico e o estéril, apresentando grande vantagem para estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados e compactados de elevadas alturas. As demais misturas mantiveram o comportamento contrátil do rejeito à 800 kPa de tensão adensamento. Este item apresenta grande vantagem na utilização destes materiais, porém o comportamento destas misturas deve ser validado através de aterros experimentais, ensaios triaxiais CIU de blocos indeformados, ensaios CPTU para avaliação das condições reais de geração de poropressão e subsidiar análises tensão-deformação.

Por fim, sobre o coeficiente de permeabilidade dos materiais ( $k$ ), conforme Figura 153, as misturas de bentonita e estéril apresentaram redução da permeabilidade, se comparado com o rejeito puro, sendo a mistura com 4% de bentonita a menos permeável. Já as misturas com cimento, cal e agregado siderúrgico apresentaram aumento da permeabilidade, sendo a mistura com 2% de cimento a mais permeável. Além disso, todas as amostras apresentaram redução da permeabilidade com o aumento da tensão de adensamento, o que pode ser justificado pela redução dos índices de vazios dos CPs.

É importante ressaltar que, conforme indicado por Vizcarra (2021), para modelagens numéricas de tensão-deformação de pilhas de rejeitos, existe uma forte relação entre a permeabilidade dos materiais, a taxa de empilhamento de rejeitos e a taxa de dissipação da poropressão. Com a redução da permeabilidade dos rejeitos e taxas de empilhamentos elevadas, o excesso de poropressão positivo se dissipa lentamente, impactando negativamente na estabilidade da pilha de rejeitos.

Figura 153 – Comparativo da permeabilidade



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 57 são apresentados os principais resultados apresentados nesta comparação.

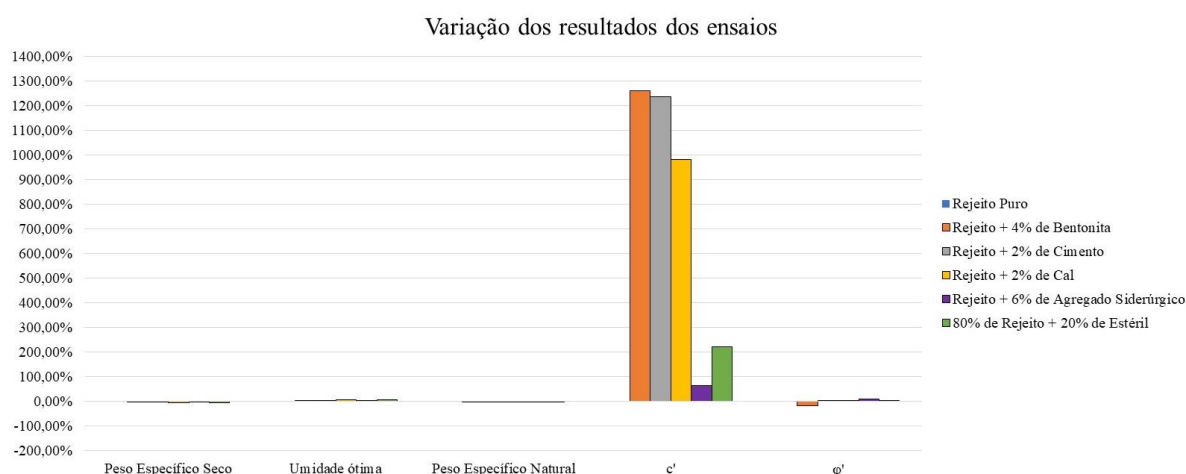
Tabela 57 – Principais resultados dos ensaios

Material	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{\acute{o}tima}$ (%)	$\gamma_n - 100\%$ do Proctor normal (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Rejeito Puro	20,65	15,00	23,75	2,53	32,02
Rejeito + 4% de Bentonita	20,00	15,80	23,16	34,41	26,56
Rejeito + 2% de Cimento	20,39	15,54	23,56	33,82	32,40
Rejeito + 2% de Cal	19,90	15,92	23,07	27,38	33,38
Rejeito + 6% de Agregado Siderúrgico	20,54	15,30	23,68	4,16	35,23
80% de Rejeito + 20% de Estéril	19,84	15,90	22,99	8,18	32,42

Fonte: Autoria própria

Por fim, conforme mostrado na Figura 154, o principal ganho das amostras com a realização das misturas foi sobre os parâmetros de coesão efetiva, para o qual ocorreram aumentos na casa de 1.260,10% de incremento. Os demais parâmetros tiveram ganhos em menores proporções.

Figura 154 – Variação dos resultados dos ensaios



Fonte: Autoria própria

Diante dos itens apresentados, observa-se que dentre os aditivos estudados, os mais adequados para a utilização, devido aos ganhos observados nos ensaios desenvolvidos ao

longo da pesquisa, são o cimento e a cal. Estes aditivos apresentaram aumento expressivo da coesão e aumento da permeabilidade do material, itens importantíssimos para melhoramento das condições de estabilidade da estrutura.

### 5.9. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Com a realização das análises de estabilidade do estudo de caso, utilizando-se os parâmetros obtidos nos ensaios, conforme Tabela 57, foi possível verificar os reais ganhos na estabilidade da estrutura em sua seção crítica para todos os percentuais ideias dos aditivos estudados. Os modelos das análises de estabilidade seguiram as seguintes configurações:

- Empilhamento somente de rejeitos filtrados compactados com a pilha em sua conformação inicial (142 m de altura de máxima coluna de rejeitos);
- Empilhamento somente de rejeitos filtrados compactados com aumento da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos), de modo que sejam observados ganhos volumétricos da disposição;
- Empilhamento de rejeitos filtrados compactados totalmente aditivados e com aumento da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos);
- Empilhamento dos rejeitos filtrados compactados com faixa estabilizadora de 30m verticais da mistura com aditivo, e com aumento da altura da pilha (172 m de altura máxima de coluna de rejeitos); e
- Empilhamento de rejeitos filtrados compactados aditivados (mistura com maiores ganhos de FS) com aumento da inclinação dos taludes, de modo que sejam observados ganhos volumétricos da disposição.

Após a criação do modelo no *software Slide2* da *Rocscience Inc.*, foram realizadas as análises de estabilidade com as premissas apresentadas nos capítulos 4.3 e 4.4 desta dissertação.

Conforme apresentado na Tabela 58, inicialmente observou-se que, com o aumento da altura da pilha para de 142 m para 172 m (coluna de rejeitos), os Fatores de Segurança não tiveram grande variação, chegando à uma média de redução do FS de -2,10%. Este fato pode ser explicado por duas questões. Primeiramente, os menores fatores de segurança das análises de estabilidade majoritariamente foram locais, deste modo, o aumento da altura da estrutura não contribuiria para a redução considerável do FS destas cunhas. Um segundo ponto refere-se ao ângulo geral dos taludes [1,0(V):3,5(H)] da estrutura, que se mostraram favoráveis a



condição de estabilidade, em que o aumento da altura da pilha não reduziu o FS das cunhas globais para os tipos de análises modelados.

Tabela 58 – Resultados das análises de estabilidade – Variação da altura da pilha

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas
Rejeito Puro	Pilha de material único	142m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,24	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas
					Esquerda	2,41	1,50			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50			
					Esquerda	1,87	1,50			
				Global	Direita	2,26	1,30			
					Esquerda	2,36	1,30			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,30			
					Esquerda	1,86	1,30			
				Global	Direita	1,93	1,10			
					Esquerda	2,02	1,10			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10			
					Esquerda	1,62	1,10			
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	2,68%	-2,10%	Global e Local/Entre Bermas
					Esquerda	2,27	1,50	-5,81%		
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50	0,00%		
					Esquerda	1,80	1,50	-3,74%		
				Global	Direita	2,26	1,30	0,00%		
					Esquerda	2,24	1,30	-5,08%		
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,30	0,00%		
					Esquerda	1,80	1,30	-3,23%		
				Global	Direita	1,89	1,10	-2,07%		
					Esquerda	1,91	1,10	-5,45%		
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10	0,00%		
					Esquerda	1,58	1,10	-2,47%		

Fonte: Autoria própria

Como a variação da altura da pilha não apresentou redução considerável do FS, as análises de estabilidade com a utilização de aditivo foram realizadas sempre com a altura de 172 m de pilha de rejeitos. Deste modo, a referência comparativa foram as análises de estabilidade para a pilha de 172 m, conforme Tabela 59.

Tabela 59 – Resultados das análises de estabilidade – Referência

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas
					Esquerda	2,27	1,50			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50			
					Esquerda	1,80	1,50			
				Global	Direita	2,26	1,30			
					Esquerda	2,24	1,30			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,30			
					Esquerda	1,80	1,30			
				Global	Direita	1,89	1,10			
					Esquerda	1,91	1,10			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10			
					Esquerda	1,58	1,10			

Fonte: Autoria própria

As primeiras análises de estabilidade com misturas realizadas foram de rejeito com 4% de bentonita. Neste caso, foi observada a redução do FS das duas metodologias de empilhamento propostas. Além disso, as análises tiveram majoritariamente ruptura global, conforme Tabela 60. Este fato é explicado pela redução considerável do ângulo de atrito efetivo, de 34,41° para 26,56°, e aumento da coesão efetiva, de 2,53 kPa para 32,02 kPa.

Tabela 60 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bemas
					Esquerda	2,27	1,50			
				Local/Entre Bemas	Direita	1,82	1,50			
					Esquerda	1,80	1,50			
				Global	Direita	2,26	1,30			
					Esquerda	2,24	1,30			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bemas	Direita	1,82	1,30			
					Esquerda	1,80	1,30			
				Global	Direita	1,89	1,10			
					Esquerda	1,91	1,10			
				Local/Entre Bemas	Direita	1,59	1,10			
					Esquerda	1,58	1,10			
Rejeito + 4% de Bentonita	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,10	1,50	-8,70%	-5,53%	Global
					Esquerda	2,24	1,50	-1,32%		
				Local/Entre Bemas	Direita	-	1,50	-		
					Esquerda	-	1,50	-		
				Global	Direita	1,94	1,30	-14,16%		
					Esquerda	2,24	1,30	0,00%		
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bemas	Direita	-	1,30	-		
					Esquerda	-	1,30	-		
				Global	Direita	1,75	1,10	-7,41%		
					Esquerda	1,88	1,10	-1,57%		
				Local/Entre Bemas	Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		
Rejeito + 4% de Bentonita	Face da Pilha com utilização de aditivo	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,13	1,50	-7,39%	-3,64%	Global
					Esquerda	2,24	1,50	-1,32%		
				Local/Entre Bemas	Direita	-	1,50	-		
					Esquerda	-	1,50	-		
				Global	Direita	2,13	1,30	-5,75%		
					Esquerda	2,24	1,30	0,00%		
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bemas	Direita	-	1,30	-		
					Esquerda	-	1,30	-		
				Global	Direita	1,78	1,10	-5,82%		
					Esquerda	1,88	1,10	-1,57%		
				Local/Entre Bemas	Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		

Fonte: Autoria própria

Para as análises de estabilidade do rejeito com 2% de cimento, observou-se ganhos consideráveis do FS, sendo o mais efetivo a metodologia de empilhamento de todo o rejeito misturado, conforme Tabela 61. Tal fato é explicado principalmente pelo aumento da coesão efetiva do material, de 2,53 kPa para 32,02 kPa, reduzindo deste modo as rupturas locais que ocorrem na pilha de rejeito puro.

Tabela 61 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas
					Esquerda	2,27	1,50			
					Local/Entre Bermas	Direita	1,82			
				Esquerda	1,80	1,50				
				Global	Direita	2,26	1,30			
					Esquerda	2,24	1,30			
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)		Local/Entre Bermas	Direita	1,82			
				Esquerda		1,80	1,30			
				Global		Direita	1,89			
				Local/Entre Bermas	Esquerda	1,91	1,10			
					Direita	1,59	1,10			
					Esquerda	1,58	1,10			
Rejeito + 2% de Cimento	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,61	1,50	13,48%	16,62%	Global
					Esquerda	2,75	1,50	21,15%		
					Local/Entre Bermas	Direita	-	1,50		
				Esquerda	-	1,50	-			
				Global	Direita	2,42	1,30	7,08%		
					Esquerda	2,75	1,30	22,77%		
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)		Local/Entre Bermas	Direita	-	1,30		
				Esquerda		-	1,30	-		
				Global		Direita	2,17	1,10		
				Local/Entre Bermas	Esquerda	2,30	1,10	20,42%		
					Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		
Rejeito + 2% de Cimento	Face da Pilha com utilização de aditivo	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,45	1,50	6,52%	11,47%	Global
					Esquerda	2,67	1,50	17,62%		
					Local/Entre Bermas	Direita	-	1,50		
				Esquerda	-	1,50	-			
				Global	Direita	2,30	1,30	1,77%		
					Esquerda	2,66	1,30	18,75%		
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)		Local/Entre Bermas	Direita	-	1,30		
				Esquerda		-	1,30	-		
				Global		Direita	2,04	1,10		
				Local/Entre Bermas	Esquerda	2,22	1,10	16,23%		
					Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		

Fonte: Autoria própria

Para as análises de rejeito com 2% de cal observou-se comportamento semelhante ao da mistura com cimento, com um aumento do FS, um maior ganho de FS no modelo de empilhamento de todo o material misturado e a redução das cunhas locais. Porém, a cal foi mais efetiva que o cimento, pois apresentou FS maiores, conforme Tabela 62. Este fato é justificado pelo aumento da coesão efetiva, de 2,53 kPa para 27,38 kPa, e pelo pequeno aumento do ângulo de atrito efetivo, de 32,02° para 33,38°.

Tabela 62 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cal

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas
					Esquerda	2,27	1,50			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50			
					Esquerda	1,80	1,50			
				Global	Direita	2,26	1,30			
					Esquerda	2,24	1,30			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,30			
					Esquerda	1,80	1,30			
				Global	Direita	1,89	1,10			
					Esquerda	1,91	1,10			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10			
					Esquerda	1,58	1,10			
Rejeito + 2% de Cal	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,66	1,50	15,65%	18,64%	Global
					Esquerda	2,79	1,50	22,91%		
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,50	-		
					Esquerda	-	1,50	-		
				Global	Direita	2,48	1,30	9,73%		
					Esquerda	2,78	1,30	24,11%		
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	-	1,30	-		
					Esquerda	-	1,30	-		
				Global	Direita	2,22	1,10	17,46%		
					Esquerda	2,33	1,10	21,99%		
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		
Rejeito + 2% de Cal	Face da Pilha com utilização de aditivo	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,46	1,50	6,96%	11,94%	Global
					Esquerda	2,68	1,50	18,06%		
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,50	-		
					Esquerda	-	1,50	-		
				Global	Direita	2,30	1,30	1,77%		
					Esquerda	2,68	1,30	19,64%		
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Local/Entre Bermas	Direita	-	1,30	-		
					Esquerda	-	1,30	-		
				Global	Direita	2,04	1,10	7,94%		
					Esquerda	2,24	1,10	17,28%		
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,10	-		
					Esquerda	-	1,10	-		

Fonte: Autoria própria

Nas análises de estabilidade com a utilização de rejeito com 6% de agregado siderúrgico os ganhos também foram expressivos para o aumento do FS, sendo novamente o empilhamento de toda a mistura a condição mais segura, conforme Tabela 63. Neste caso, porém, as análises de estabilidade indicaram cunhas mais críticas locais. Isto se justifica pela baixa coesão efetiva da mistura, 4,16 kPa, indicando que os ganhos do FS foram pelo aumento do ângulo de atrito efetivo do material, passando de 32,02° para 35,23°.

Tabela 63– Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas	
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas	
					Esquerda	2,27	1,50				
					Local/Entre Bermas	Direita	1,82				1,50
				Global	Esquerda	1,80	1,50				
					Local/Entre Bermas	Direita	2,26				1,30
						Esquerda	2,24				1,30
			Global	Direita		1,82	1,30				
				Local/Entre Bermas	Esquerda	1,80	1,30				
					Global	Direita	1,89				1,10
			Local/Entre Bermas			Esquerda	1,91				1,10
				Global		Direita	1,59				1,10
					Local/Entre Bermas	Esquerda	1,58				1,10
Rejeito + 6% de Agregado Siderúrgico	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)			Global	Direita	2,61	1,50	13,48%	16,29%
				Esquerda			2,60	1,50	14,54%		
				Local/Entre Bermas	Direita		2,14	1,50	17,58%		
				Global	Esquerda	2,12	1,50	17,78%			
					Local/Entre Bermas	Direita	2,60	1,30	15,04%		
						Esquerda	2,57	1,30	14,73%		
			Global	Direita		2,15	1,30	18,13%			
				Local/Entre Bermas	Esquerda	2,12	1,30	17,78%			
					Global	Direita	2,20	1,10	16,40%		
			Local/Entre Bermas			Esquerda	2,19	1,10	14,66%		
				Global		Direita	1,87	1,10	17,61%		
					Local/Entre Bermas	Esquerda	1,86	1,10	17,72%		
Rejeito + 6% de Agregado Siderúrgico	Face da Pilha com utilização de aditivo	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)			Global	Direita	2,52	1,50	9,57%	14,30%
				Esquerda			2,60	1,50	14,54%		
				Local/Entre Bermas	Direita		2,14	1,50	17,58%		
				Global	Esquerda	2,12	1,50	17,78%			
					Local/Entre Bermas	Direita	2,33	1,30	3,10%		
						Global	Esquerda	2,57	1,30	14,73%	
			Local/Entre Bermas	Direita			2,14	1,30	17,58%		
				Global	Esquerda		2,12	1,30	17,78%		
					Local/Entre Bermas	Direita	2,06	1,10	8,99%		
			Global			Esquerda	2,19	1,10	14,66%		
				Local/Entre Bermas		Direita	1,87	1,10	17,61%		
					Local/Entre Bermas	Esquerda	1,86	1,10	17,72%		

Fonte: Autoria própria

Por fim, para a mistura de 80% de rejeito com 20% de estéril identificou-se nas análises de estabilidade que os ganhos do FS foram consideráveis, porém com a existência ainda das cunhas locais, conforme Tabela 64. Desde modo, pode-se perceber que o ganho de coesão efetiva não foi suficiente para reduzir estes tipos de cunha. Além disso, a disposição de todo o empilhamento com a mistura foi mais efetiva do que a utilização da faixa de mistura.

Tabela 64 – Resultados das análises de estabilidade – 80% de Rejeito + 20% de estéril

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas	
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas	
					Esquerda	2,27	1,50				
					Local/Entre Bermas	Direita	1,82				1,50
				Esquerda	1,80	1,50					
				Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,26				1,30
						Esquerda	2,24				1,30
			Local/Entre Bermas			Direita	1,82				1,30
			Esquerda	1,80	1,30						
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,89	1,10				
					Esquerda	1,91	1,10				
					Local/Entre Bermas	Direita	1,59				1,10
				Esquerda	1,58	1,10					
80% de Rejeito + 20% de Estéril	Pilha de material único	172m		Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,40	1,50	4,35%	13,52%	Global e Local/Entre Bermas
						Esquerda	2,46	1,50	8,37%		
			Local/Entre Bermas			Direita	2,19	1,50	20,33%		
			Esquerda		2,17	1,50	20,56%				
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)		Global	Direita	2,32	1,30	2,65%		
						Esquerda	2,43	1,30	8,48%		
				Local/Entre Bermas		Direita	2,19	1,30	20,33%		
			Esquerda	2,17	1,30	20,56%					
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,99	1,10	5,29%			
					Esquerda	2,07	1,10	8,38%			
					Local/Entre Bermas	Direita	1,94	1,10	22,01%		
				Esquerda	1,91	1,10	20,89%				
80% de Rejeito + 20% de Estéril	Face da Pilha com utilização de aditivo	172m		Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,39	1,50	3,91%	11,80%	Global e Local/Entre Bermas
						Esquerda	2,46	1,50	8,37%		
			Local/Entre Bermas			Direita	2,12	1,50	16,48%		
			Esquerda		2,17	1,50	20,56%				
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)		Global	Direita	2,27	1,30	0,44%		
						Esquerda	2,43	1,30	8,48%		
				Local/Entre Bermas		Direita	2,12	1,30	16,48%		
			Esquerda	2,17	1,30	20,56%					
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,99	1,10	5,29%			
					Esquerda	2,07	1,10	8,38%			
					Local/Entre Bermas	Direita	-	1,10	-		
				Esquerda	1,91	1,10	20,89%				

Fonte: Autoria própria

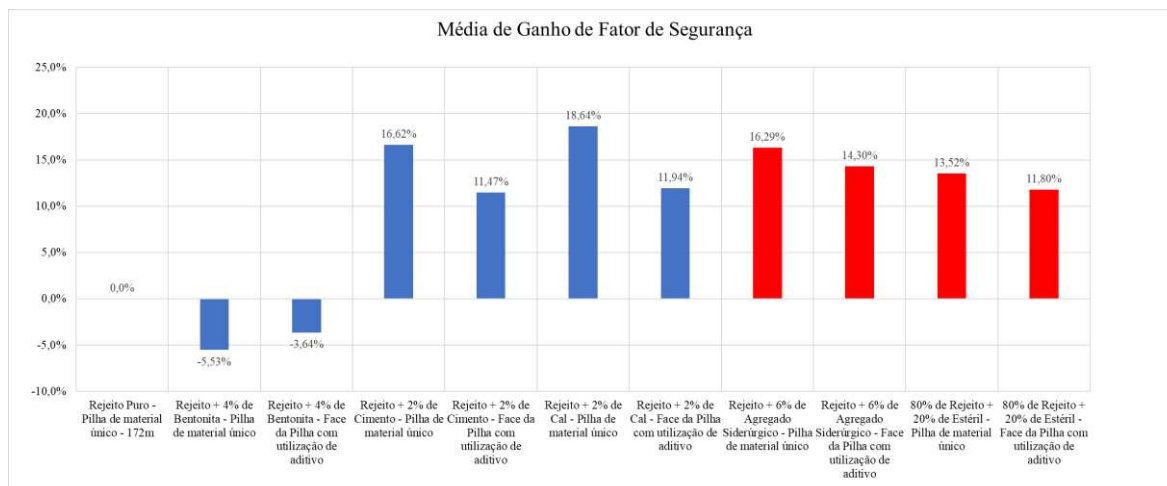
É importante mencionar que todas as análises de estabilidade indicaram que a estrutura se encontra acima do  $FS_{mín}$  para os tipos de análises desenvolvidos e para os modelos de empilhamento propostos.

Outro ponto é que foram realizados ensaios triaxiais nos rejeitos e nas misturas para as tensões de adensamento de até 800 kPa. Com estes ensaios, foi avaliado se nestas tensões os rejeitos e as misturas apresentariam comportamentos contráteis ou dilatantes. Alguns triaxiais apresentaram comportamento contrátil a 800 kPa e outros não. Sendo assim, não se considerou pertinente a realização de análises de estabilidade em condições não drenadas, afinal não foram realizados ensaios para maiores níveis de tensões para avaliação comparativa deste tipo de análise.

Realizando uma avaliação comparativa das análises de estabilidade com uso de aditivos, Figura 155, identifica-se que a mistura mais efetiva em termos de FS foi a utilização de rejeito com 2% de cal em toda a pilha, para a qual foi alcançada uma média de aumento do FS de 18,64%. Porém, é importante mencionar que, do ponto de vista econômico, o material que se torna mais vantajoso deste estudo, é o estéril (co-disposição); afinal a utilização deste

material não oneraria ainda mais os custos da mina para a disposição dos rejeitos, já que estes dois materiais necessitam ter uma destinação durante o processo de exploração mineral.

Figura 155 – Análise comparativa das análises de estabilidade



Fonte: Autoria Própria

Por fim, com a determinação da metodologia e do aditivo com maior ganho de FS, rejeito com 2% de cal em toda a pilha, foi possível a realização de análises de estabilidade para otimização do ângulo geral dos taludes da pilha de 172 m. Com isto, observou-se, por meio de análises iterativas, que com a utilização de rejeito com 2% de cal, seria possível a otimização do ângulo geral da estrutura em 11° (Tabela 65), proporcionando assim, maior capacidade volumétrica de disposição de rejeitos na pilha.

Tabela 65 – Resultados das análises de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização da inclinação geral dos taludes (11°)

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Perceptual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas	
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas	
					Esquerda	2,27	1,50				
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50				
					Esquerda	1,80	1,50				
				Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,26				1,30
						Esquerda	2,24				1,30
			Local/Entre Bermas		Direita	1,82	1,30				
				Esquerda	1,80	1,30					
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,89	1,10				
					Esquerda	1,91	1,10				
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10				
					Esquerda	1,58	1,10				
Rejeito + 2% de Cal	Pilha de material único - Otimização da inclinação geral dos taludes (11,00°)	172m		Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	1,53	1,50	-33,48%	-28,49%	Global
						Esquerda	1,54	1,50	-32,16%		
			Local/Entre Bermas		Direita	-	1,50	-			
					Esquerda	-	1,50	-			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)		Global	Direita	1,53	1,30	-32,30%		
						Esquerda	1,54	1,30	-31,25%		
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,30	-			
			Esquerda		1,53	1,30	-15,00%				
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,36	1,10	-28,04%			
					Esquerda	1,39	1,10	-27,23%			
				Local/Entre Bermas	Direita	-	1,10	-			
					Esquerda	-	1,10	-			

Fonte: Autoria própria

De modo à complementar as análises desenvolvidas, foram realizadas avaliações também do ganho de inclinação dos taludes com a disposição de toda a pilha com 80% de rejeito com 20% de estéril. Esta avaliação foi realizada devido à atratividade econômica de utilizar-se o estéril como aditivo ao rejeito. Com as análises de estabilidade iterativas para otimização do ângulo geral dos taludes da pilha de 172 m, observou-se que, com a utilização de 80% do rejeito com 20% de estéril, seria possível a otimização do ângulo geral da estrutura em 4° (Tabela 66), proporcionando assim maior capacidade volumétrica de disposição de rejeitos na pilha.



Tabela 66 – Resultados das análises de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril –  
Otimização da inclinação geral dos taludes (4°)

Material	Conceito de Disposição	Altura da Pilha	Tipo de Análise de Estabilidade	Tipo de Ruptura	Direção do Talude	FS Obtido	FS Mínimo	Percentual de Ganho de FS	Média de Ganho de FS	Tipo de rupturas	
Rejeito Puro	Pilha de material único	172m	Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,30	1,50	Referência	Referência	Global e Local/Entre Bermas	
					Esquerda	2,27	1,50				
				Local/Entre Bermas	Direita	1,82	1,50				
					Esquerda	1,80	1,50				
				Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)	Global	Direita	2,26				1,30
						Esquerda	2,24				1,30
			Local/Entre Bermas		Direita	1,82	1,30				
				Esquerda	1,80	1,30					
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,89	1,10				
					Esquerda	1,91	1,10				
				Local/Entre Bermas	Direita	1,59	1,10				
					Esquerda	1,58	1,10				
80% de Rejeito + 20% de Estéril	Pilha de material único - Otimização da inclinação geral dos taludes (4,00°)	172m		Superfície Freática Normal (NBR 13029/2017)	Global	Direita	1,91	1,50	-16,96%	-13,35%	Global e Local/Entre Bermas
						Esquerda	1,89	1,50	-16,74%		
			Local/Entre Bermas		Direita	1,61	1,50	-11,54%			
					Esquerda	1,55	1,50	-13,89%			
			Superfície Freática Crítica (NBR 13029/2017)		Global	Direita	1,89	1,30	-16,37%		
						Esquerda	1,90	1,30	-15,18%		
				Local/Entre Bermas	Direita	1,61	1,30	-11,54%			
			Esquerda		1,54	1,30	-14,44%				
			Solicitação Sísmica (NBR 13028/2017)	Global	Direita	1,61	1,10	-14,81%			
					Esquerda	1,42	1,10	-25,65%			
				Local/Entre Bermas	Direita	1,46	1,10	-8,18%			
					Esquerda	1,66	1,10	5,06%			

Fonte: Autoria própria

Deste modo, observa-se que os ganhos proporcionados pela utilização tanto da cal, como material mais efetivo no aumento do FS da estrutura; quanto do estéril, como material com maior viabilidade econômica, são consideráveis não somente para aumento do FS da estrutura, mas inclusive de modo a proporcionar maiores capacidades volumétricas de disposição de rejeitos nas pilhas.

Por fim, é importante mencionar que as análises da otimização de ângulo geral dos taludes estiveram limitadas aos  $FS_{\text{mín}}$  apresentados no capítulo 3.5 desta dissertação.

As análises de estabilidade completas destes estudos são apresentadas no Apêndice.

## 6. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste estudo foi possível identificar que a utilização de aditivos em rejeitos de minério de ferro é muito importante para a viabilização da operação de pilhas de rejeitos filtrados e compactados (*dry stacking*).

Foi possível observar que a maioria dos aditivos utilizados, em pequenas proporções, não apresentaram aumentos expressivos na umidade ótima do material, no máximo um aumento de 0,92% (rejeito com 2% de cal), porém as características de compactação, resistência e permeabilidade das amostras sofrem grande variação.

Para as características de compactação, observou-se que todas as misturas apresentaram um peso específico seco máximo menor do que o do rejeito puro. Conseqüentemente, como houve pequena variação da umidade ótima, o peso específico úmido apresentou redução dos valores, o que neste caso, contribuiu para ganhos quanto aos Fatores de Segurança das análises de estabilidade.

Pôde-se observar também que dentre as misturas estudadas, a utilização de rejeito com 4% de bentonita não é recomendada por resultar em redução dos parâmetros de resistência do material. Já para as misturas do rejeito com 2% de cimento, com 2% de cal, com 6% de agregado siderúrgico e na proporção de 80% de rejeito com 20% de estéril, foram registrados ganhos de resistência, principalmente em relação à coesão efetiva.

Além disso, as misturas de rejeito com 6% de agregado siderúrgico e 80% de rejeito com 20% de estéril não apresentaram comportamento contrátil para os níveis de tensões de adensamento dos ensaios triaxial CIU<sub>SAT</sub>.

Quanto à utilização do cimento e da cal, o sucesso da aplicação prática da técnica se inicia no processo de mistura dos componentes, no qual deve-se obter uma boa homogeneização. Além disso, após a etapa de compactação deve-se garantir um processo de cura que minimize a perda de água da mistura, que é essencial para a hidratação dos componentes e endurecimento da mistura.

Já para a permeabilidade do material, pôde-se observar que as misturas de rejeito com 2% de cimento, rejeito com 2% de cal e rejeito com 6% de agregado siderúrgico apresentam aumento da permeabilidade quando comparados com o rejeito puro, o que indica melhores condições de drenagem. As demais amostras tiveram valores de permeabilidade mais baixos do que o rejeito puro.

Para as análises de estabilidade, observa-se que somente a mistura de rejeito com 4% de bentonita não apresentou aumento do FS. Além disso, devido às características granulares de alguns aditivos, foi possível observar que os parâmetros de resistência foram modificados, de modo que cunhas locais não se fizessem mais presentes nas análises de estabilidade. Fato este observado nas misturas de rejeito com 4% de bentonita, rejeito com 2% de cimento e rejeito com 2% de cal, principalmente pelo aumento considerável da coesão efetiva.

Dentre os modelos de disposição de rejeitos estudados, o que apresentou maior segurança geotécnica foram as pilhas com o empilhamento de todo o rejeito misturado. Dentre as misturas estudadas, a que apresentou maiores ganhos de FS foi o rejeito com 2% de cal, possibilitando inclusive a otimização de ângulos de face geral dos taludes, aumento da altura da pilha e consequentemente aumento da capacidade de volumétrica da estrutura.

Deste modo, pode-se perceber que do ponto de vista da segurança geotécnica da estrutura, a utilização de rejeito com 2% de cal apresenta as maiores vantagens, porém a operacionalização da atividade de mistura pode proporcionar aumento dos custos pela necessidade de aquisição da cal e homogeneização da mistura. Deste modo, a utilização de 80% de rejeito com 20% de estéril (co-disposição) torna-se vantajosa por indicar menores custos do que se comparado com a cal.

Por fim, com a finalização deste estudo, identificam-se oportunidades de continuidade dos estudos para aprimoramento do entendimento do comportamento dos rejeitos aditivados quando dispostos em pilhas compactadas. Sendo assim, seguem sugestões de novas pesquisas a serem desenvolvidas:

- Realizar ensaios triaxiais CIU e PN em maiores níveis de tensão de adensamento para que seja caracterizada a condição de comportamento dilatante/contrátil dos rejeitos e misturas;
- Avaliar a condição de campo quanto à saturação dos rejeitos e misturas, de modo que sejam avaliadas a real geração de poropressão do empilhamento. Este item tem grande importância para que a estrutura de empilhamento, não seja caracterizada como empilhamento drenado (Resolução nº 95/2022 da ANM) e, deste modo, esteja enquadrado na Política Nacional de Barragens;

- Desenvolver análises de estabilidade de equilíbrio-limite 3D para os modelos construtivos propostos;
- Desenvolver ensaios dos rejeitos e das misturas de adensamento odométrico, triaxiais CID, dentre outros, de modo que sejam desenvolvidas análises de estabilidade tensão-deformação dos modelos construtivos;
- Executar aterro experimental do rejeito e misturas para realização de ensaios. Em especial o CPTU;
- Realização de análises de estabilidade pseudoestática com a utilização dos critérios especificados pela *Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation - CSIRO*, no documento *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design* e o fator de redução dos parâmetros de resistência definidos por Duncan *et al.* (2014), além da avaliação das condições locais de ocorrência das atividades sísmicas, para avaliação comparativa do método definido pela Eletrobrás (2003);
- Avaliar a efetividade da redução do percentual de umidade da mistura em relação à umidade natural dos materiais. Neste caso é importante a comparação em relação às umidades ótimas das misturas estudadas;
- Realizar estudos com demais aditivos ou resíduos, como por exemplo, diferentes tipos e granulometrias de escória;
- Realizar estudo com misturas de mais de um aditivo;
- Realizar avaliação da operacionalidade da disposição de rejeitos de acordo com os modelos construtivos propostos;
- Realizar análises microscópicas, mineralógicas e químicas completas dos rejeitos e dos materiais utilizados no estudo; e
- Realizar avaliação econômica dos materiais aditivos e dos modelos construtivos propostos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. Slope Stability and Stabilization Methods. 2nd ed. 330-378 p. John Wiley & Sons. USA – New York, 2001.

ABDILA, S.R.; ABDULLAH, M.M.A.B.; AHMAD, R.; BURDUHOS NERGIS, D.D.; RAHIM, S.Z.A.; OMAR, M.F.; SANDU, A.V.; VIZUREANU, P. Syafwandi Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review. vol. 15, 375. Materials, 2022.

AGUILERA, C. E. T. Aplicação de métodos de análise de estabilidade de taludes de grande altura em mineração. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC - Rio, Rio de Janeiro – RJ, 2010.

AIREY, D.W. Triaxial testing of zly cemented carbonate soil. vol. 119, 1379–1398 p. J. Geotech. Eng. 1993.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG, 2004.

ALVES, H. O. Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4767 – 11: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. Pennsylvania, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5084 – 16a Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. Pennsylvania, 2016.

ANDAVAN S.; PAGADALA V. K. A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime. vol. 22, part. 3, 1125-1129 p. Materials Today: Proceedings, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro – RJ, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro – RJ, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro – RJ, 2016c, Versão corrigida 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio Janeiro – RJ, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro – RJ, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro – RJ, 2016f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro – RJ, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Mineração - Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água. Rio de Janeiro – RJ, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029 Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro – RJ, 2017b.

ARAÚJO, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2006.

BABA, K.; BAHI, L.; OUADIF, L.; AKHSSAS, A. Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods applied to a railway in the moroccan rif. vol. 2. 27-32 p. Open Journal of Civil Engineering, 2012.

BARATI, S.; TABATABAIE SHOURIJEH, P.; SAMANI, N.; ASADI S. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on Golgohar mine. vol. 79, 4151–4166 p. Bull Eng Geol Environ, 2020.

BARBOSA, C. V. Análise de estabilidade tridimensional e bidimensional em uma pilha de rejeito filtrado de grandes dimensões. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG, 2022.

BASHA, E. A. HASHIM, R. MUNTOHAR, S. Stabilization of clay and residual soils using cement – rice husk ash mixtures. vol. 5. 51-66 p. Jurnal Teknik Sipil., 2004.

BELL, F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. vol. 42, 223–237 p. Eng. Geol., 1996.

BORJA, R. N.; BAREITHER, C. A. Shear Behavior of Waste Rock and Filtered Tailings Mixtures. vol. 318. 872-880 p. Geo-Congress, 2020.

BRASIL. Lei 12334: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Brasília – DF, 2010.

BRASIL. Lei 14266: Altera dispositivos da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília – DF, 2020.

BRASIL. Resolução nº 13: Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências, de 08 de agosto de 2019. Brasília – DF, 2019.

BRASIL. Resolução nº 95: Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, de 02 de fevereiro de 2022. Brasília – DF, 2022.

BRASIL. Boletim do Setor Mineral de 2020. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SMM. Brasília – DF, 2020a.

BRASIL, Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas 2020. Agência Nacional da Mineração – ANM. Brasília – DF, 2020b.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. vol. 8. nº 32, 77-85 p. 2016.

- CARNEIRO, J. J. V. Characterization and behaviour of iron ore tailings: the effect of compaction and stresses. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG. 2021.
- CARVALHO, W. D. S. Sistema de Disposição Compartilhada de Estéreis e Rejeitos Desaguados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG, 2017.
- CHALERMYANONT T.; ARRYKUL S. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. vol. 27(2) 313–323 p. Songklanakarin J Sci Technol, 2005.
- COOP, M.R.; WILLSON, S.M. Behavior of hydrocarbon reservoir sands and sandstones. vol. 129, 1010–1019 p. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2003.
- CONSOLI, N.C.; CRUZ, R.C.; DA FONSECA, A.V.; COOP, M.R. Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand. vol. 138, 100–109 p. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2012.
- CONSOLI, N.C.; VOGT, J.C.; SILVA, J.P.S.; CHAVES, H.M. SCHEUERMANN FILHO, H.C.; MOREIRA, E.B.; LOTERO, A. Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings – Portland Cement Blends: New Brazilian Trend for Tailings Disposal by Stacking. vol. 12. 836 p. Appl. Sci., 2022.
- CRYSTAL, C.; HORE, C.; EZAMA, I. Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience, in Proceedings Tailings and Mine Waste, 2018.
- CSIRO, Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. ed. Mark Hawley e John Cunning. 1ª ed. 2017.
- DAVIES, M. P. An Alternative to Conventional Tailing Management – Dry Stack Filtered Tailings. Proceedings Tailings and Mine Waste 01. Balkema, 2004.
- DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. Vancouver. BC: Proceedings Tailings and Mine Waste, 2011.
- DE MAGISTRIS F.S.; SILVESTRI F; VINALE F. Physical and mechanical properties of a compacted silty sand with low bentonite fraction. vol. 35(6). 909–925 p. Can Geotech J, 1998.



DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; PECCIN, A.; CONSOLI, N.C.; FESTUGATO, L. Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength. vol. 143, J. Geotech. Geoenvironmental Eng., 2017.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT S. G.; BRANDON T. L. Soil Strength and Slope Stability. 2ª ed. 2014.

ELETROBRÁS. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. CBDB, CIGB ICOLD. 2003.

FIROOZFAR A.; KHOSROSHIRI N. Kerman clay improvement by lime and bentonite to be used as materials of landfill liner. vol 35(2). 559–571 p. Geotech Geol Eng, 2017.

GOMES, M.F.M. Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG, 2009.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. vol. 5. n° 4. 339-344 p. Journal of Materials Research and Technology, 2016.

GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2011.

HEAD, K. H. Manual of soil laboratory testing. New York, John Wiley & Sons, v. 3, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Guia de Boas Práticas – Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeito. 1ª ed. 144 p. Brasília – DF, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. 1ª ed. 128 p. Brasília – DF, 2016.

ISLAM, K.; MURAKAMI, S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. Glob. Environ. 70 p. Chang, 2021.

JESUS, C. A. G.; JOAQUIM, L. G. Sumário Mineral Brasileiro 2018. Agência Nacional da Mineração – ANM. Brasília – DF, 2018.

JÚNIOR, G. M. Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica. Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro – RJ, 2006.

KHALID N.; MUKRI, M.; ARSHAD M. F.; SIDEK, N.; KAMARUDIN, F. Effect on Salak Tinggi residual soil mixed Bentonite as compacted clay liner. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 10th Asia Pacific Structural Engineering and Construction Conference 2018. vol. 513. Langkawi, Malaysia, 2019.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S.; MACKLIN, M.; HUDSON-EDWARDS, K. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. vol. 51. 229–245 p. Appl. Geochem., 2014.

KRAMER, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall. 673 p. Upper Saddle River – New Jersey, 1996.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics, SI version. John Wiley & Sons. New York, 1979.

LARA, J.L.; PORNILLOS, E.U.; MUÑOZ, H.E. Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits – state-of-the-art, Paste: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. 249-260 p. Perth, 2013.

LEAL, F. C. A.; GOMES, W. V.; SILVA, P. J. L.; GONÇALVES, P. H. F.; NETO, O. F.; JÚNIOR, O. F. S. Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro. Revista de Geociências do Nordeste. vol. 8. n° 1. Caicó – RN, 2022.

LEDUC, M.; SMITH, M.E. Tailings co-disposal – Innovations for cost savings and liability reduction. 15 p. The Latin America Mining Record, 2003.

LI, W.; COOP, M.; Senetakis, K.; SCHNAID, F. The mechanics of a silt-sized gold tailing. vol. 241. 97-108 p. Eng. Geol., 2018.

LOZANO, F. A. E. Seleção de Locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de São Paulo – USP. São Paulo – SP, 2006.

LUPO, J.; HALL, J. Dry Stack Tailings – Design Considerations. Proceedings Fourteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, USA – Colorado, 2010.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA, S. L.M. Tratamento de Minérios. 5ª ed. CETEM/MCT. 932 p. Rio de Janeiro – RJ, 2010.

- LUZ, A. B., LINS, F. A. Introdução – Tratamento de Minérios. 6ª ed. CETEM/MCTIC. 1-23 p. Rio de Janeiro – RJ, 2018.
- LYU, Z.; CHAI, J.; XU, Z.; QIN, Y.; CAO, J. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Adv. Civ. Eng.* 2019.
- MAFRA, J. M. Q. Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. Belo Horizonte – MG, 2016.
- MARANGON, M. Previsão do Comportamento de Fundações. Geotecnia de Fundações. Universidade Federal de Juíz de Fora – UFJF. Juiz de Fora – MG, 2009.
- MARQUES, A.; OLIVEIRA, S.; PAES, B.; PAES, I.; COELHO, A. Evaluation of the Liquefaction Susceptibility of Filtered Iron Ore Tailings from the Iron Quadrangle (Brazil). in H Quelopana (ed.), *Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, Gecamin Publications. Santiago, 2020.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Apostila de estabilização de solos. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2004.
- MILONAS, J. G. Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UNB. Brasília – DF, 2006.
- MINAS GERAIS. Lei 23291: Institui a política estadual de segurança de barragens. Belo Horizonte – MG, 2019.
- MINAS GERAIS. Resolução Conjunta SEMAD/FEAM Nº 2789. Belo Horizonte – MG, 2019.
- MOH, Z.C.; GOECKER W.L.; CHU, T.Y.; DAVIDSON, D.T. Evaluation of lime and fly ash stabilization of soils by compressive strength tests. vol. 4, 1997.
- MOUSAVI, S. E., KARAMVAND, A. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. 142 p. *Journal of Traffic and Transportation Engineering, JTTE*, 2017.
- NARASIMHA RAO, S.; RAJASEKARAN, G. Reaction products formed in lime-stabilized marine Clays. vol. 122. *J. Geotech. Eng.*, 1996.

- NEGI, A. S.; FAIZAN M.; SIDDHARTH, D. P. Soil stabilization using lime. vol. 2, 1999.
- PEIXOTO, C. L. P. Proposta de Nova Metodologia de Desaguamento de Rejeitos em Polpa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG, 2012.
- PIMENTA, J. The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass. *Proceedins Tailings and Mine Waste*. Vancouver – BC, 2011.
- PINTO, C. S. Curso básico de Mecânico dos Solos, com exercícios resolvidos. Editora Oficina do Texto. 3ª ed. São Paulo – SP, 2006.
- PORTES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos me Minério de ferro nas consistências polpa e torta. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG, 2013.
- RAJASEKARAN, G.; NARASIMHA RAO, S. Compressibility behaviour of lime-treated marine clay. vol. 29, 545–559 p. *Ocean Eng.*, 2002.
- RIBEIRO, A. I. A avaliação de impactos ambientais e as barragens de rejeitos. Universidade Estadual Paulista. São Paulo – SP, 2019. Disponível em: <<https://www2.unesp.br/portal#!/noticia/34275/a-avaliacao-deimpactos-ambientais-e-as-barragens-de-rejeitos>>. Acesso em: 26 de junho de 2022.
- RIOS, S.; DA FONSECA, A.V.; CONSOLI, N.C.; FLOSS, M.; CRISTELO, N. Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio. vol. 3, 130–136p. *Géotechnique Lett*, 2013.
- SANTOS, M. N. Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2012.
- SILVA, E. M. Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG, 2006.
- SILVA, R. K. A. Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG, 2014.

SKEMPTON, A.W. The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*. vol. 4, 143-147 p. London, 1954.

SOARES, E. P. Análise de Estabilidade de um talude da Mina de Águas Clara – MBR: Uma visão probabilística. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG, 1996.

ULRICH, B. Practical thoughts regarding filtered tailings. Australian Centre for Geomechanics. Perth, 2019.

UNIVERSIDADE DE WASHINGTON. The Soil Liquefaction. Conteúdo disponível em: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>, acessado em 28 de julho de 2022.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Introdução ao tratamento de minérios. Editora UFMG. 234 p. Belo Horizonte – MG, 2007.

VIANA DA FONSECA, A.; CORDEIRO, D.; MOLINA-GÓMEZ, F. Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. vol. 1, 95–127 p. *Geotechnics*, 2021.

VILLAVICENCIO, G.; BREUL, P.; BACCONNET, C.; FOURIE, A.; ESPINACE, R. Liquefaction potential of sand tailings dams evaluated using probabilistic interpretation of estimated in-situ relative density. vol. 15, 9–18 p. *Rev. De La Construcción*, 2016.

VILLIBOR, D. F. Estabilização Granulométrica ou Mecânica. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP, 1982.

VIEIRA, B. C.; VIEIRA A. C. F.; AMARAL, C. P. & FERNANDES, N. F. Estudo comparativo dos movimentos de massa ocorridos em fevereiro de 1996 nas Bacias do Quitite e do Papagaio (RJ): Uma abordagem Geomorfológica. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 2º Simpósio Pan-Americano de Escorregamentos de Terra, ABMS/ABGE/ISSME, vol. 1, 165-174 p., Rio de Janeiro – RJ, 1997.

VIZCARRA, G.C., Numerical modelling of dry stacking tailings heaps Paste: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Australian Centre for Geomechanics. 231-238 p. Perth, 2021.

ULRICH, B. E.; GORMAN, J. Subaerial tailings deposition – Design, construction and operation for facility closure and reclamation. Tailings and Mine Waste'00. Anais.Balkema, Rotterdam. 29-37 p., 2000.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. New Report Urges Global Action on Mining Pollution. UNEP. 2017. Conteúdo disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/new-report-urges-global-action-mining-pollution>, acessado em 02 de novembro de 2022.

WANG, D.; ZENTAR, R.; ABRIAK, N.E. Durability and swelling of solidified/stabilized dredged marine soils with class F fly ash, cement and lime. vol. 30. J. Mater. Civ. Eng., 2018.

WANG, D.; ZENTAR, R.; ABRIAK, N.E.; DI, S.J. Long-term mechanical performance of marine sediments solidified with cement, lime and fly ash. vol. 36, 123–130 p. Mar. Georesourcesgeotechnol., 2018.

WANG, Y.; GUO, P.; LI, X.; LIN, H.; LIU, Y.; YUAN, H. Behavior of Fiber-Reinforced and Lime-Stabilized Clayey Soil in Triaxial Tests. vol. 9, 900. Appl. Sci., 2019.

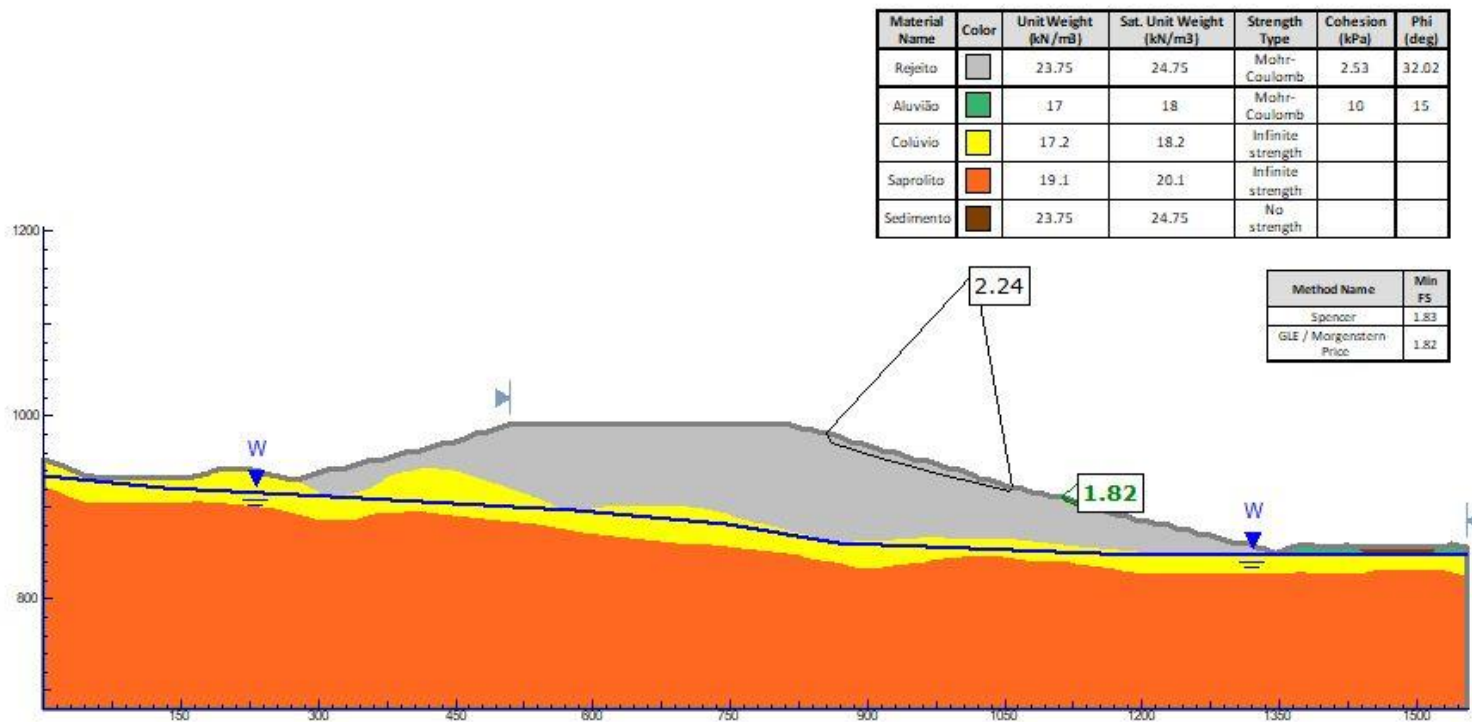
WORLD MINE TAILINGS FAILURES. State of World Mine Tailings Portfolio. WMTF. 2020. Conteúdo disponível em: <https://worldminetailingsfailures.org/>, acessado em 02 de novembro de 2022.

## APÊNDICE

### ANÁLISES DE ESTABILIDADE

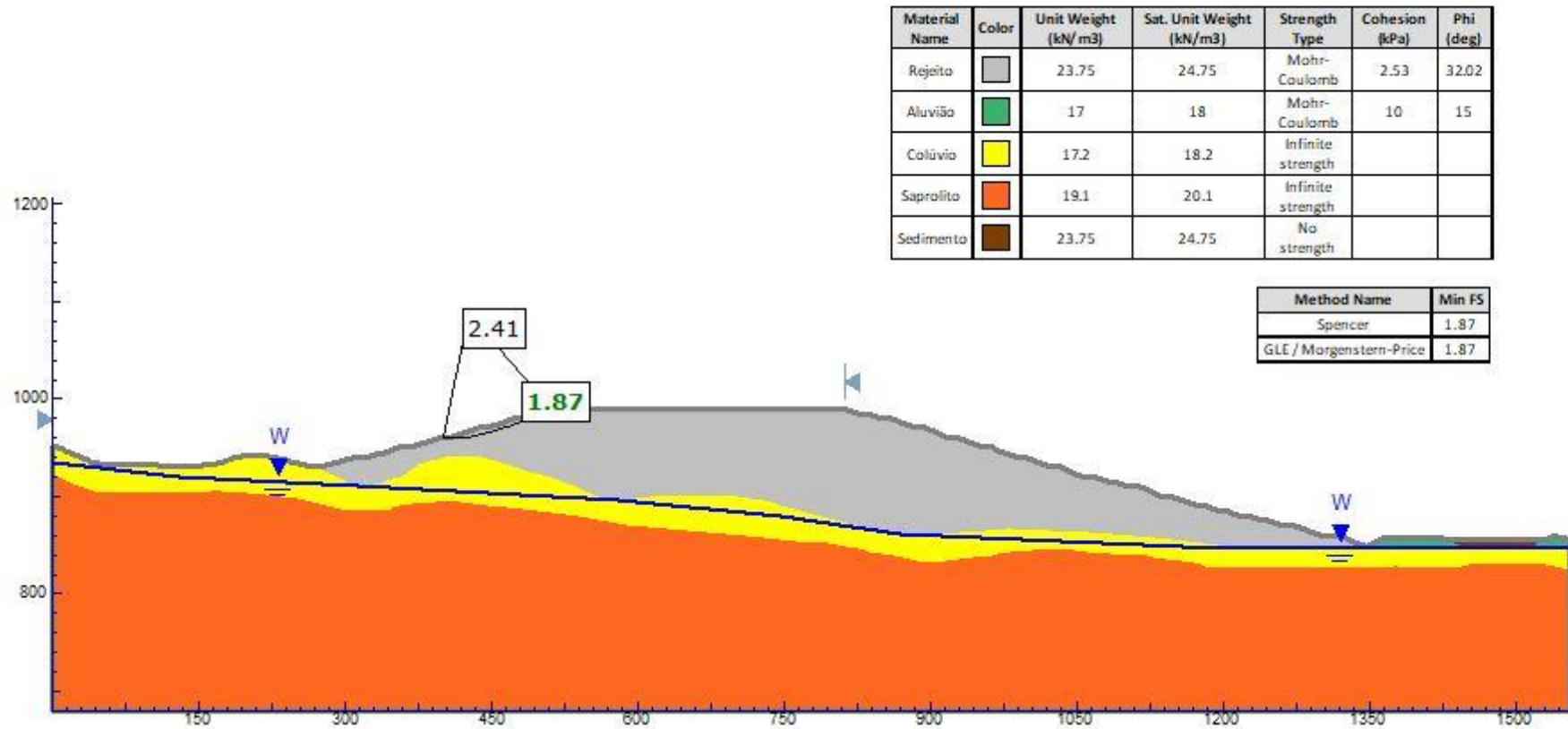
#### REJEITO PURO – PILHA DE 142 m E PILHA DE 172 m

Figura 156 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática normal – Talude direito



Fonte: Autoria própria

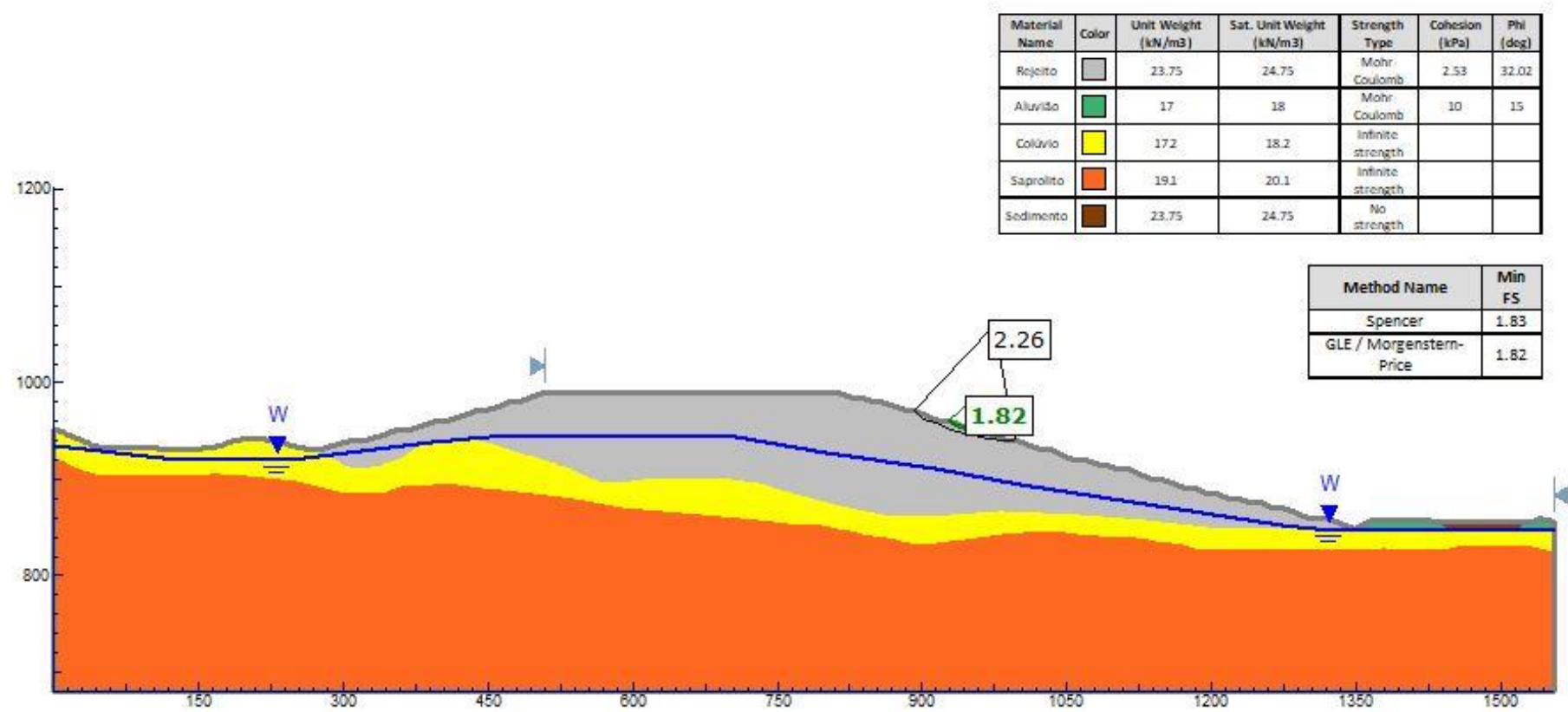
Figura 157 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática normal – Talude esquerdo



Fonte: Autoria Própria

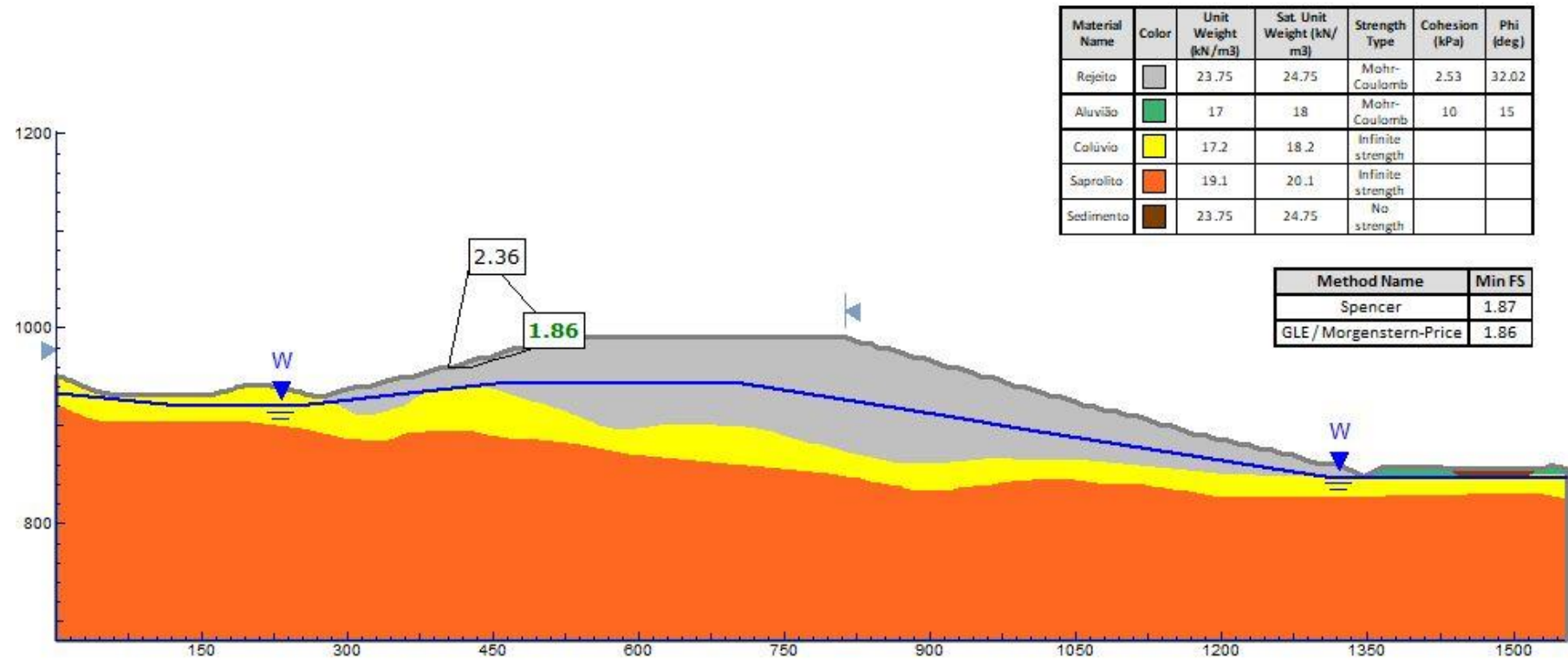


Figura 158 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática crítica – Talude direito



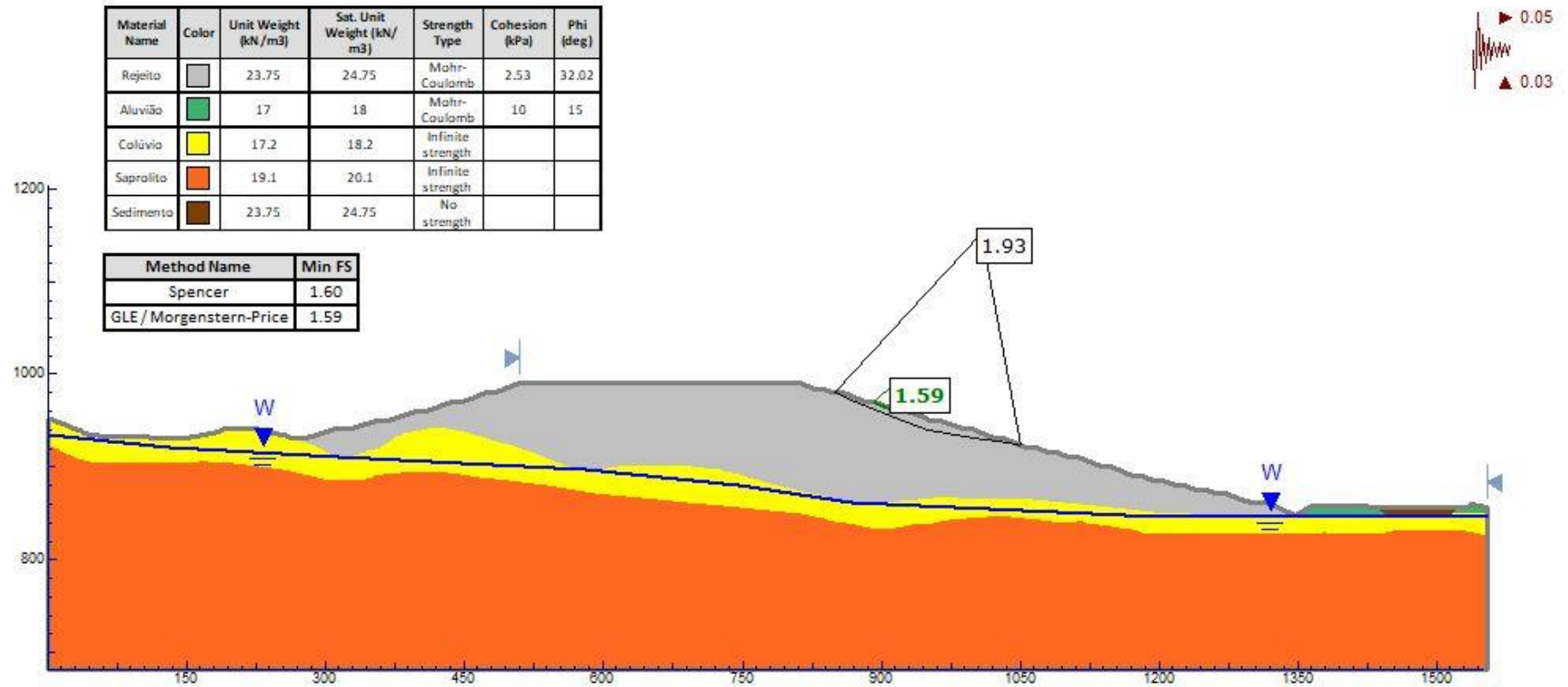
Fonte: Autoria própria

Figura 159 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



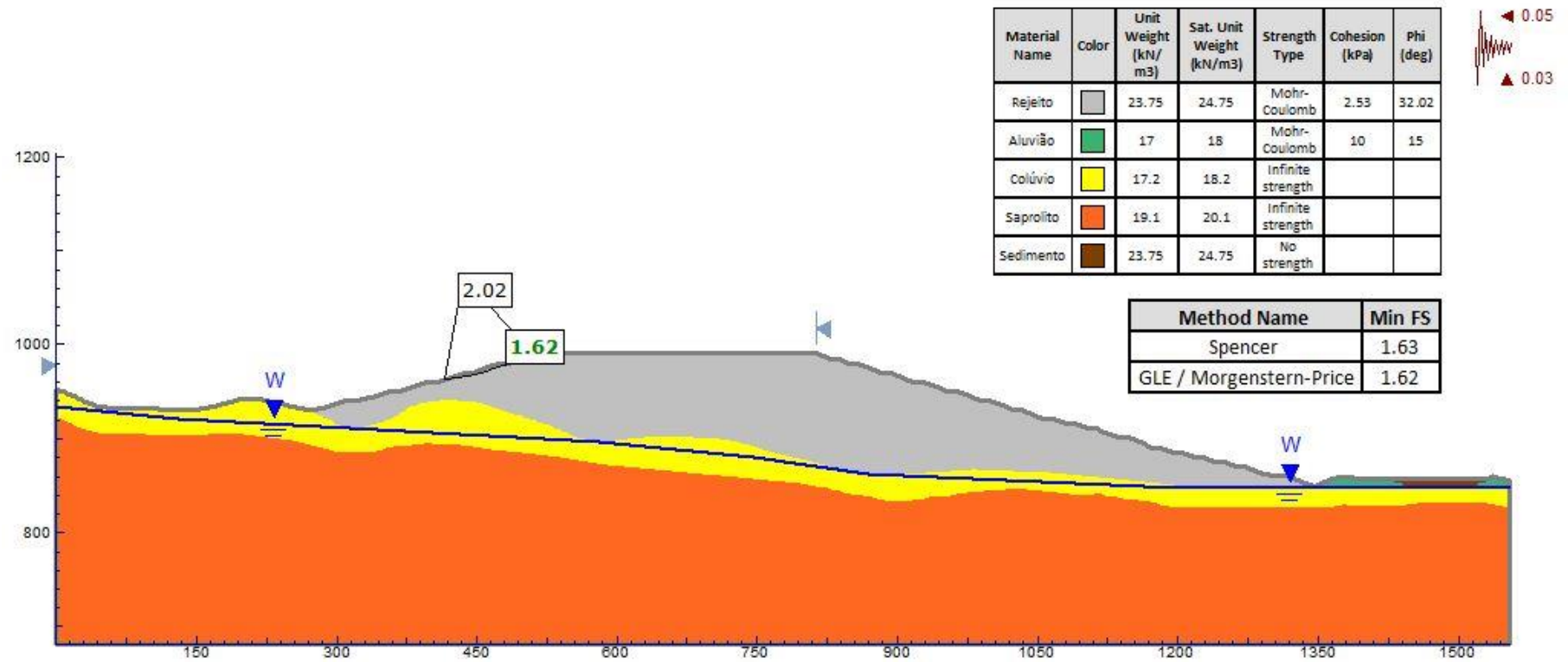
Fonte: Autoria própria

Figura 160 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Pseudoestática – Talude direito



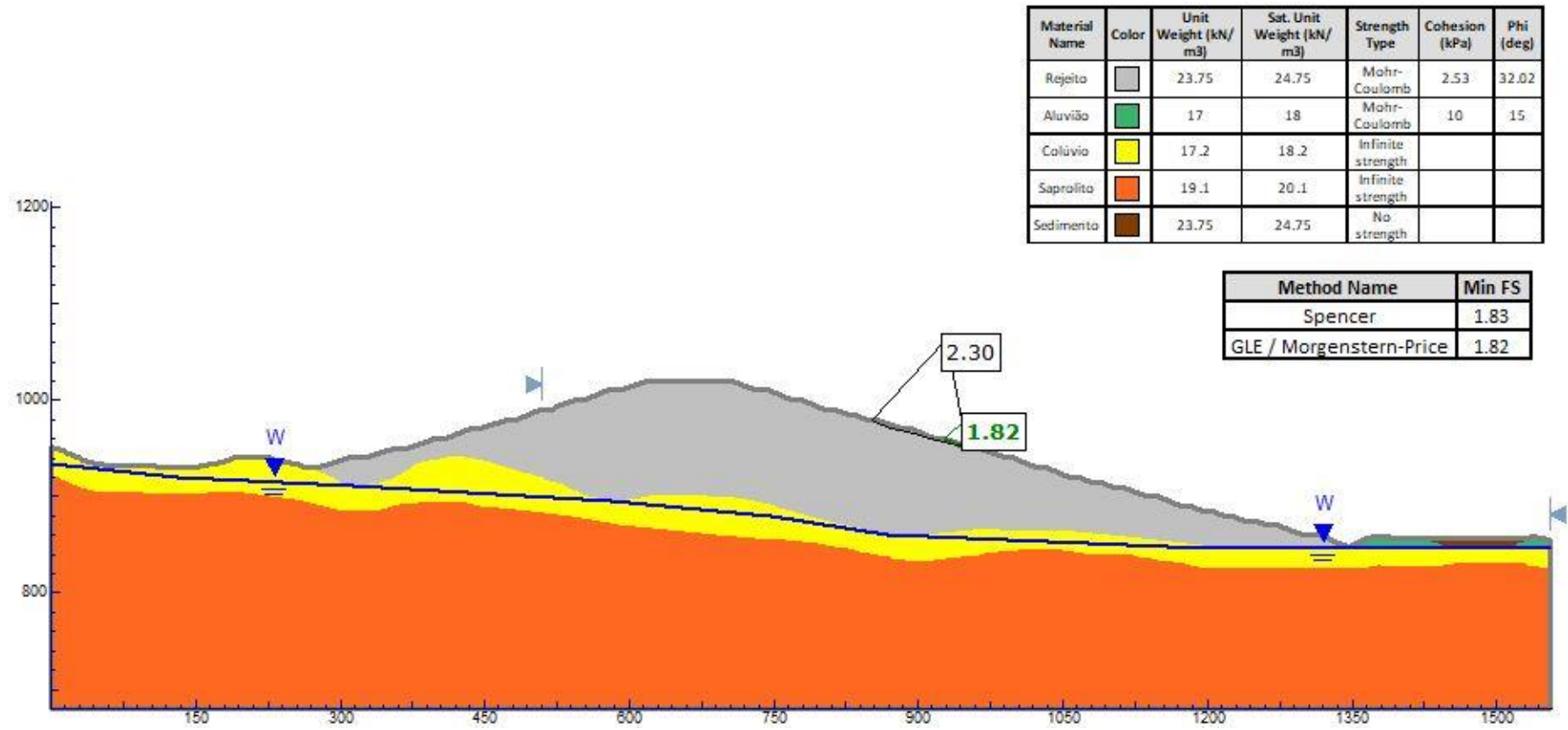
Fonte: Autoria própria

Figura 161 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 142 m – Pseudoestática – Talude esquerdo



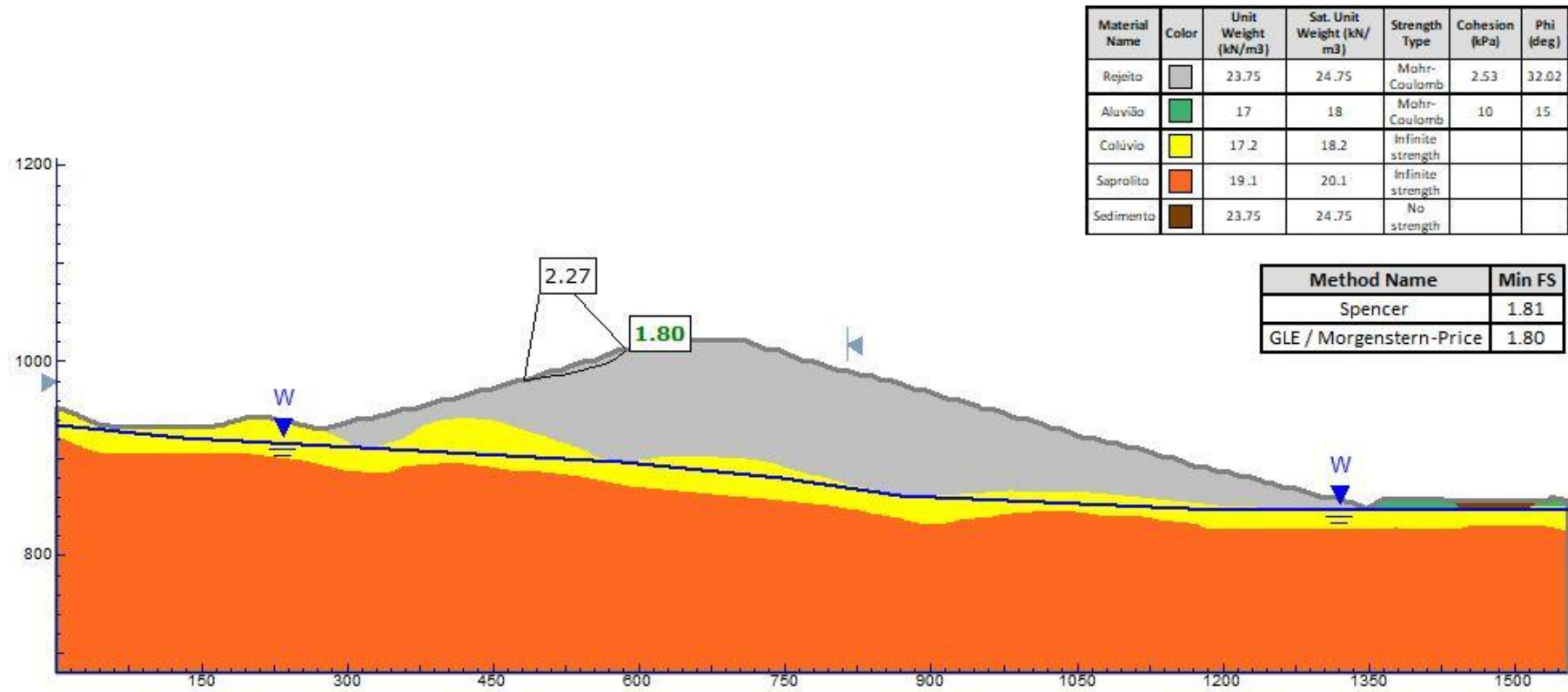
Fonte: Autoria própria

Figura 162 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática normal – Talude direito



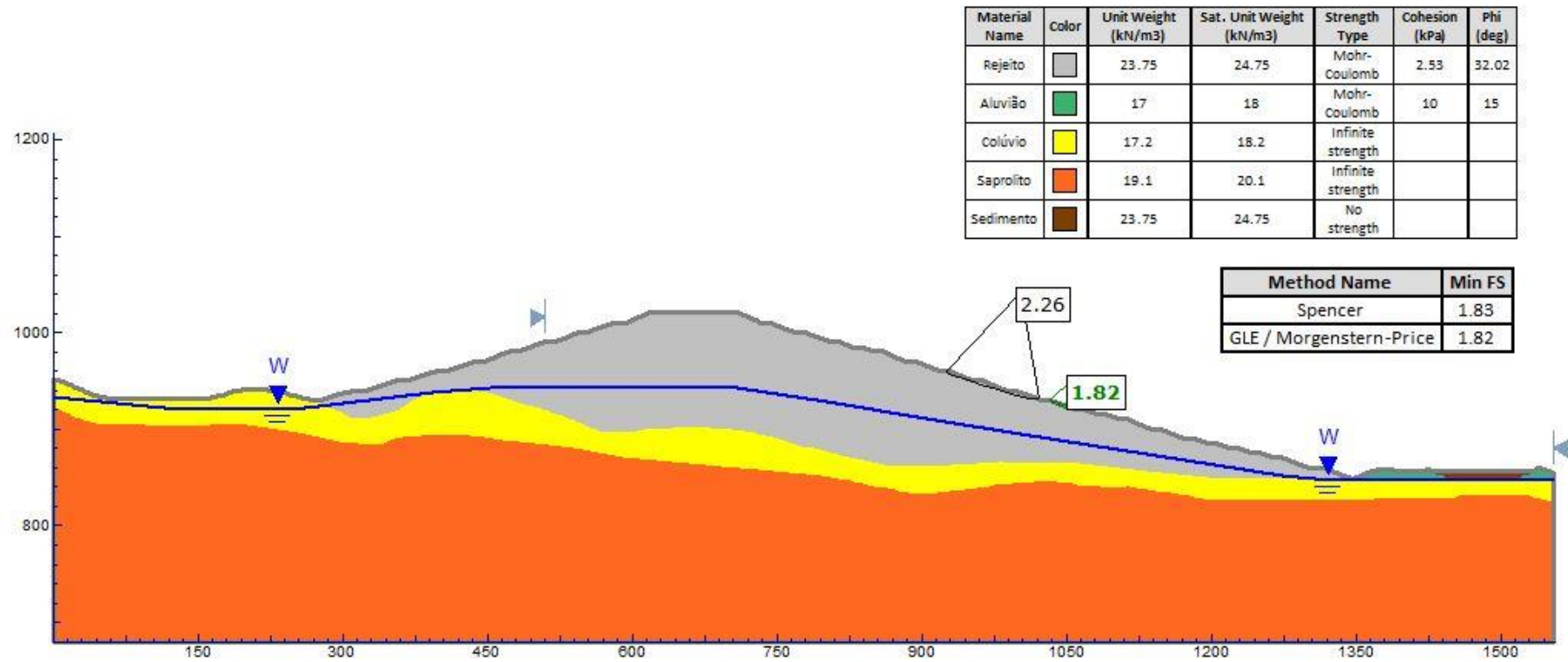
Fonte: Autoria própria

Figura 163 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática normal – Talude esquerdo



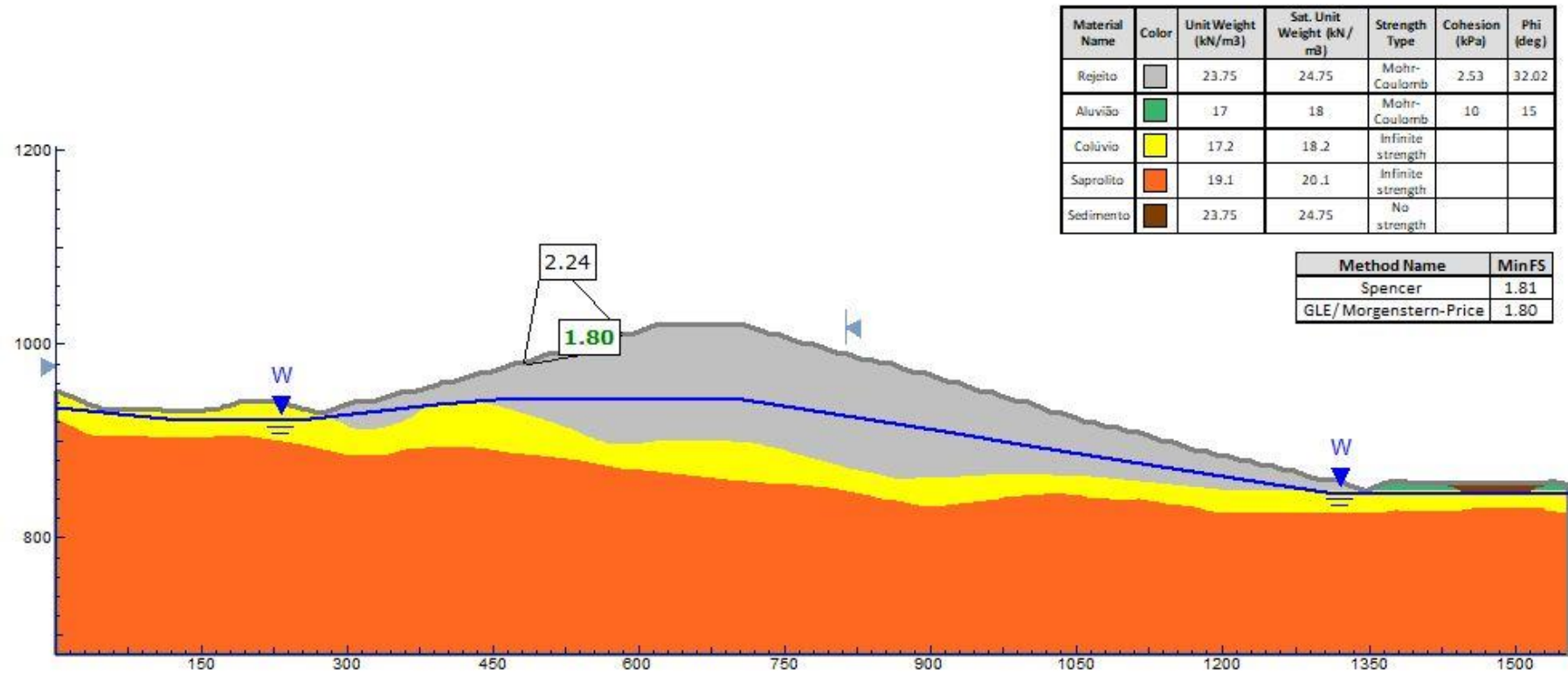
Fonte: Autoria própria

Figura 164 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática crítica – Talude direito



Fonte: Autoria própria

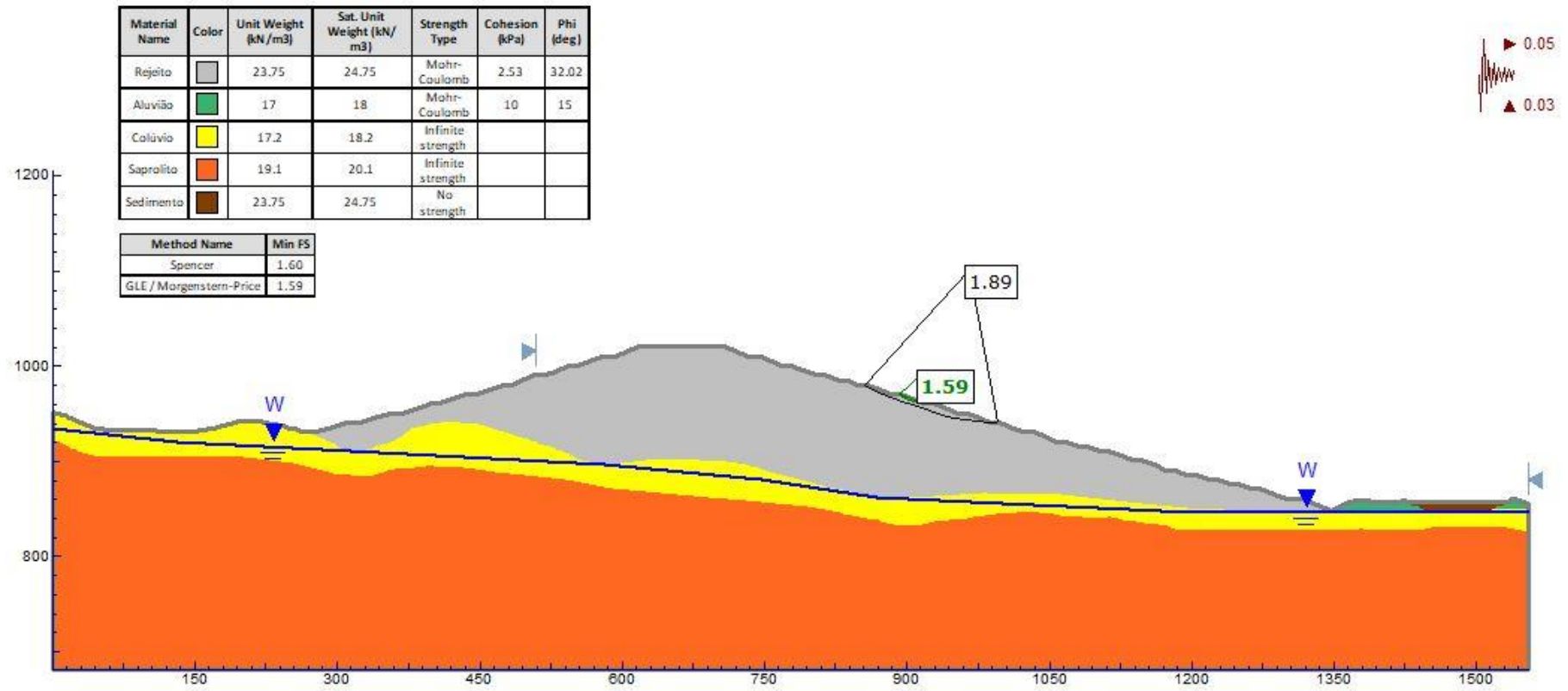
Figura 165 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

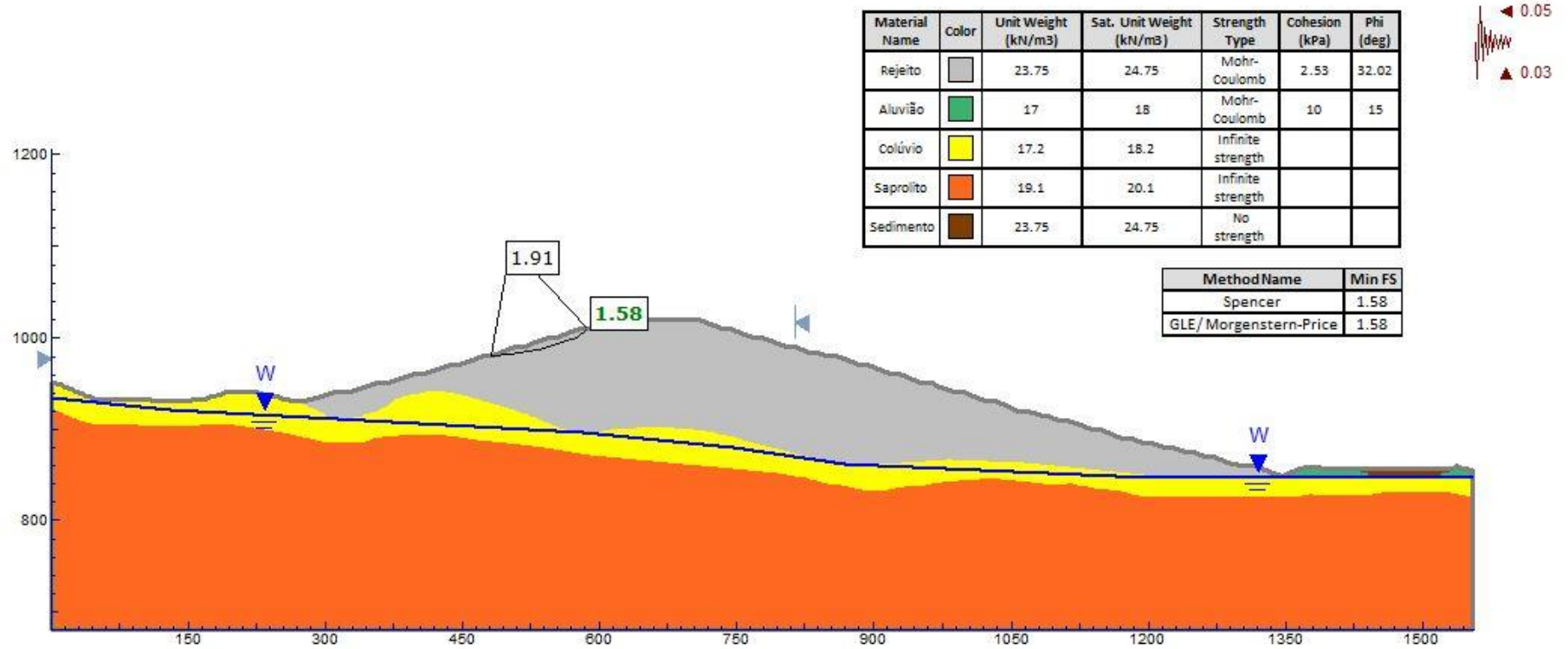


Figura 166 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

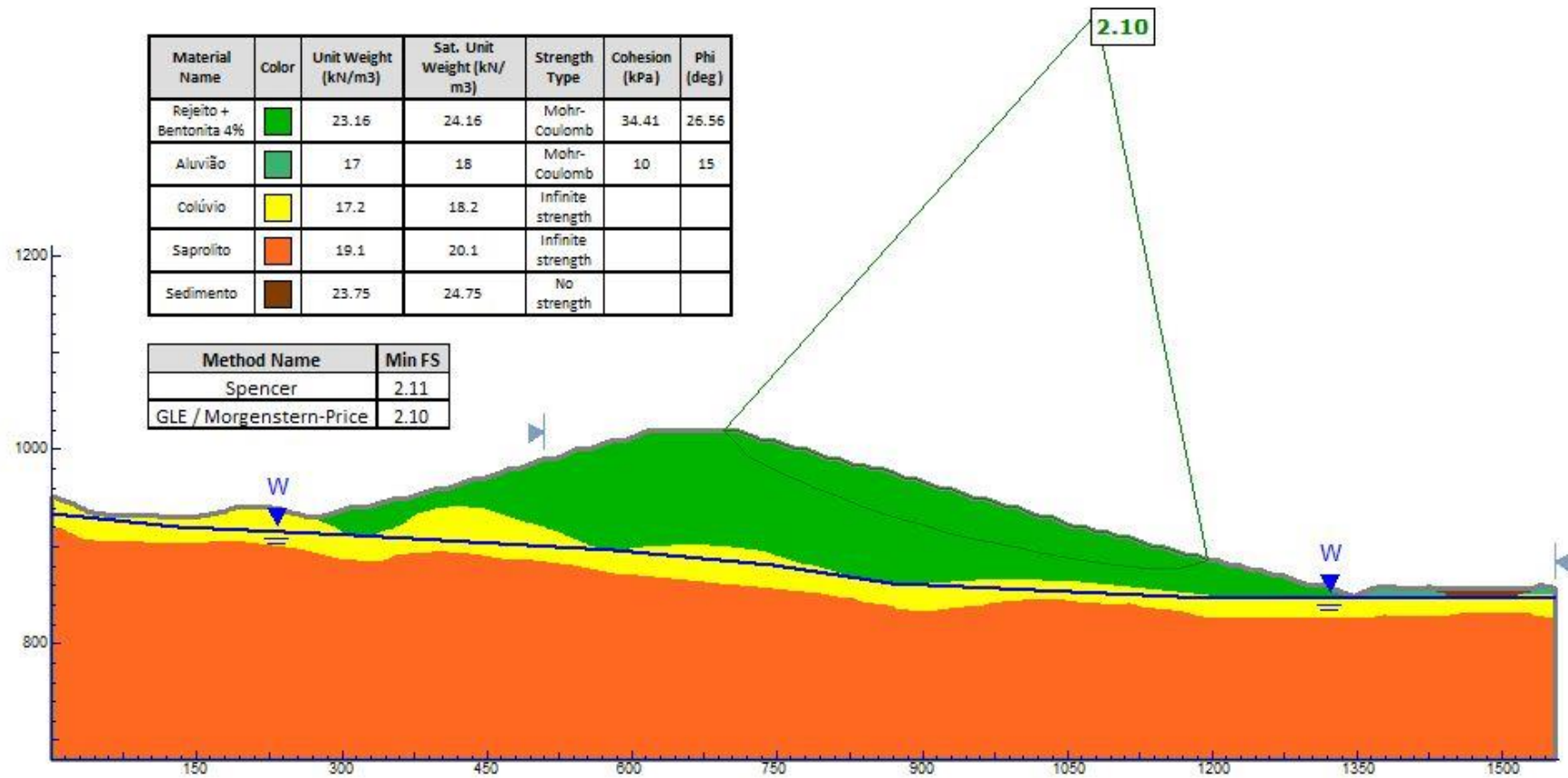
Figura 167 – Análise de estabilidade – Rejeito puro – Pilha de 172 m – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

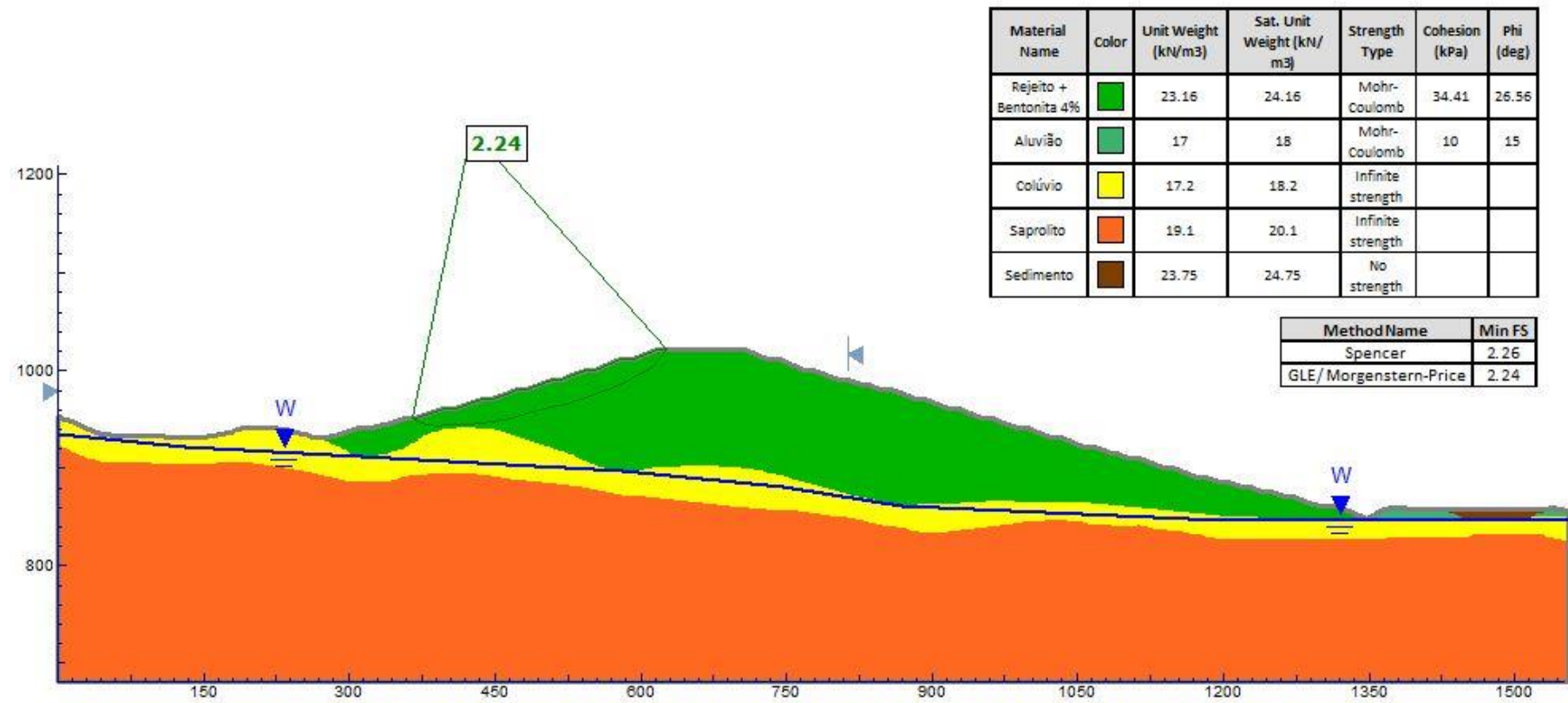
### REJEITO + 4% DE BENTONITA

Figura 168 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



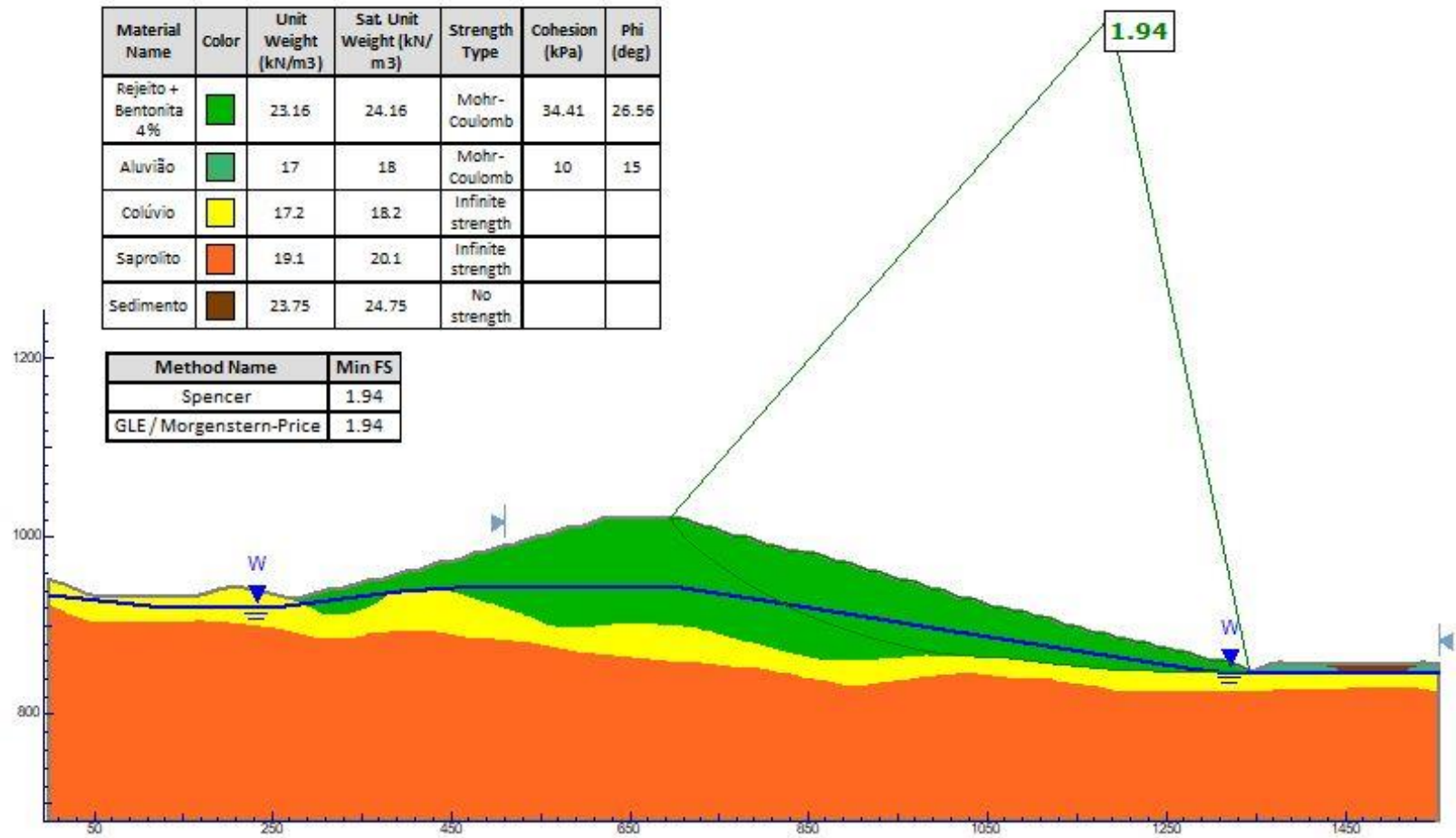
Fonte: Autoria própria

Figura 169 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



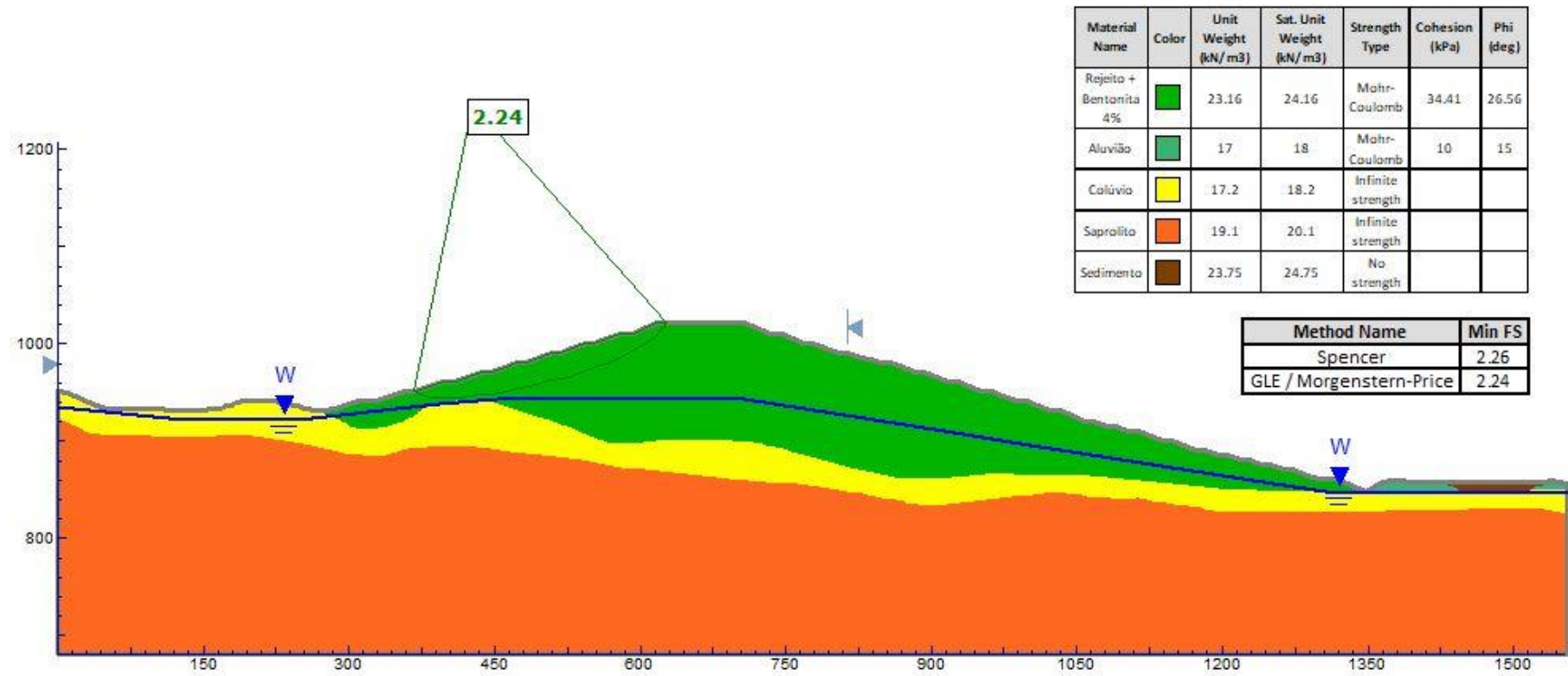
Fonte: Autoria própria

Figura 170 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



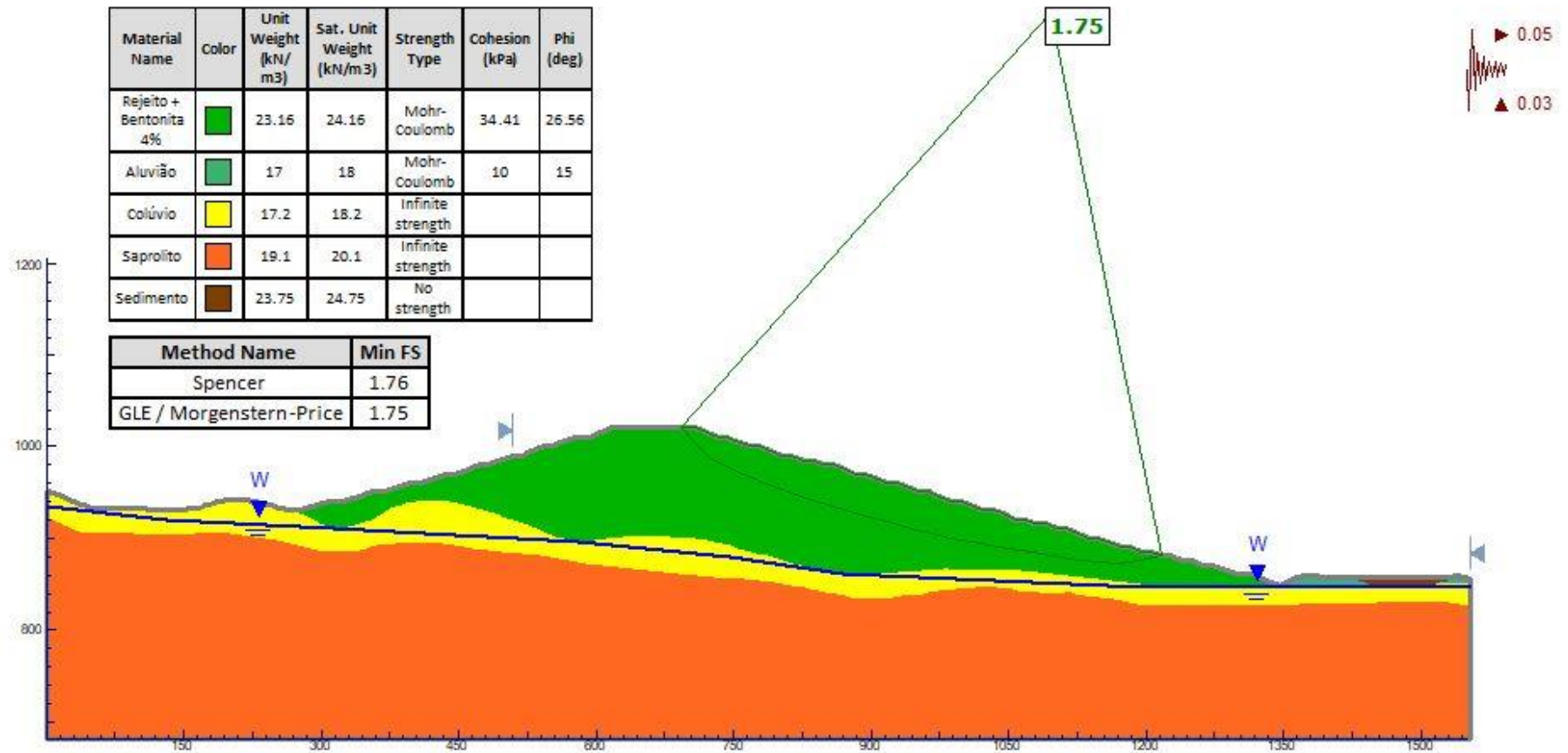
Fonte: Autoria própria

Figura 171 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



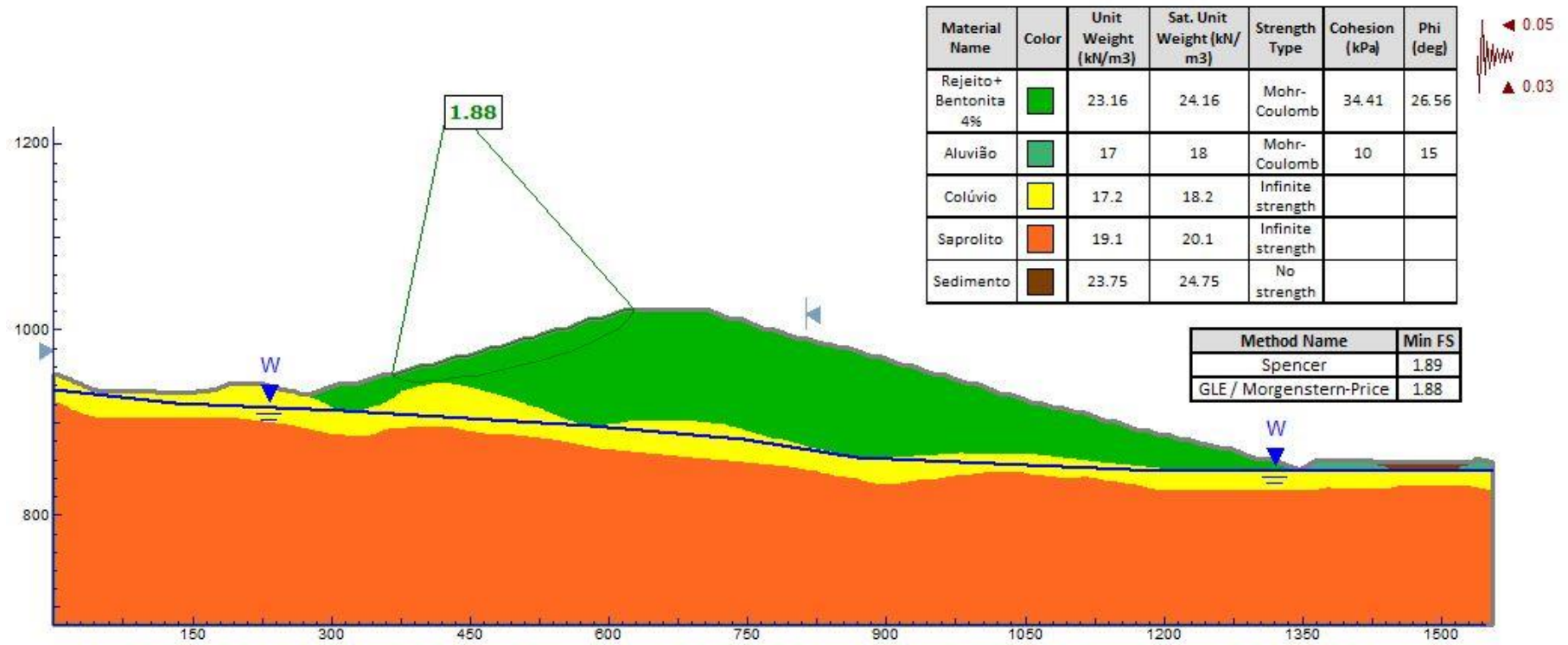
Fonte: Autoria própria

Figura 172 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

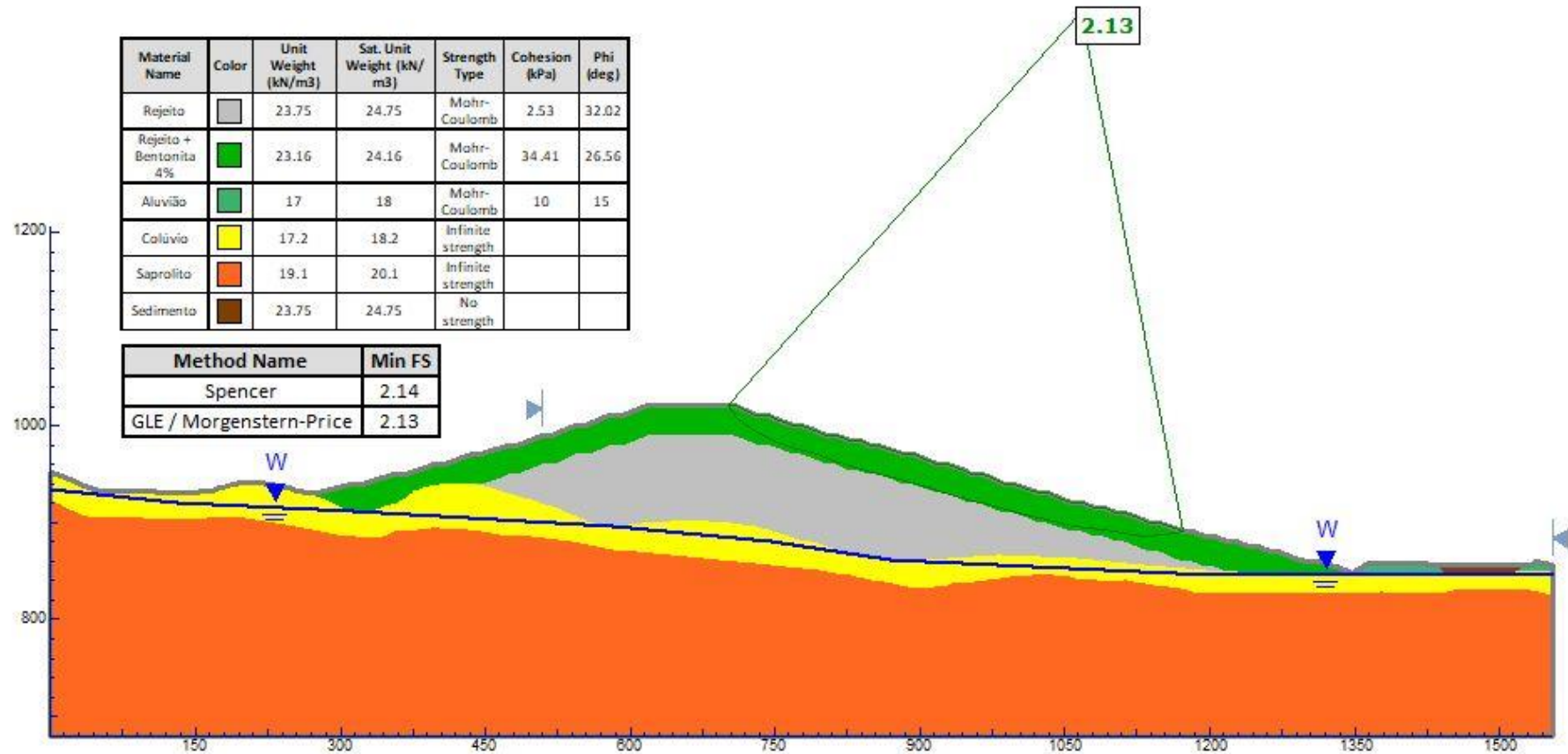
Figura 173 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

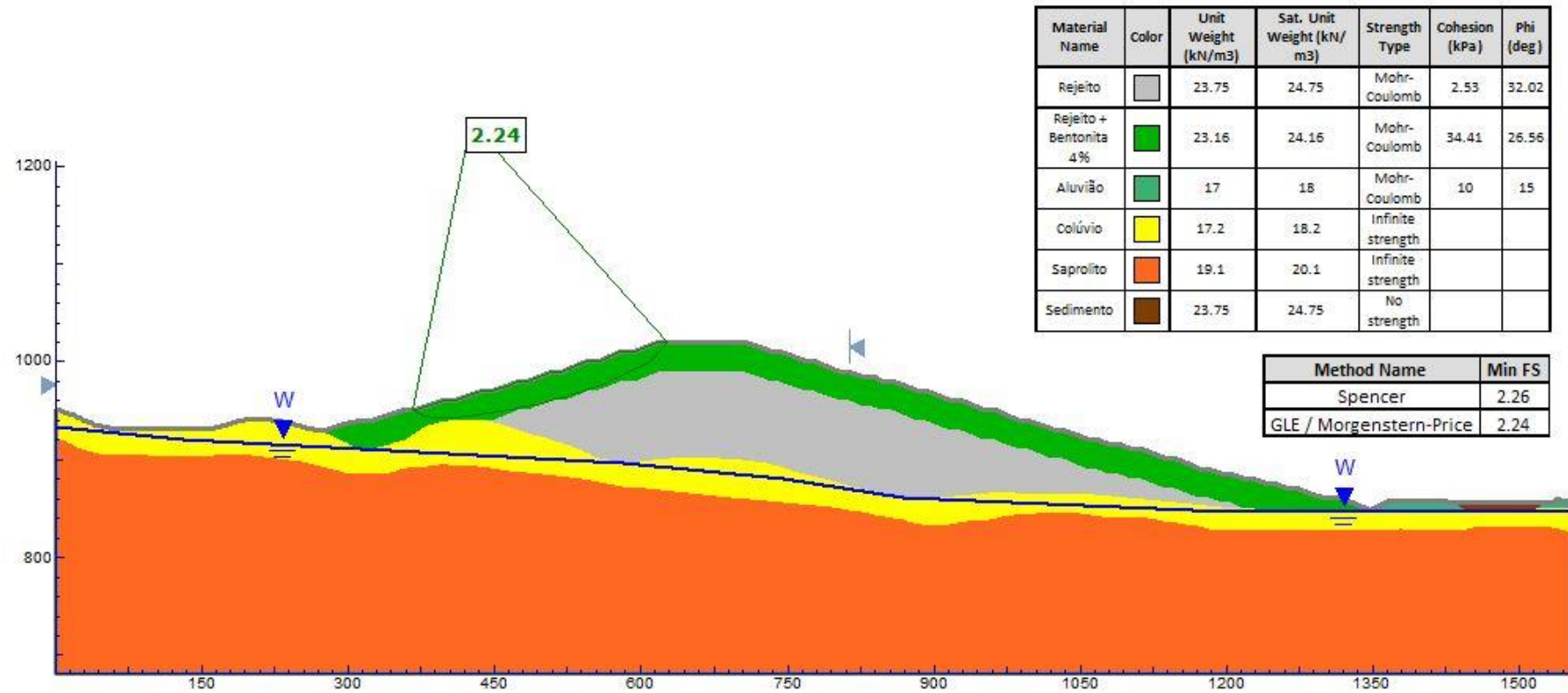


Figura 174 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito



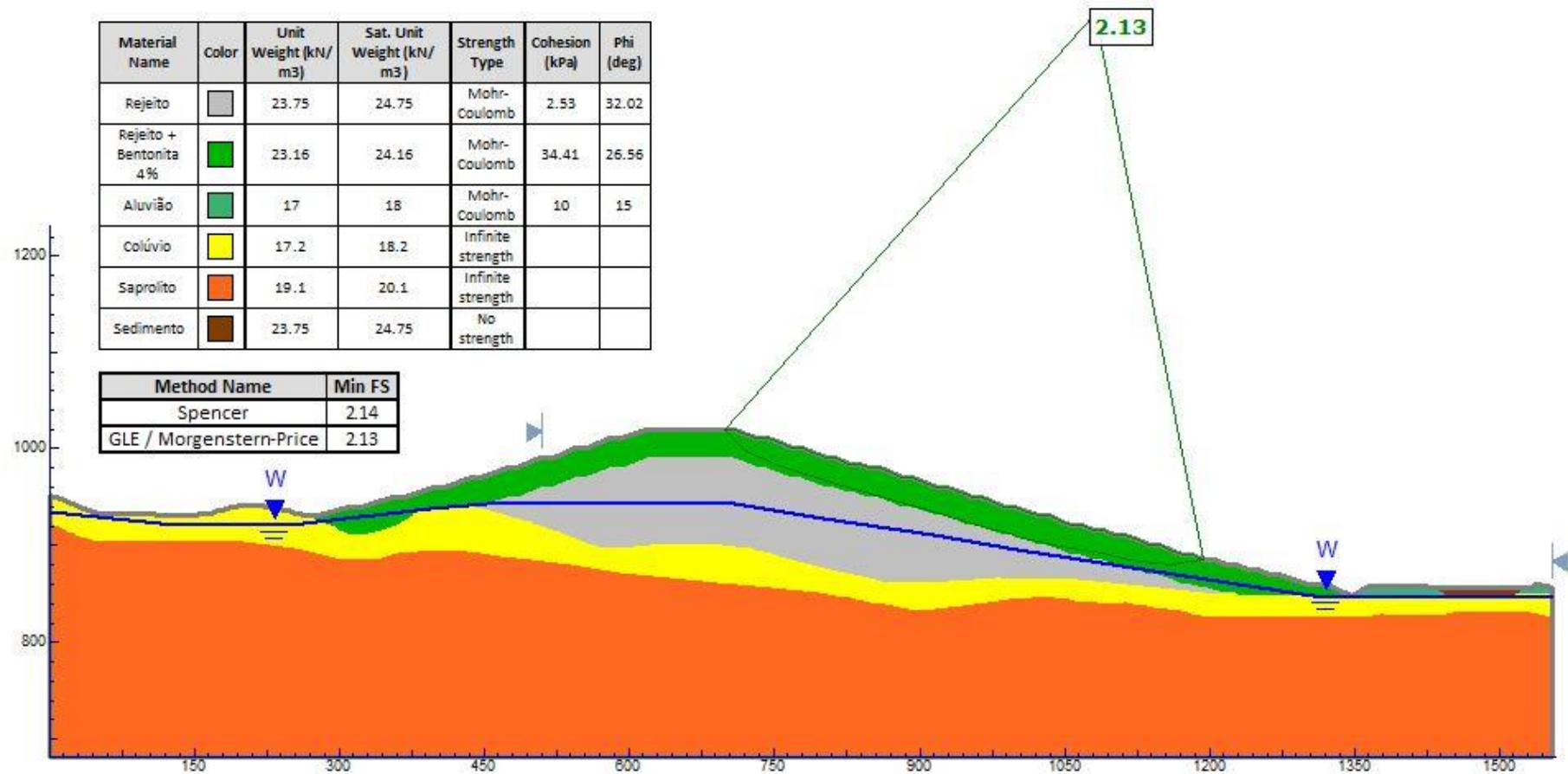
Fonte: Autoria própria

Figura 175 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo



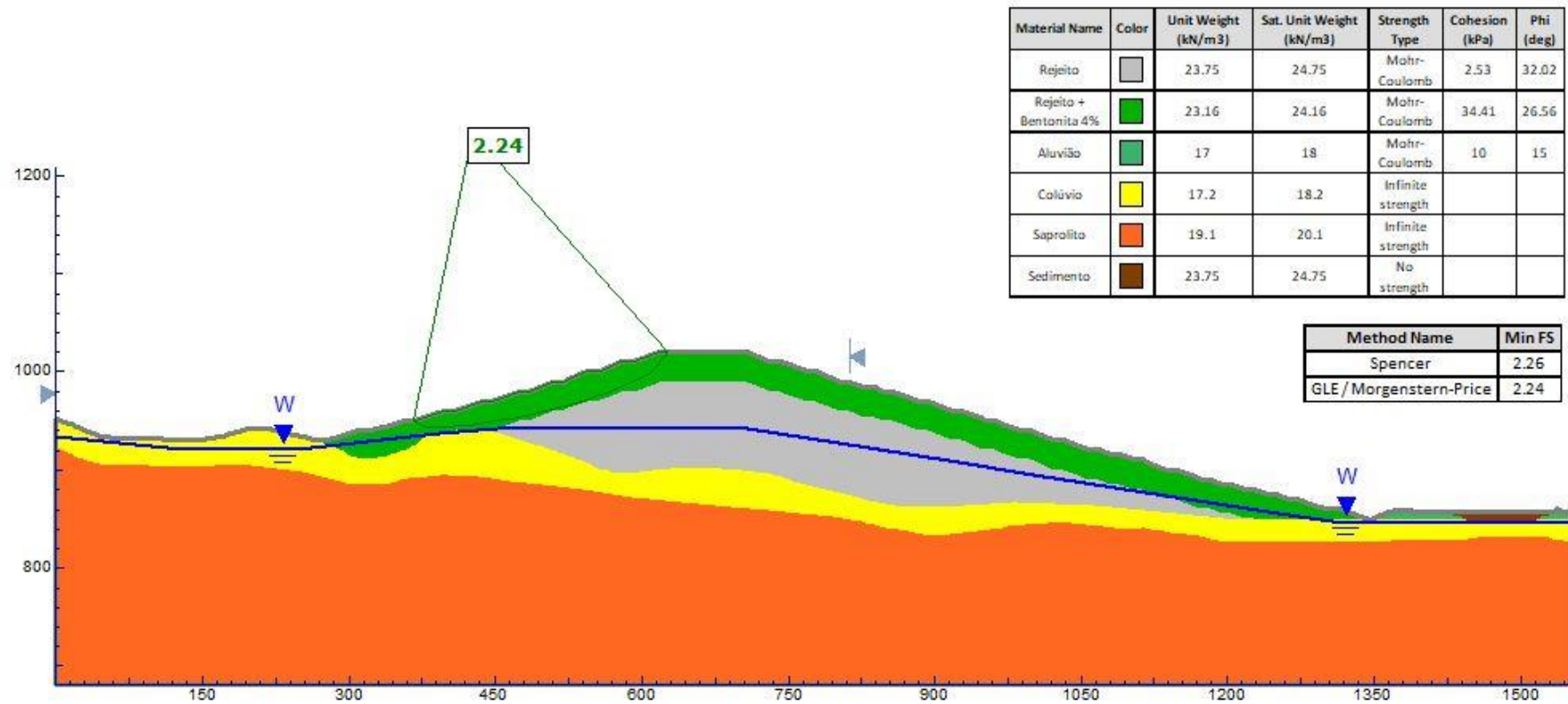
Fonte: Autoria própria

Figura 176 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito



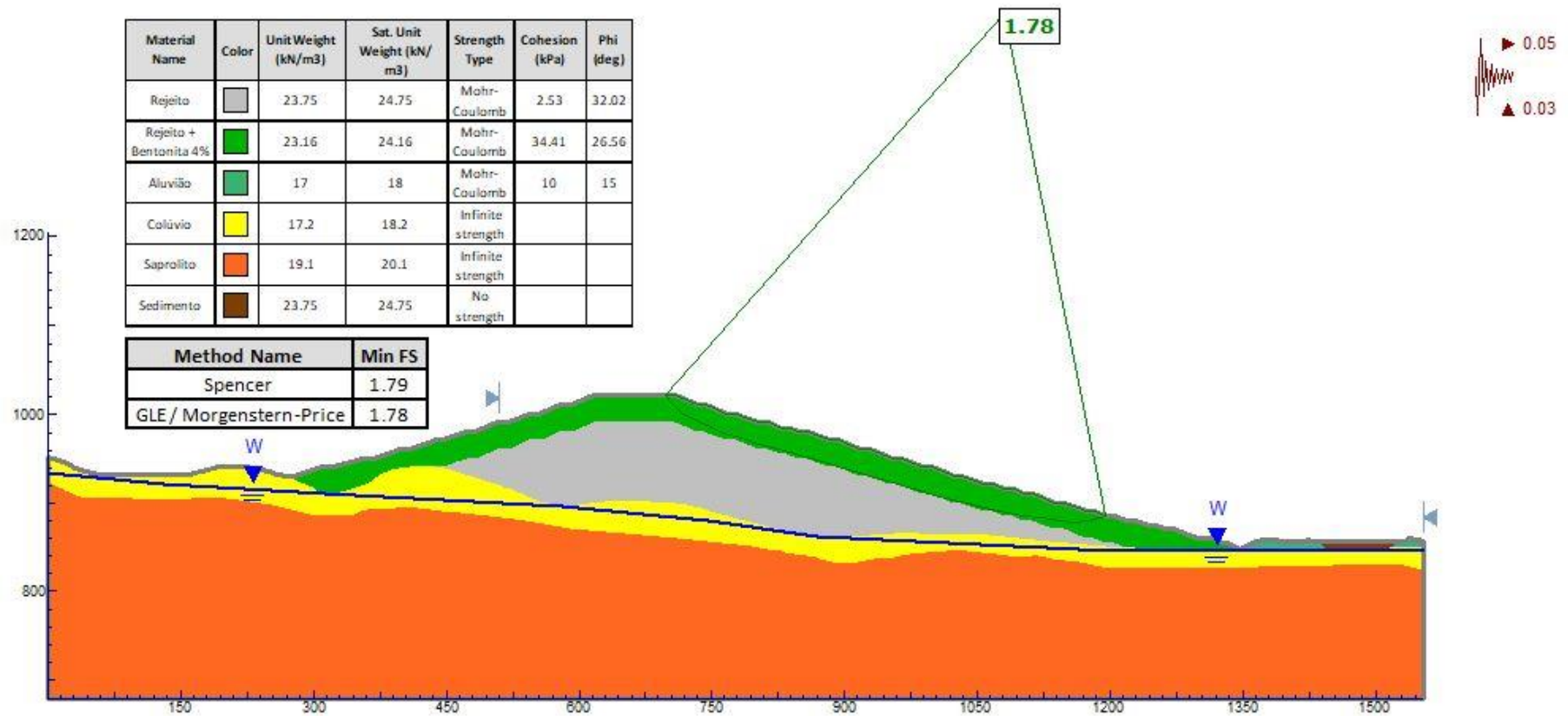
Fonte: Autoria própria

Figura 177 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



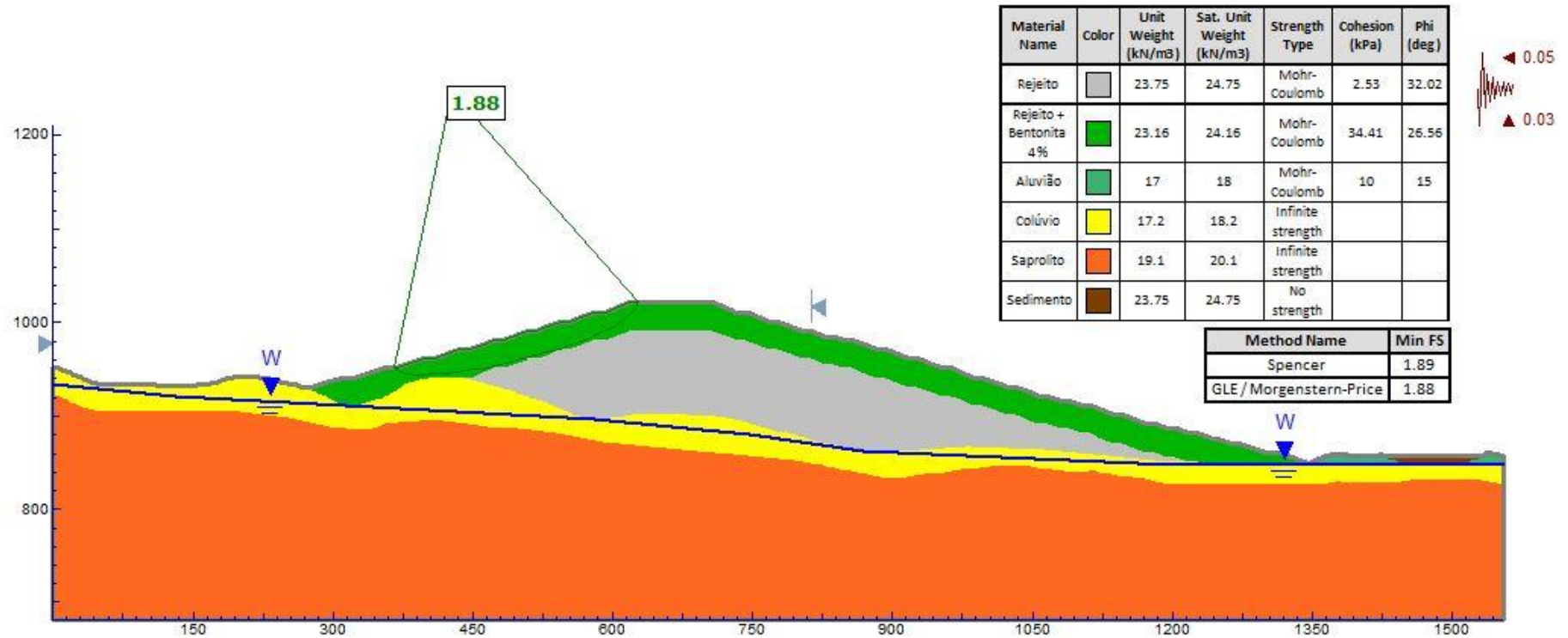
Fonte: Autoria própria

Figura 178 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

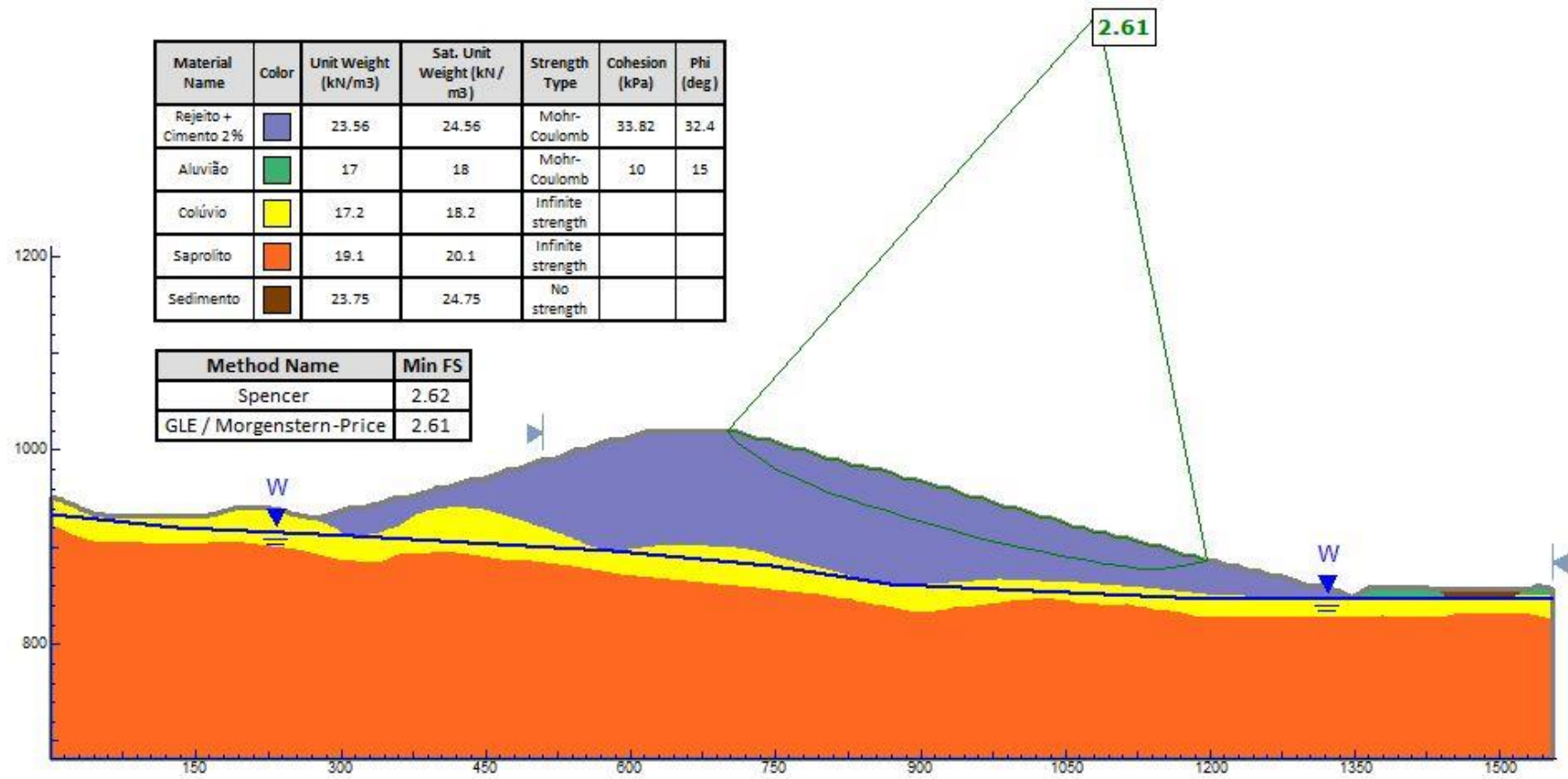
Figura 179 – Análise de estabilidade – Rejeito + 4% de bentonita – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

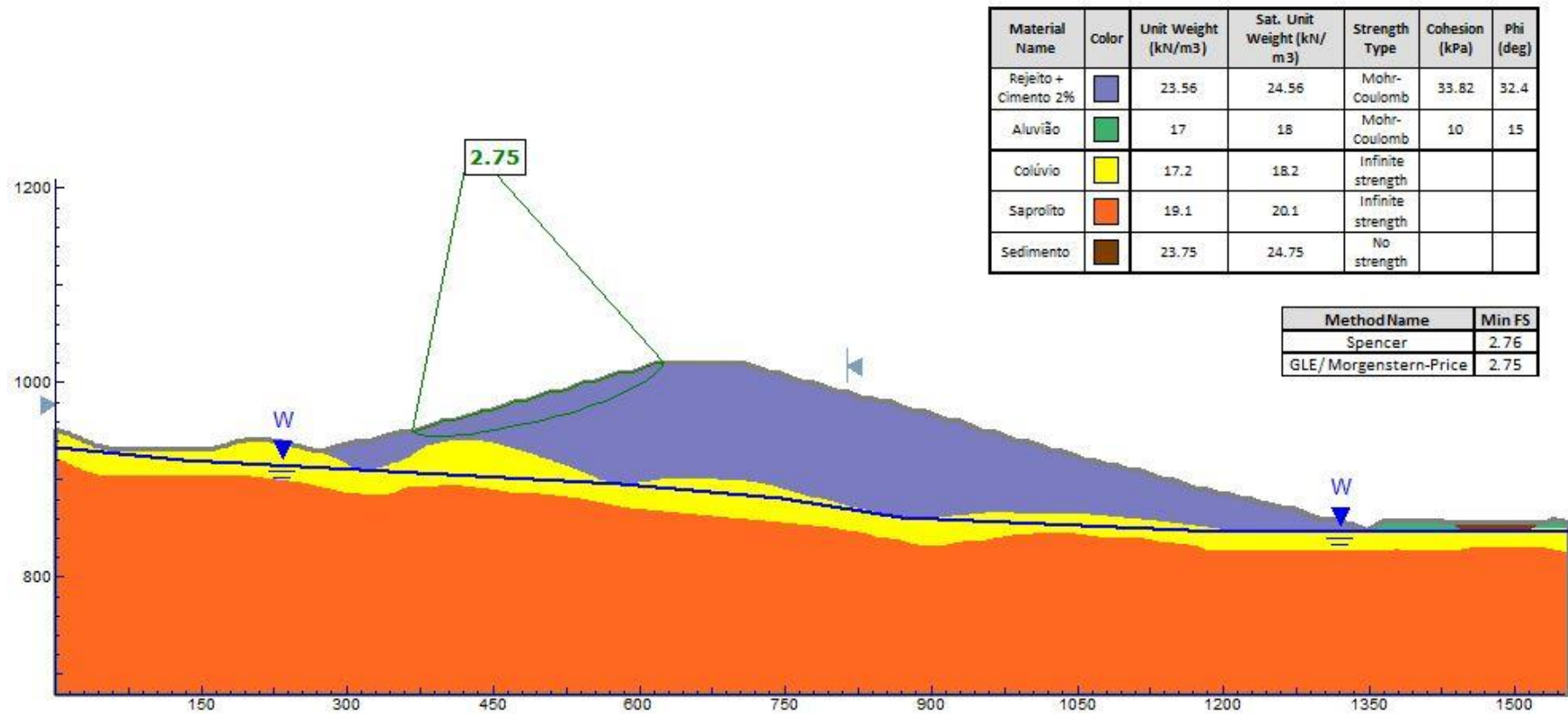
### REJEITO + 2% DE CIMENTO

Figura 180 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



Fonte: Autoria própria

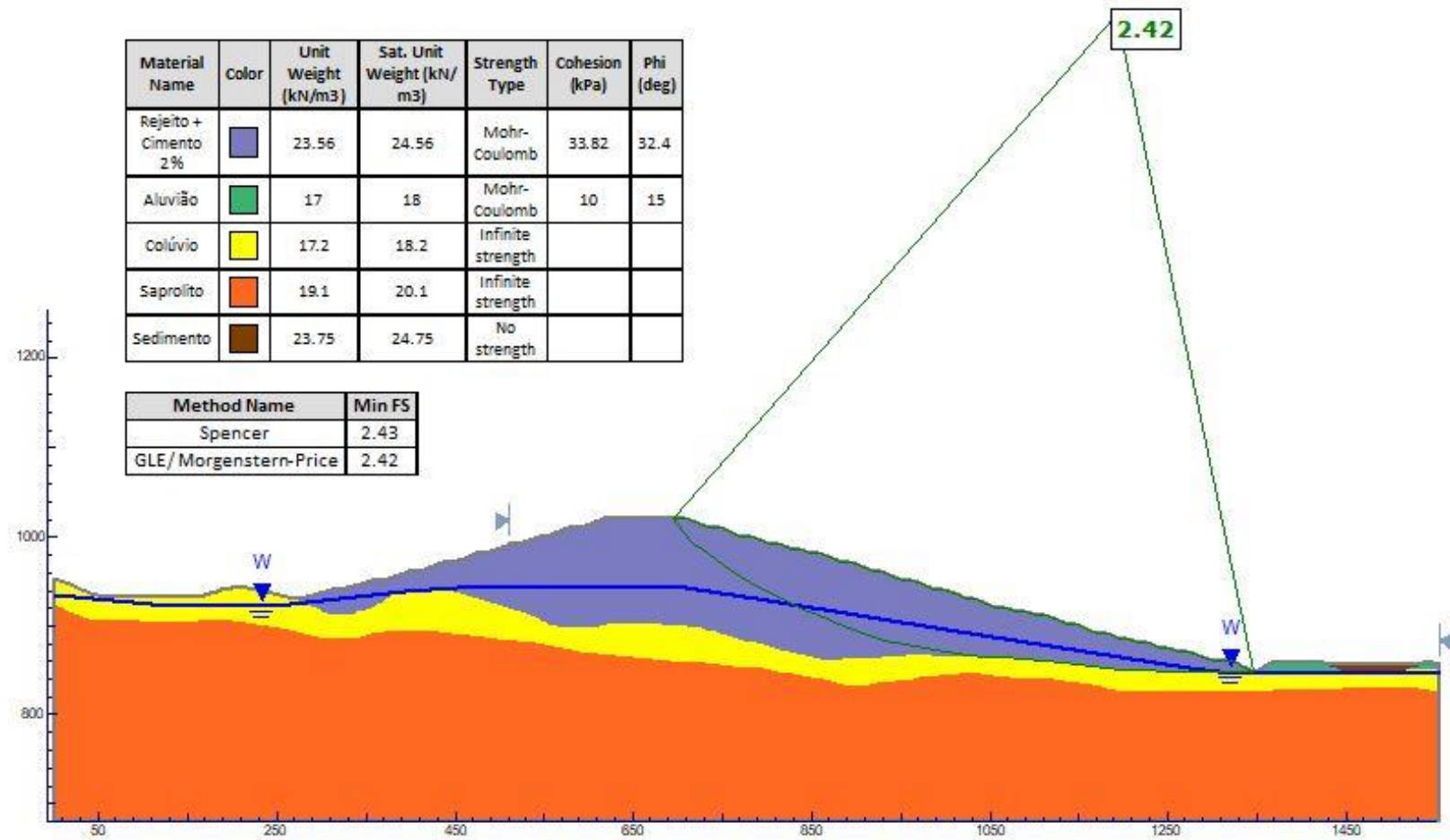
Figura 181 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

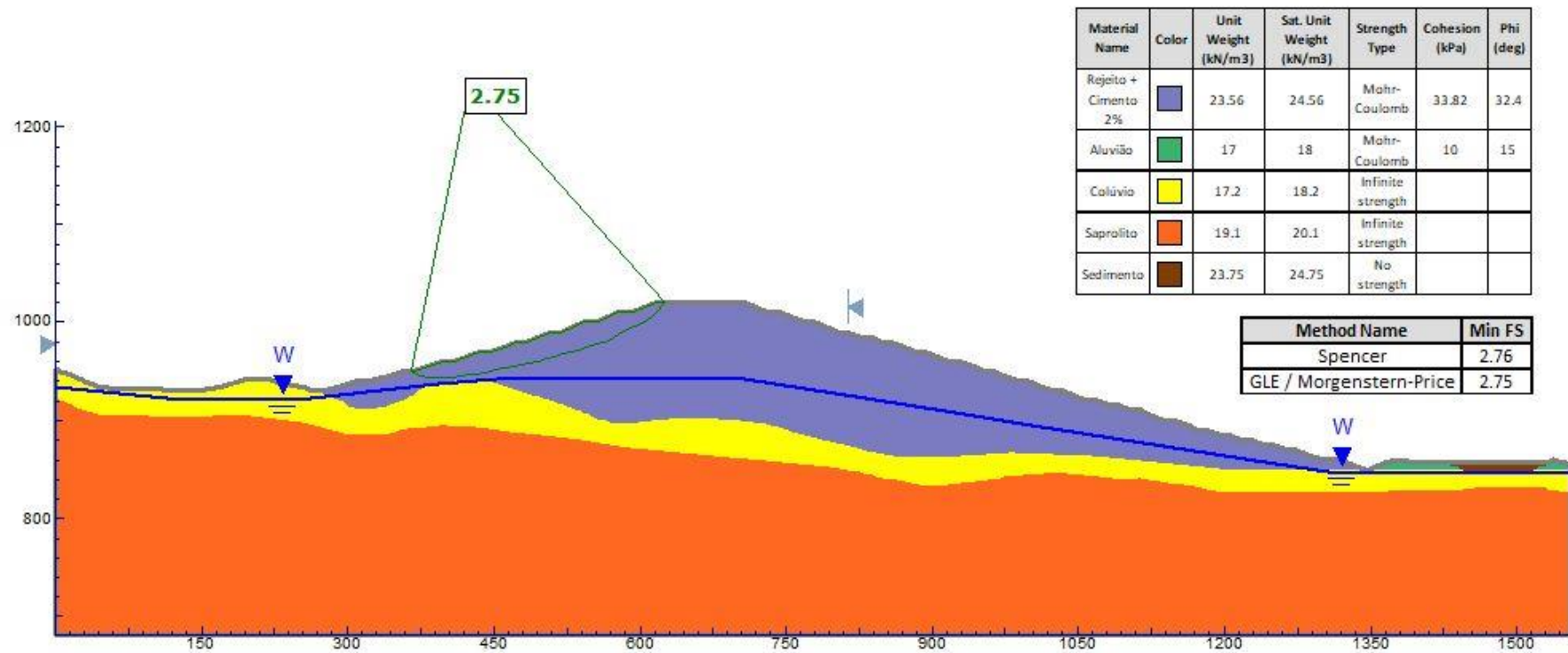


Figura 182 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



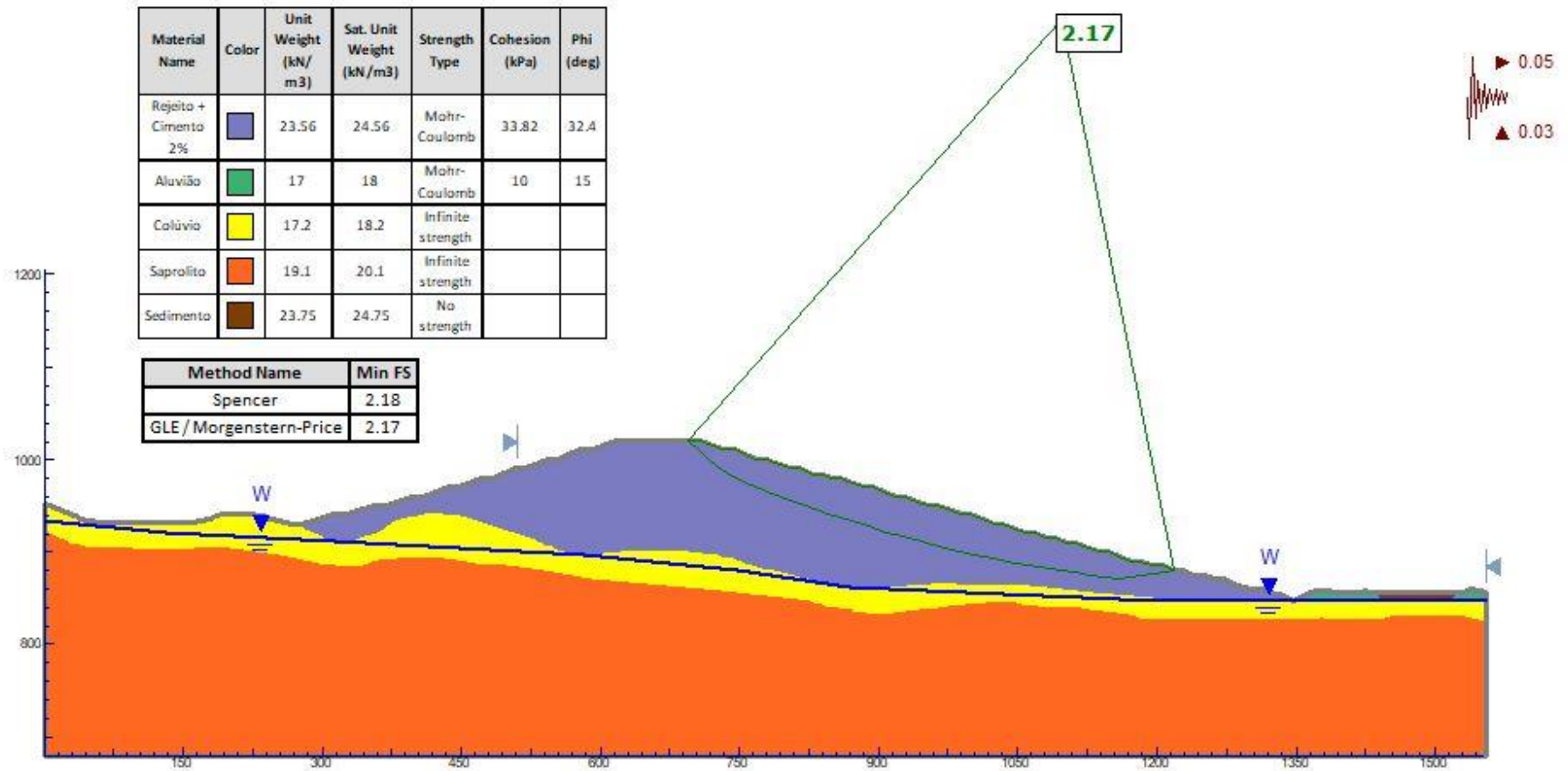
Fonte: Autoria própria

Figura 183 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



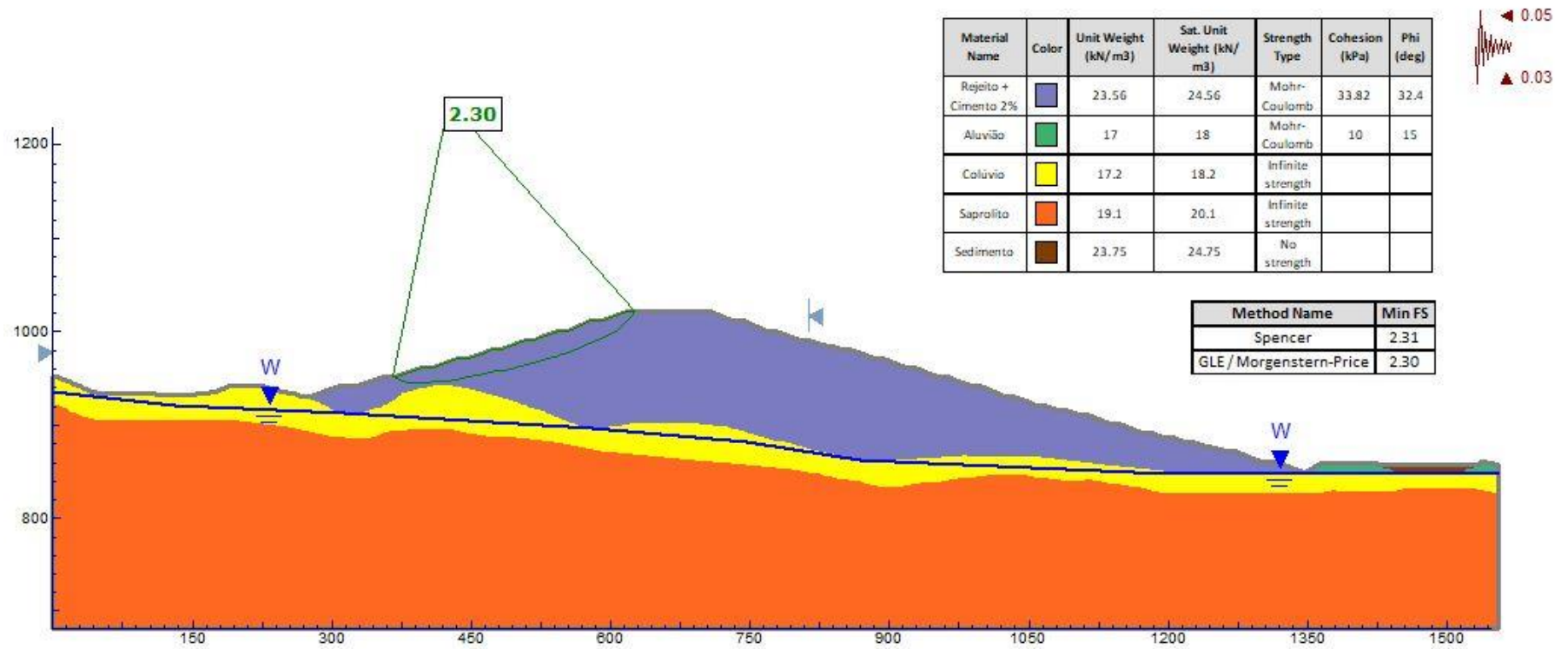
Fonte: Autoria própria

Figura 184 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



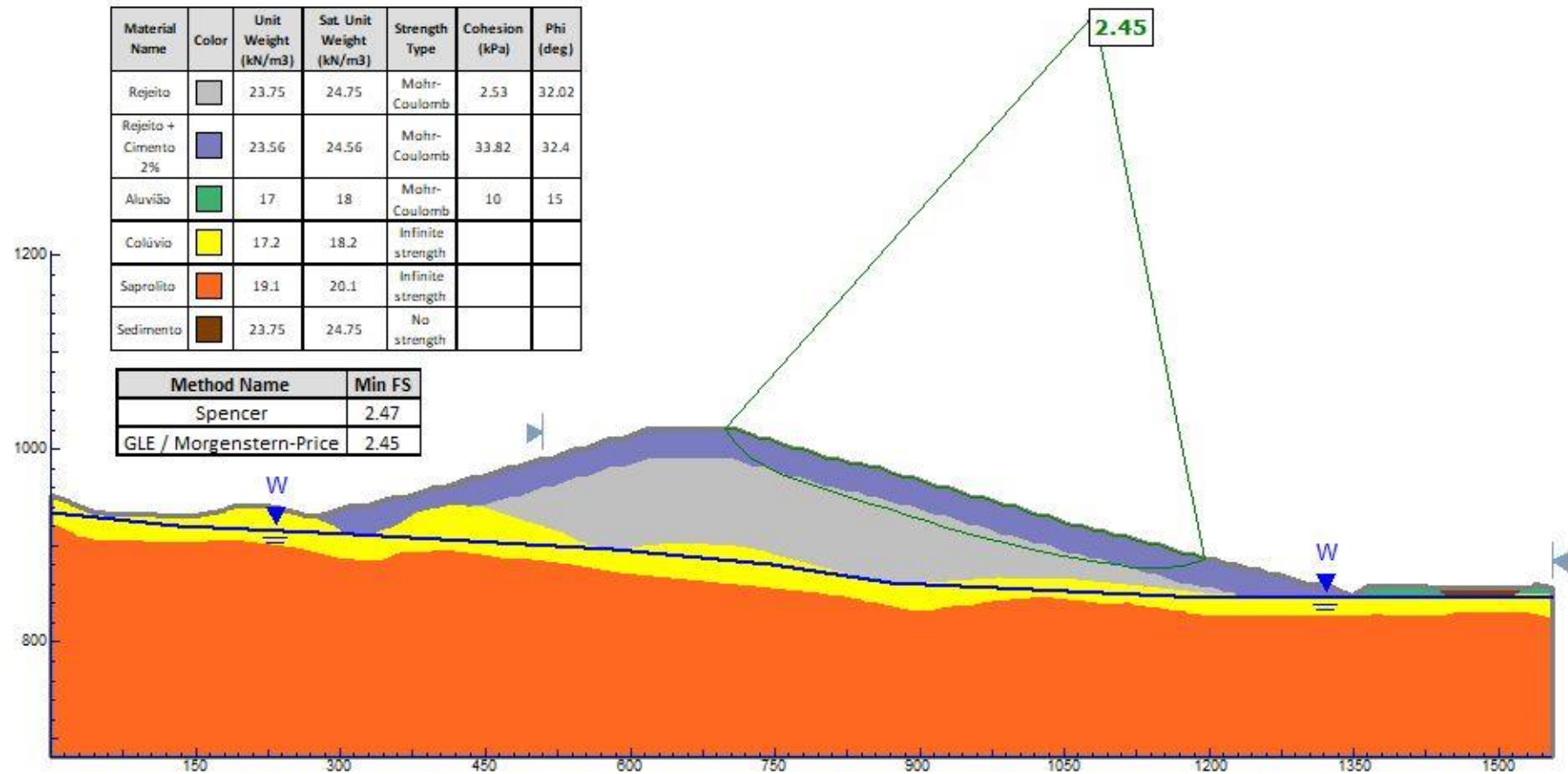
Fonte: Autoria própria

Figura 185 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



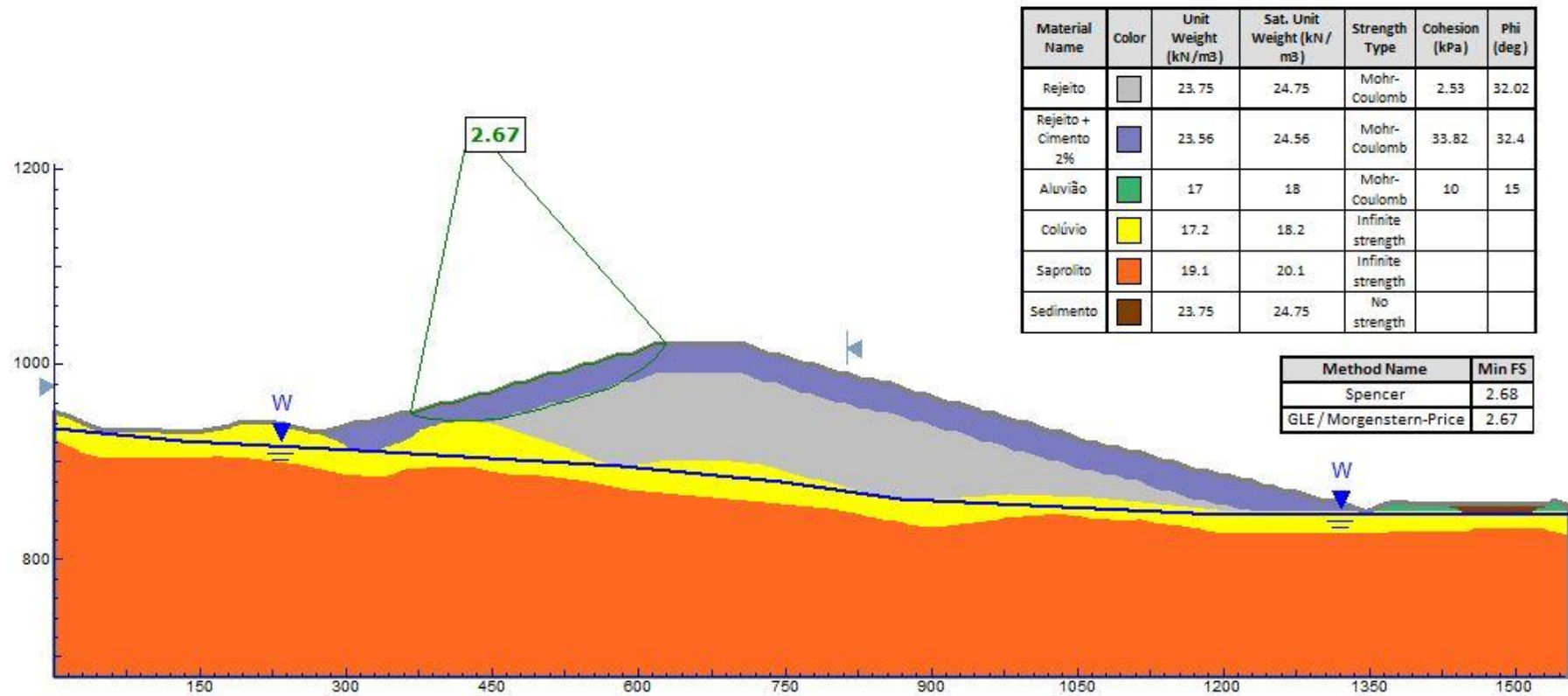
Fonte: Autoria própria

Figura 186 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito



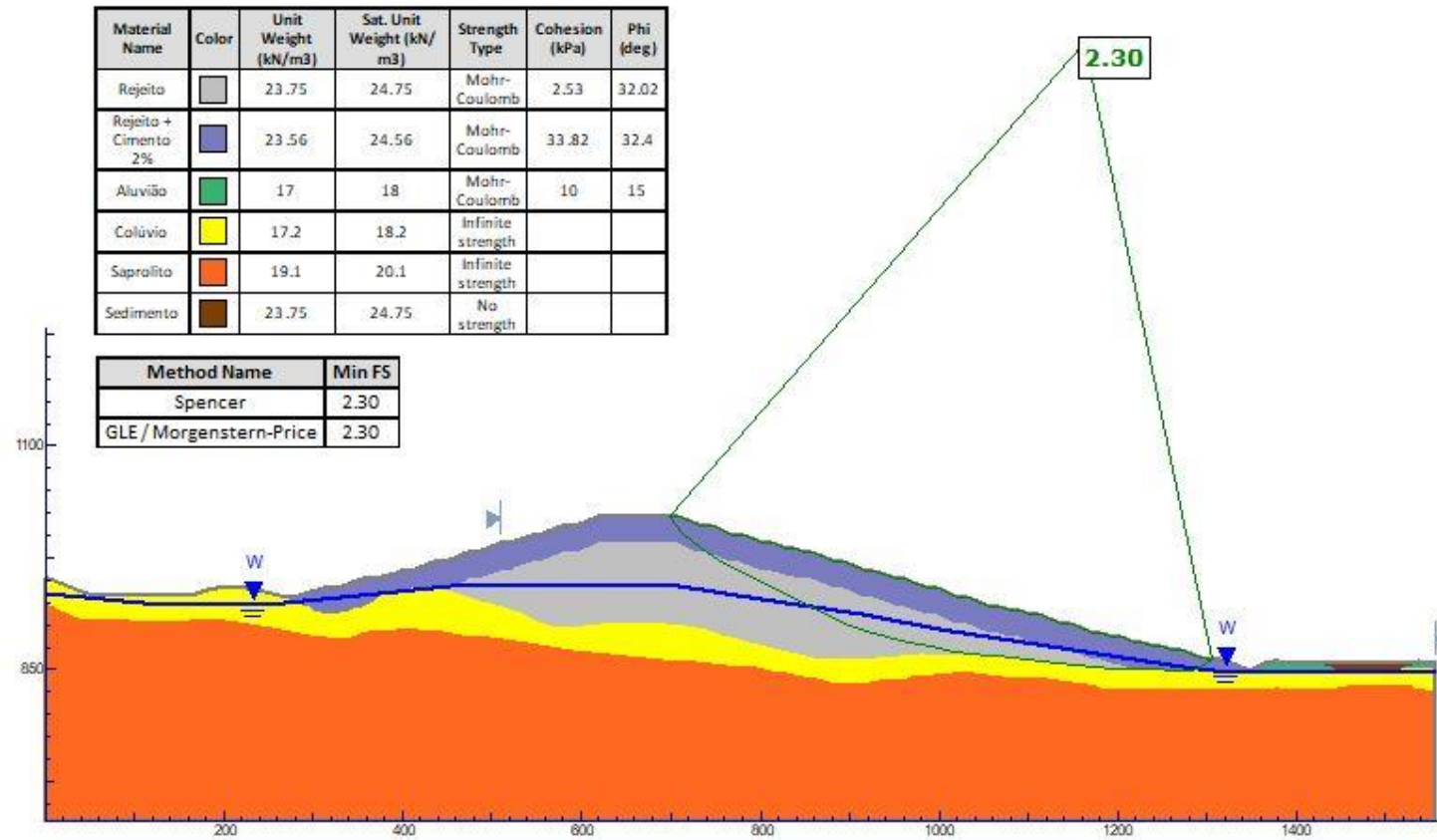
Fonte: Autoria própria

Figura 187 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo



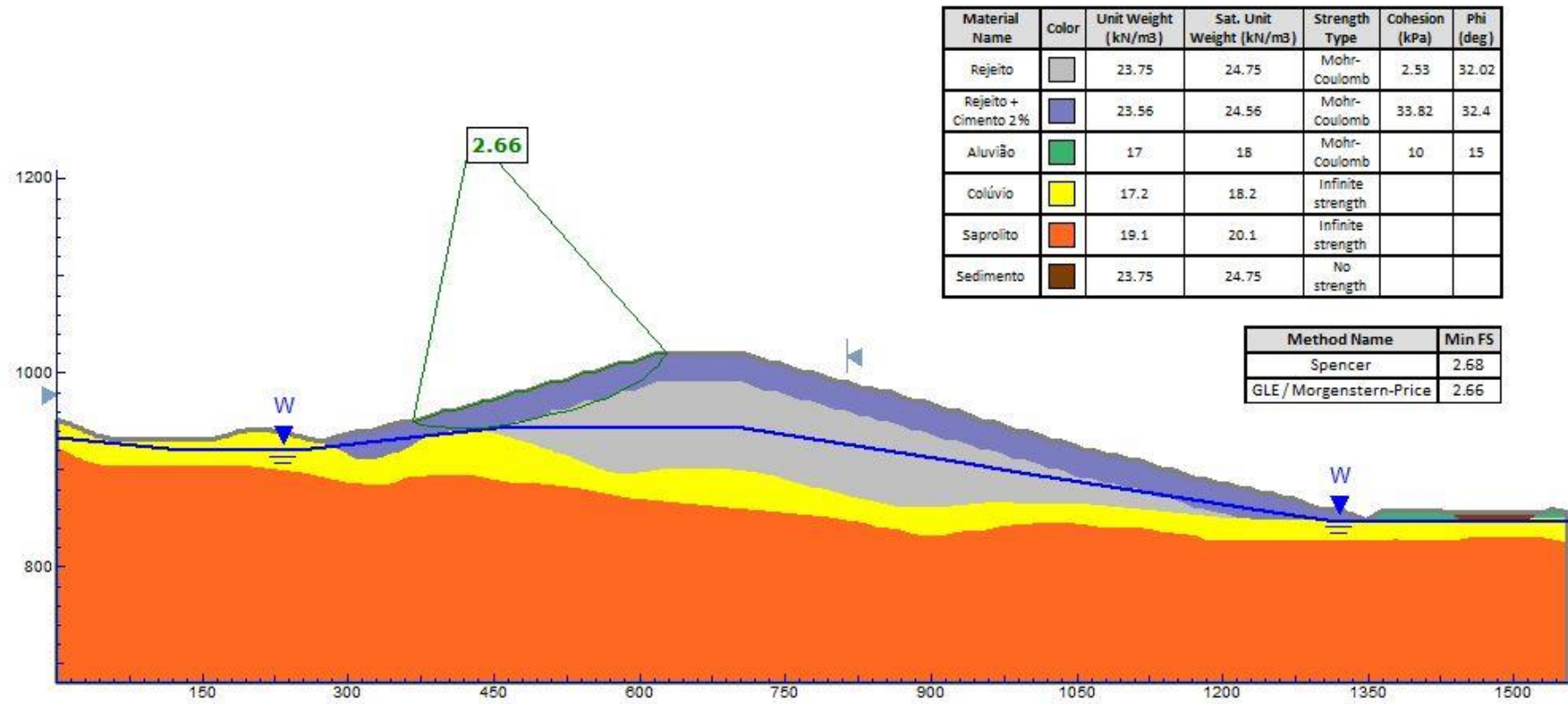
Fonte: Autoria própria

Figura 188 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito



Fonte: Autoria própria

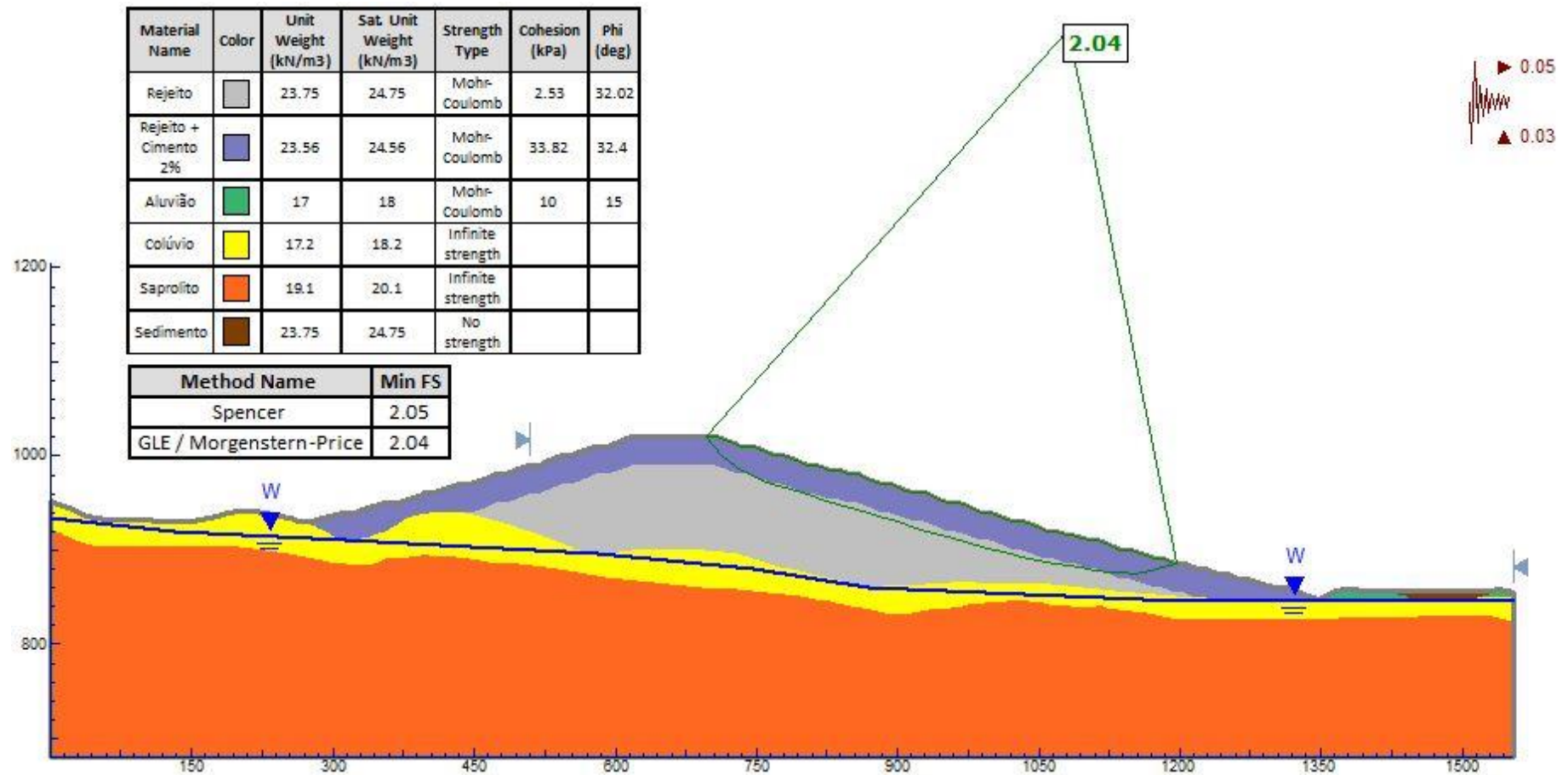
Figura 189 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

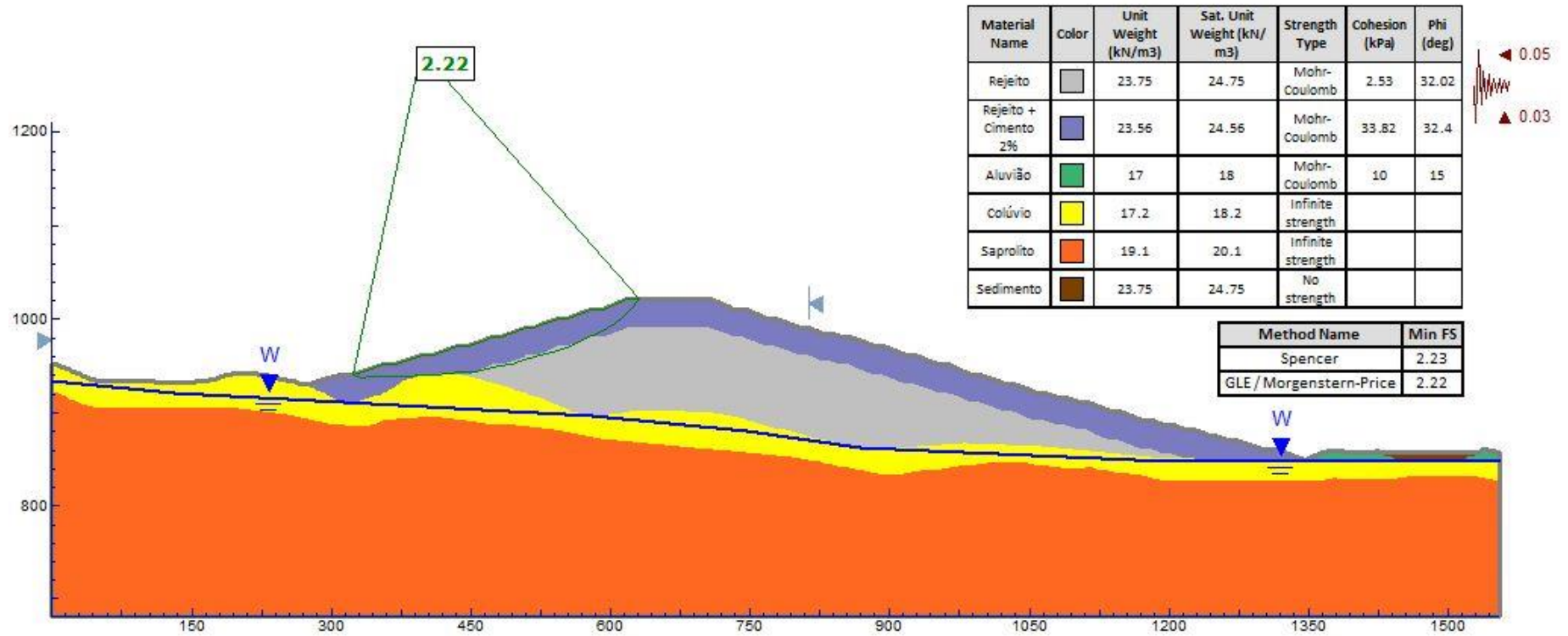


Figura 190 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

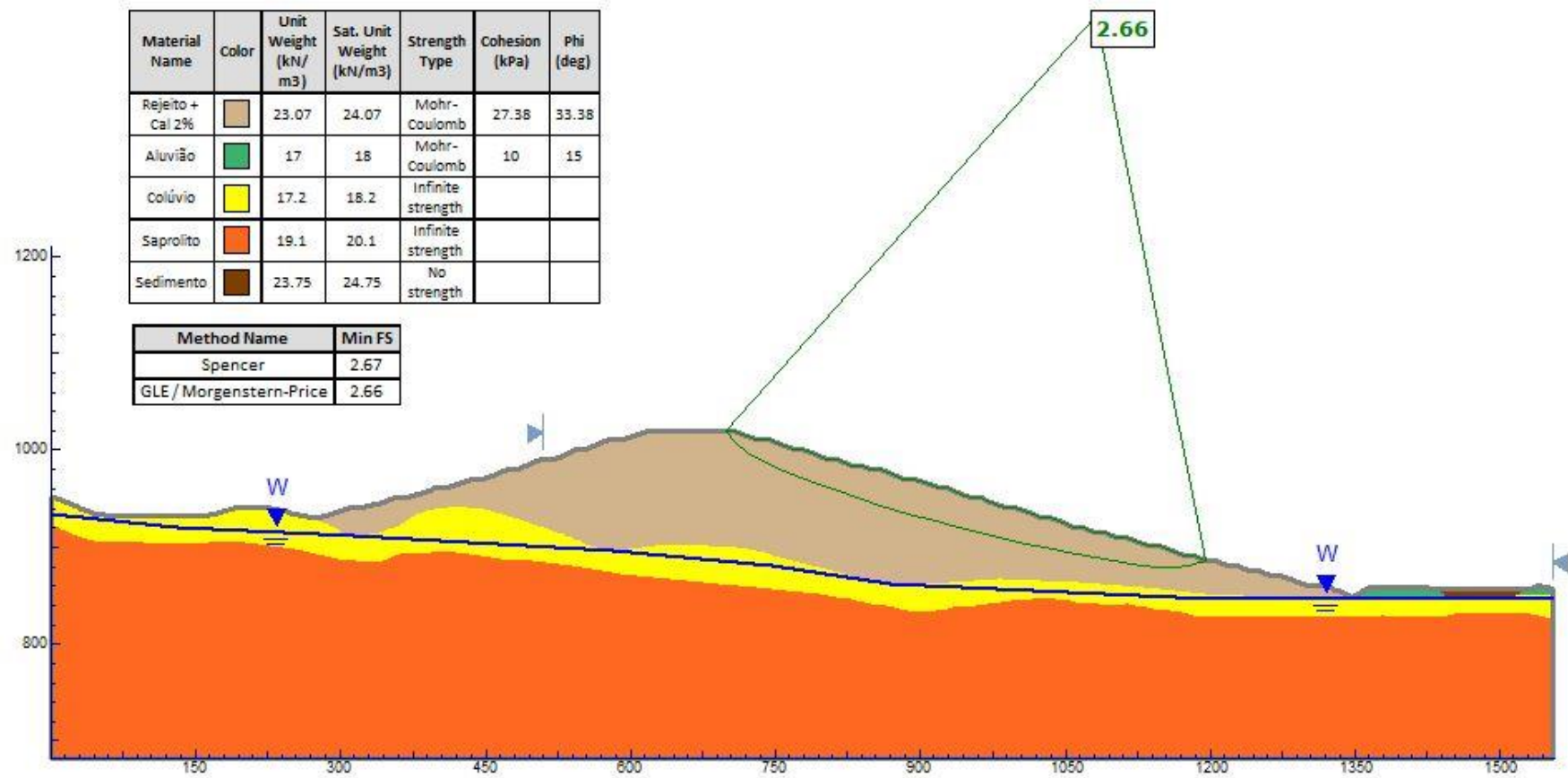
Figura 191 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cimento – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

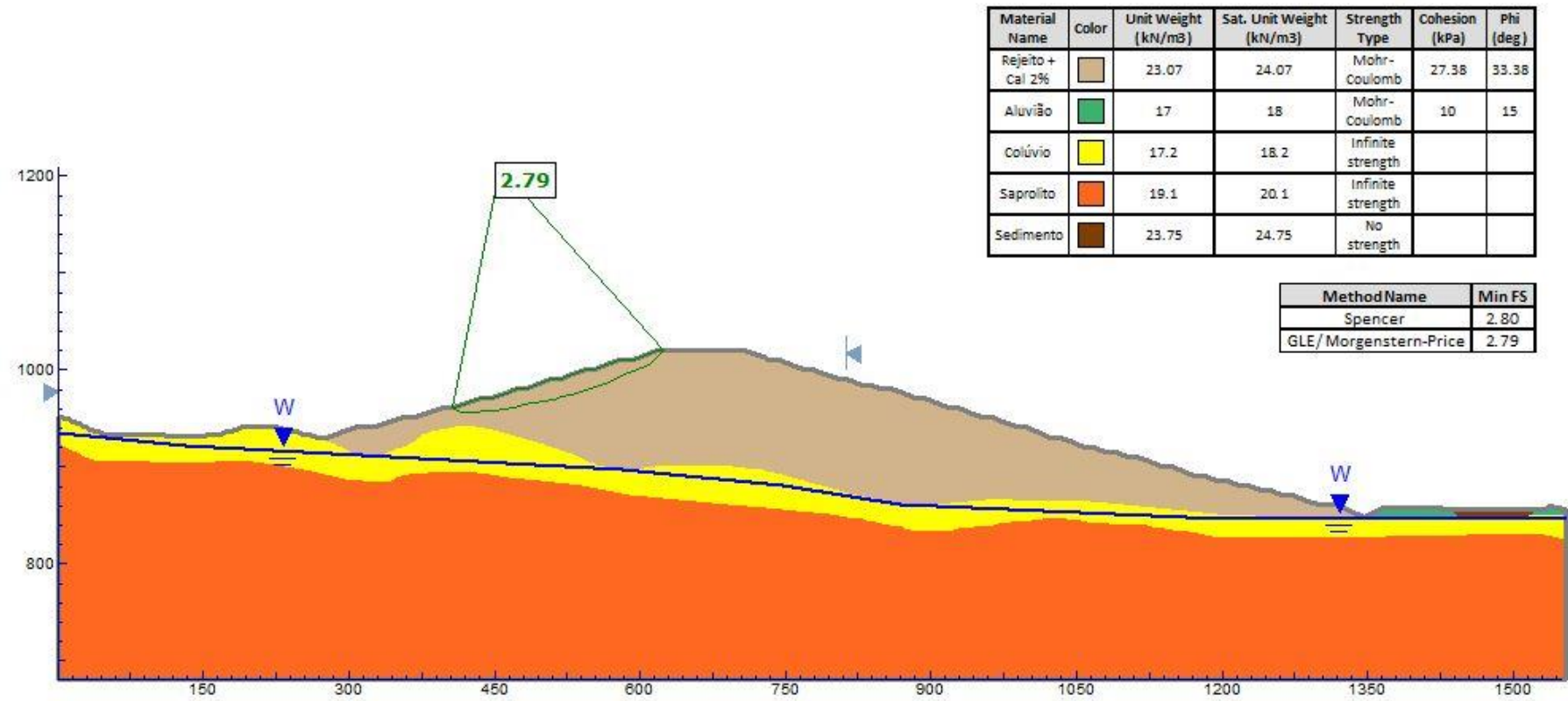
### REJEITO + 2% DE CAL

Figura 192 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



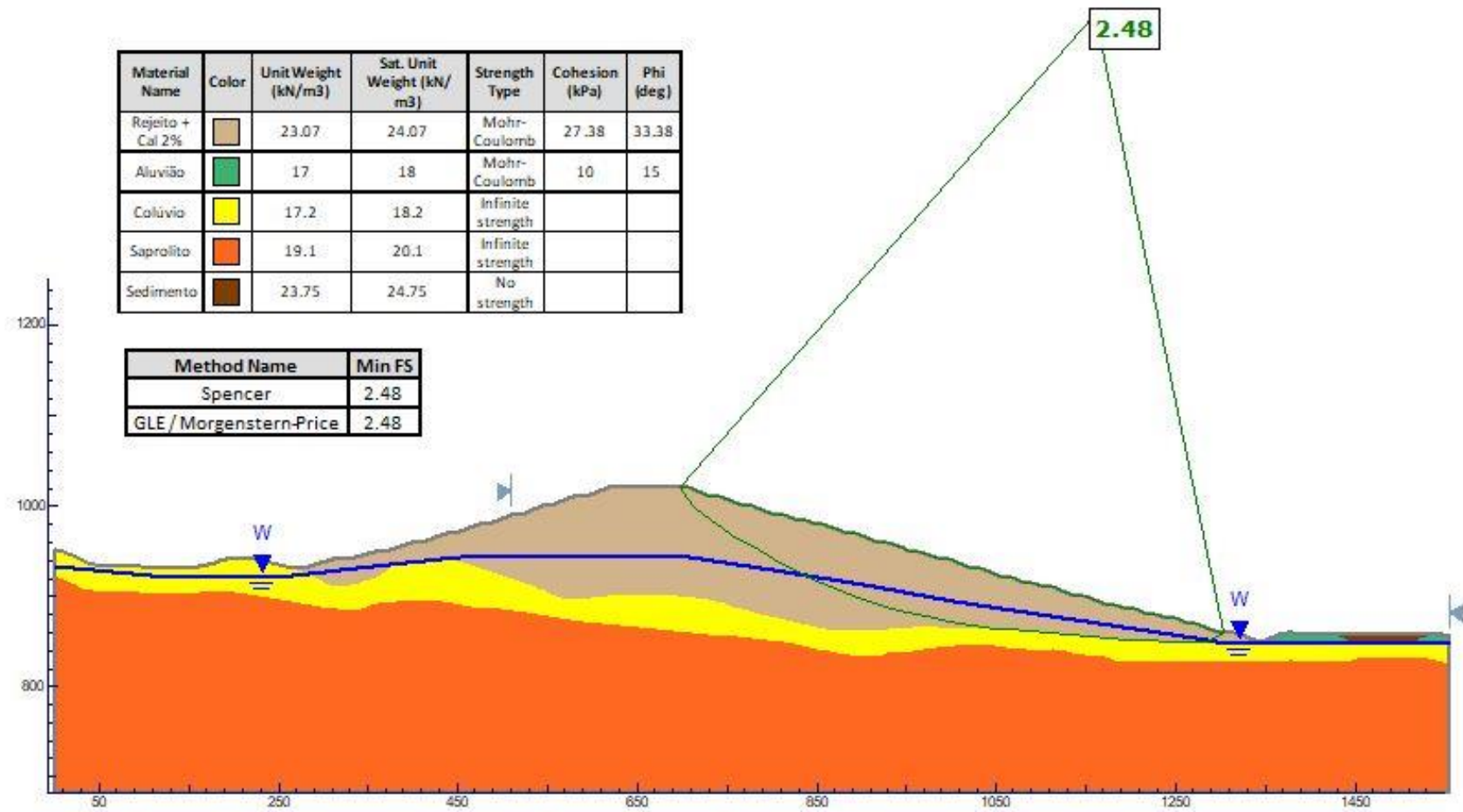
Fonte: Autoria própria

Figura 193 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



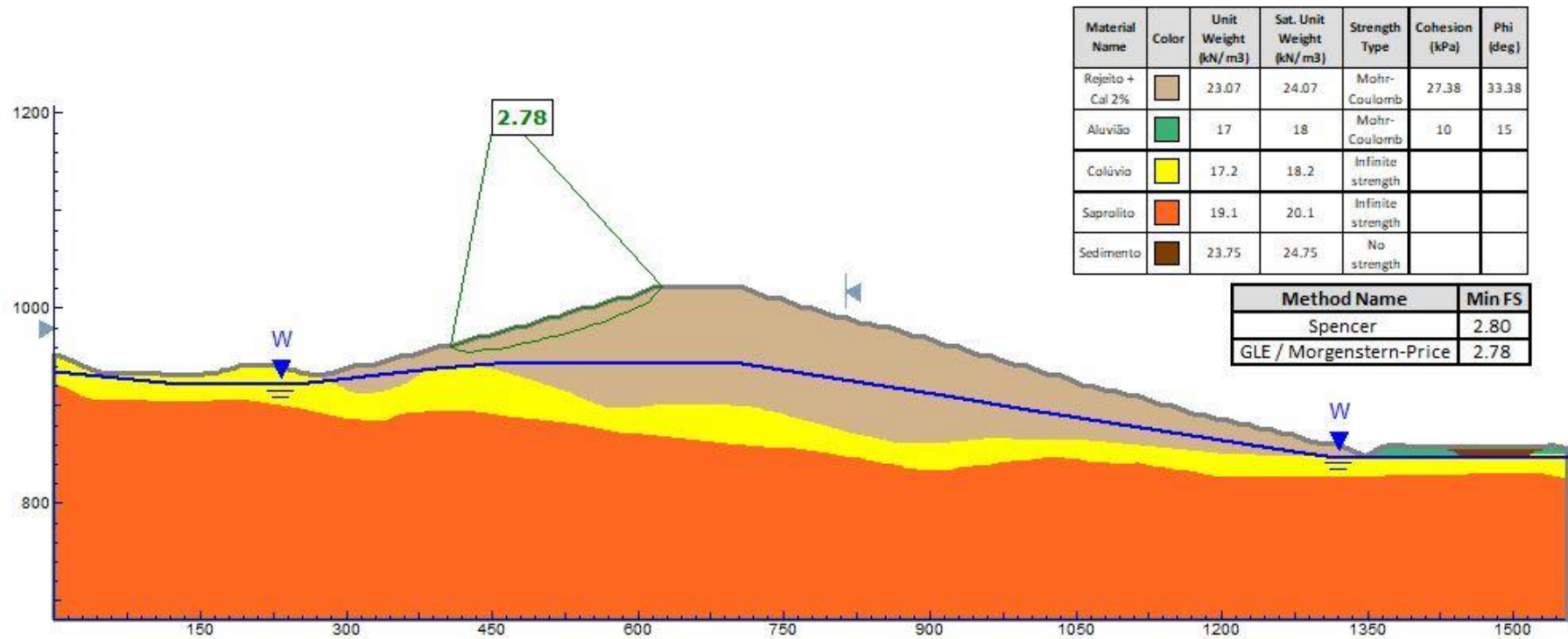
Fonte: Autoria própria

Figura 194 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



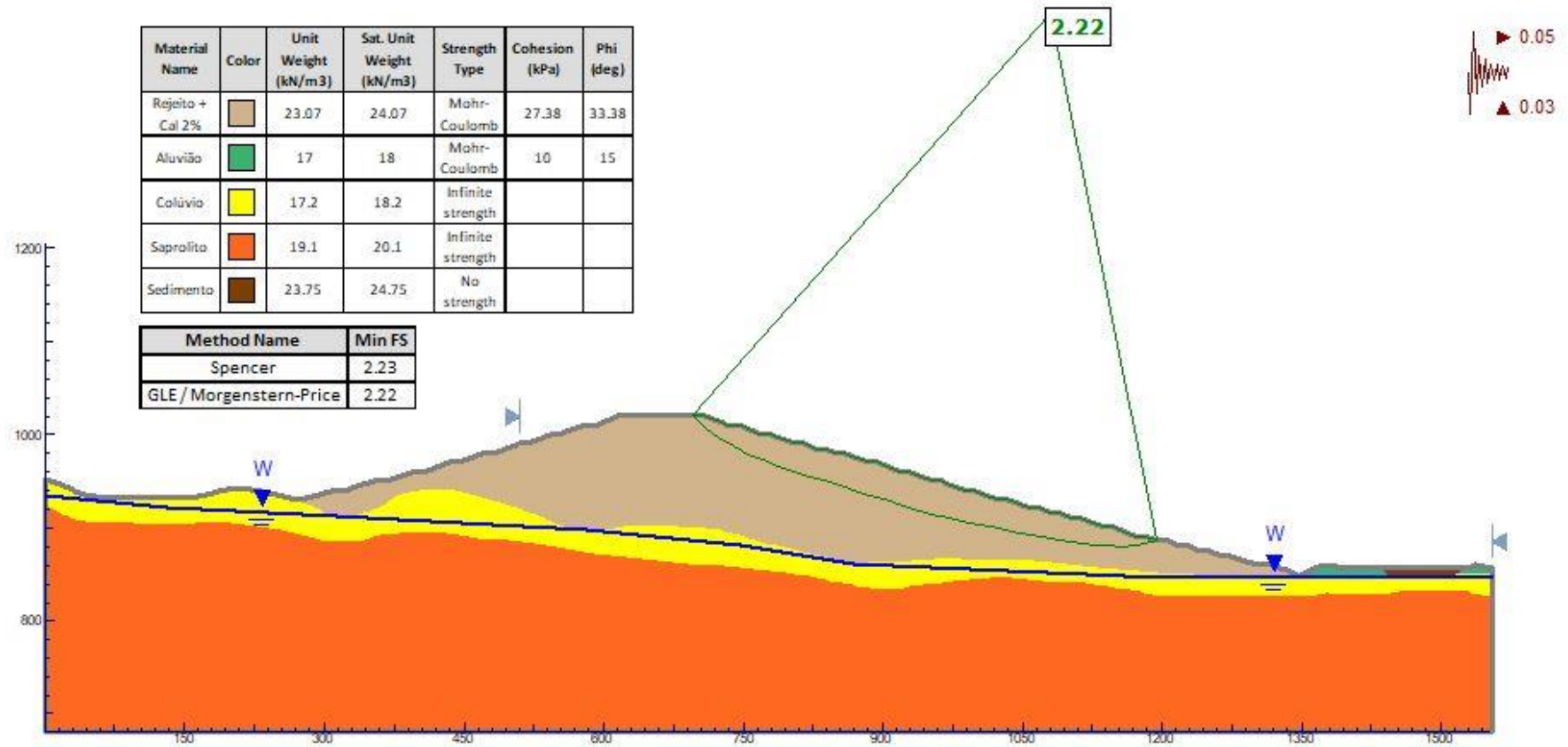
Fonte: Autoria própria

Figura 195 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



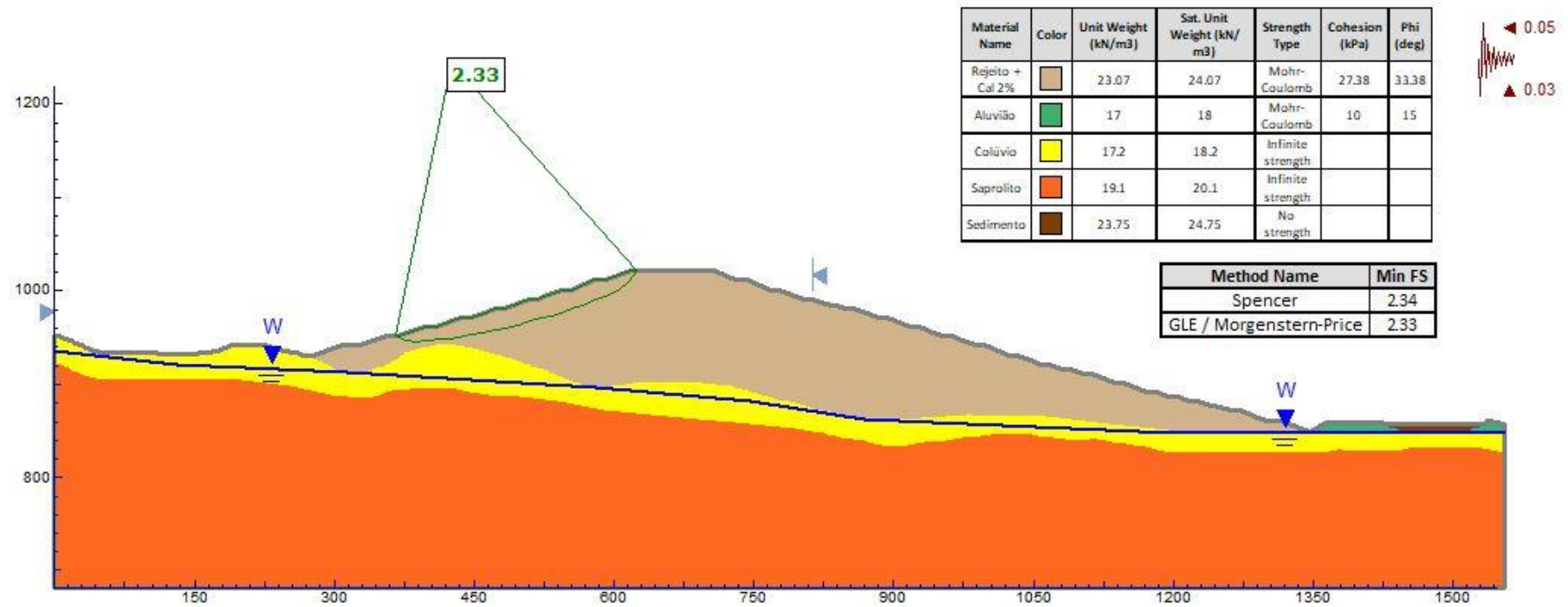
Fonte: Autoria própria

Figura 196 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

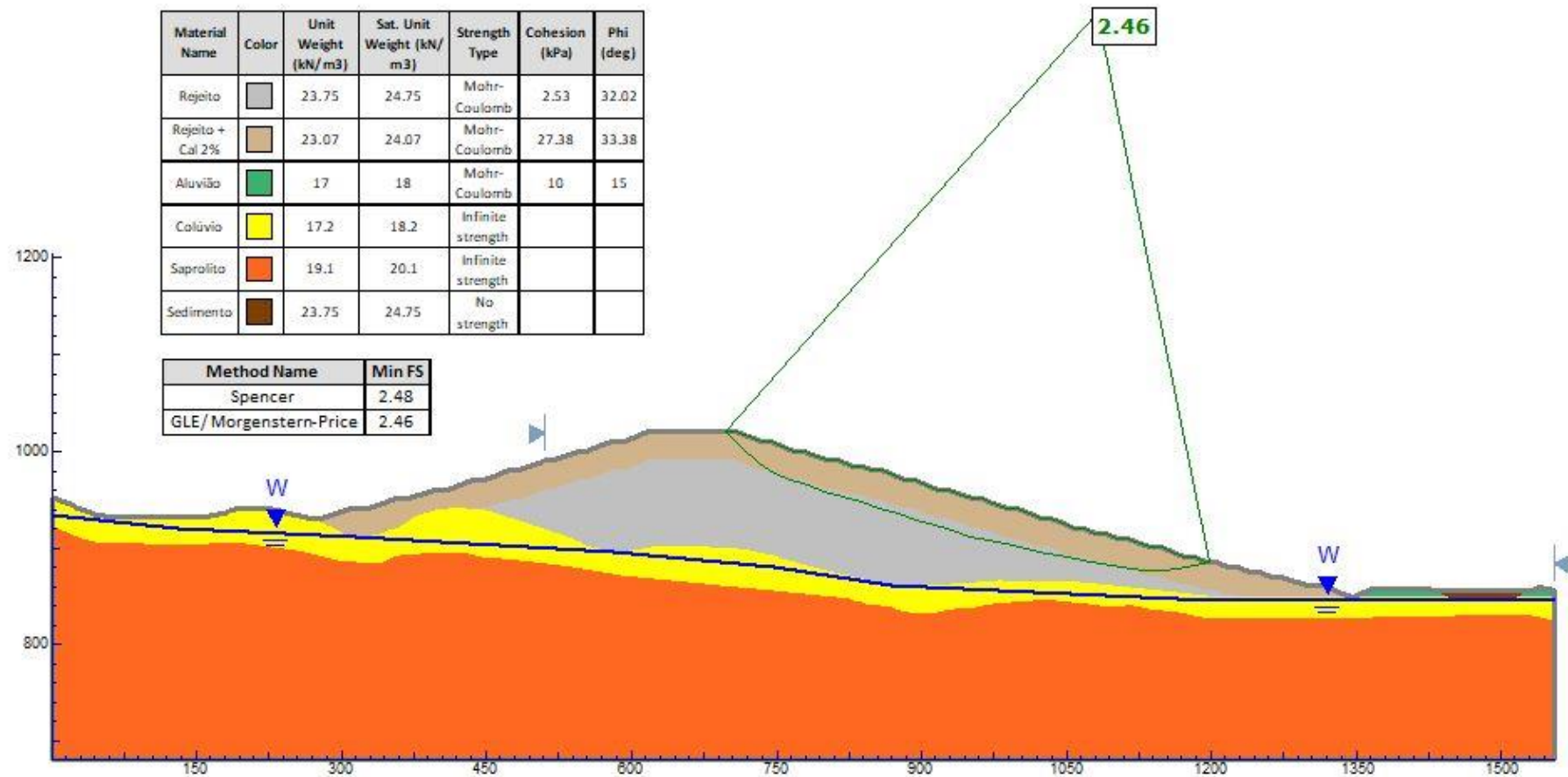
Figura 197 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

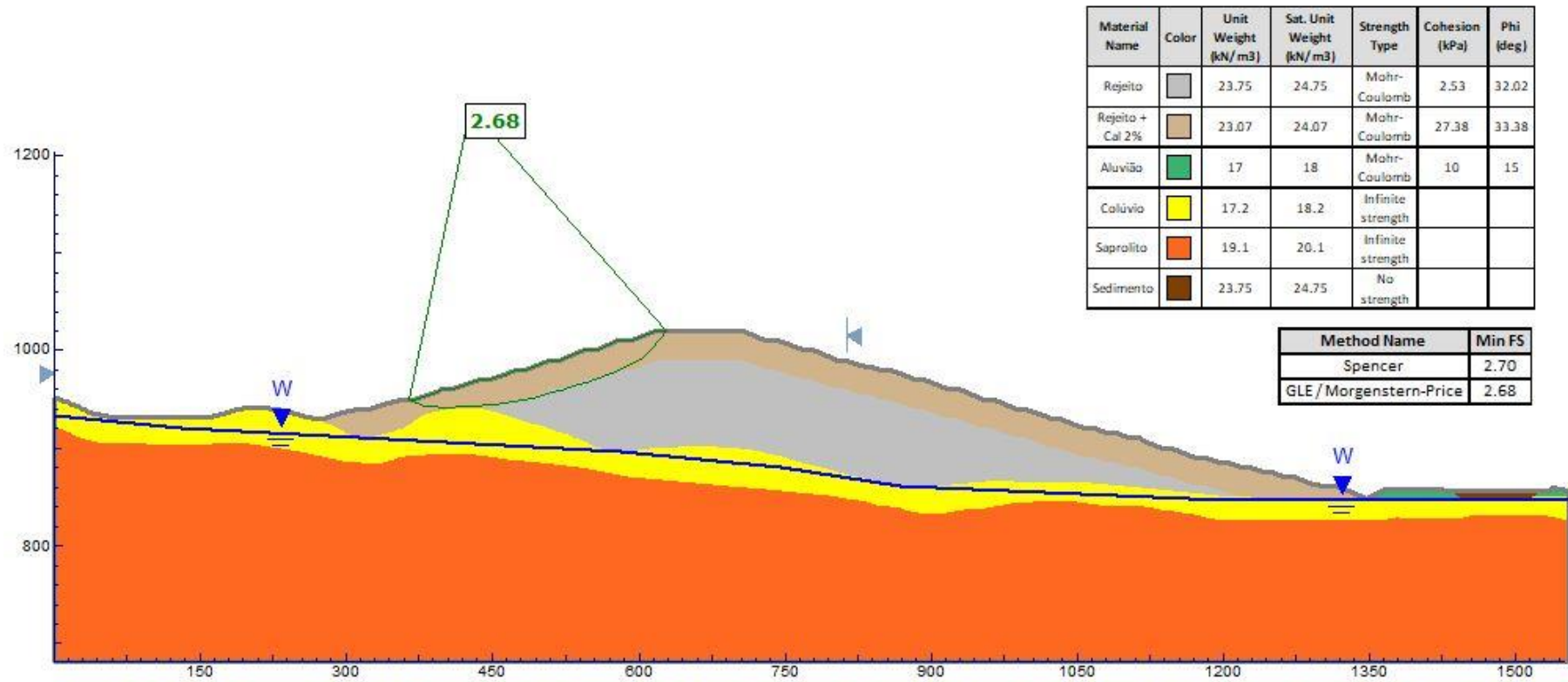


Figura 198 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito



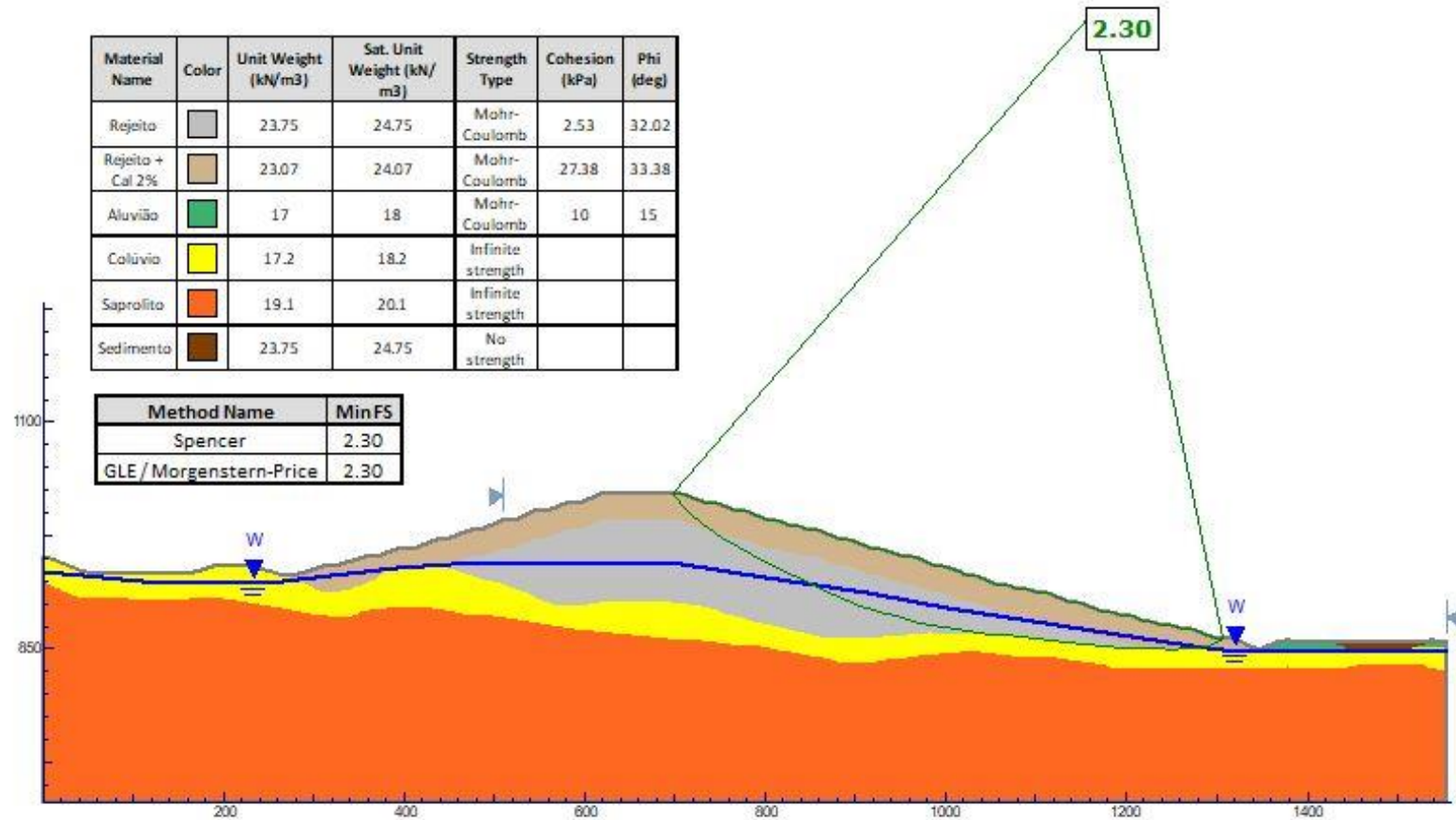
Fonte: Autoria própria

Figura 199 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo



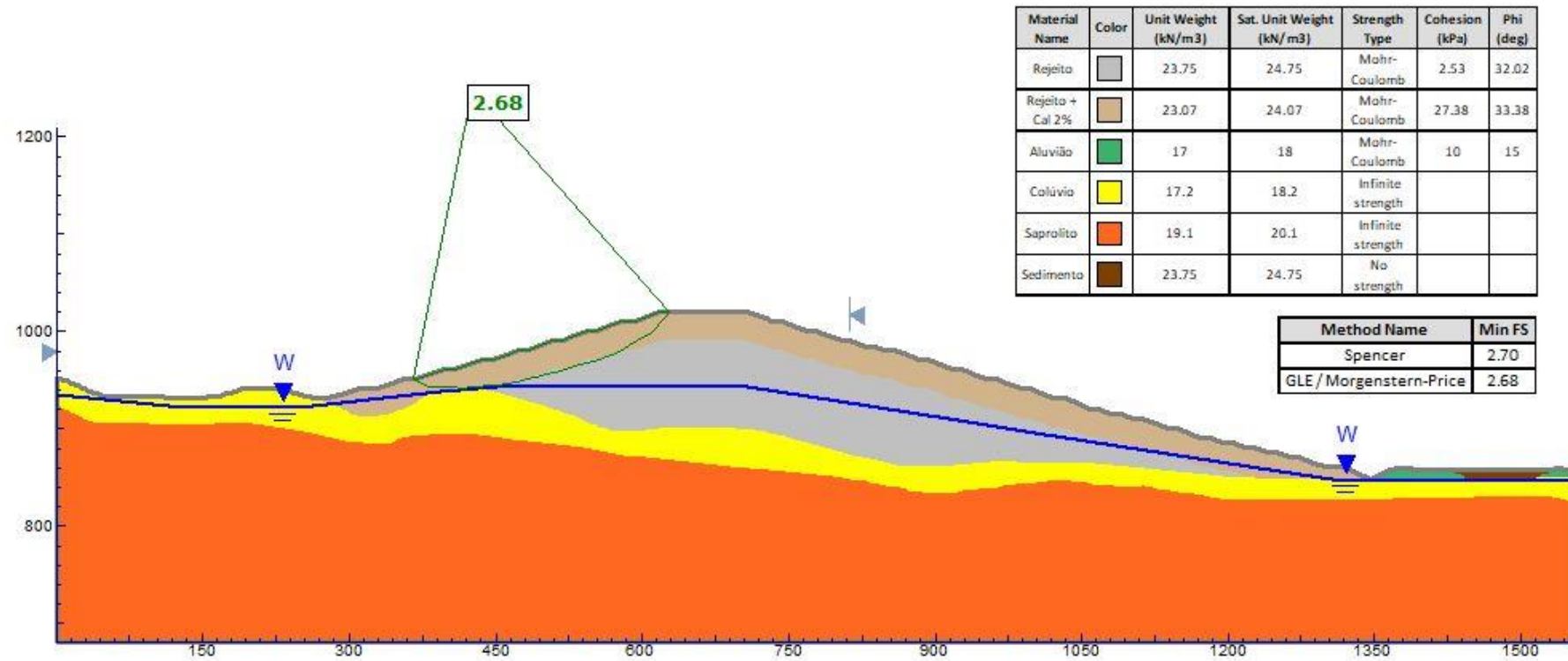
Fonte: Autoria própria

Figura 200 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito



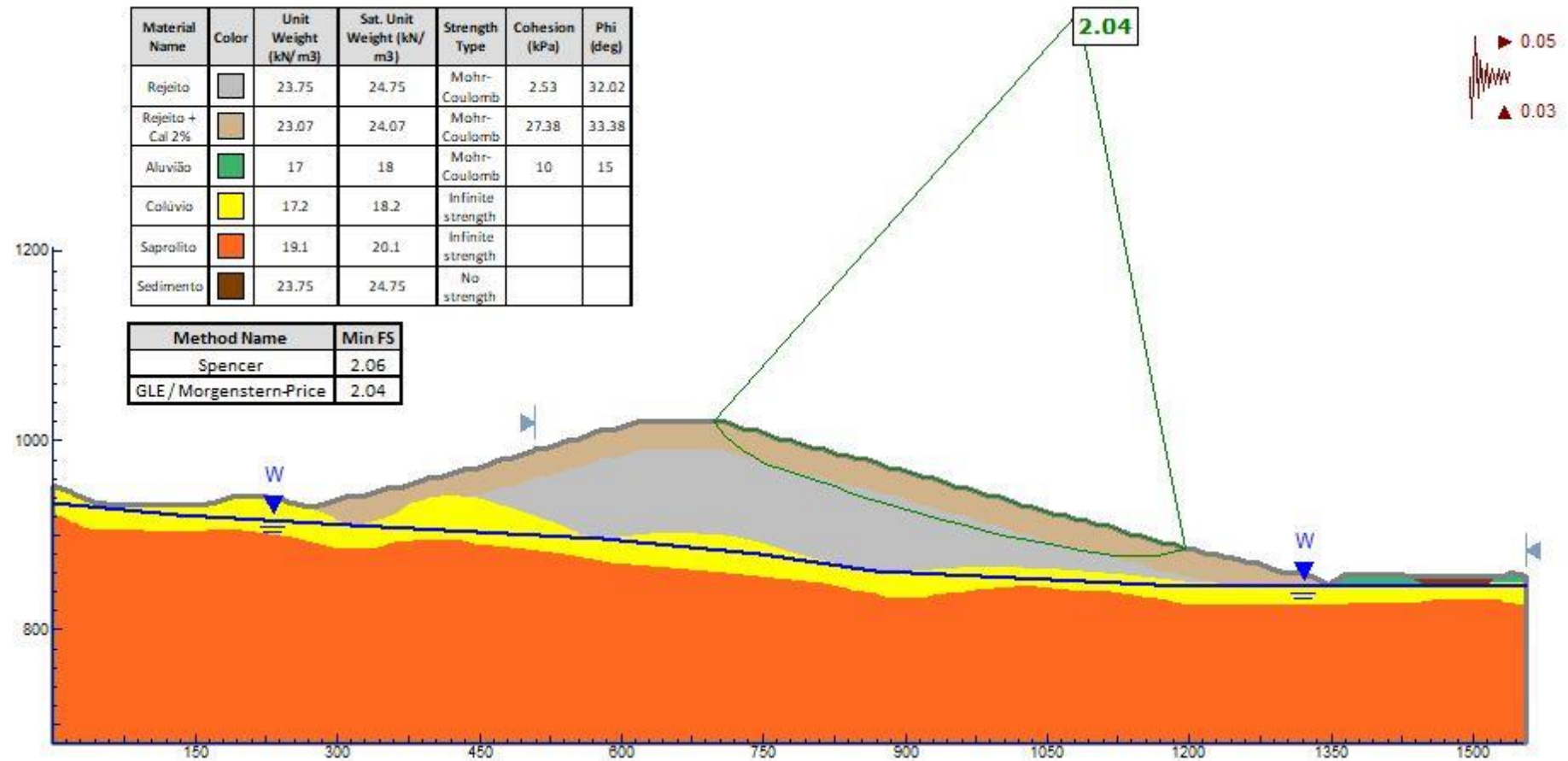
Fonte: Autoria própria

Figura 201 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



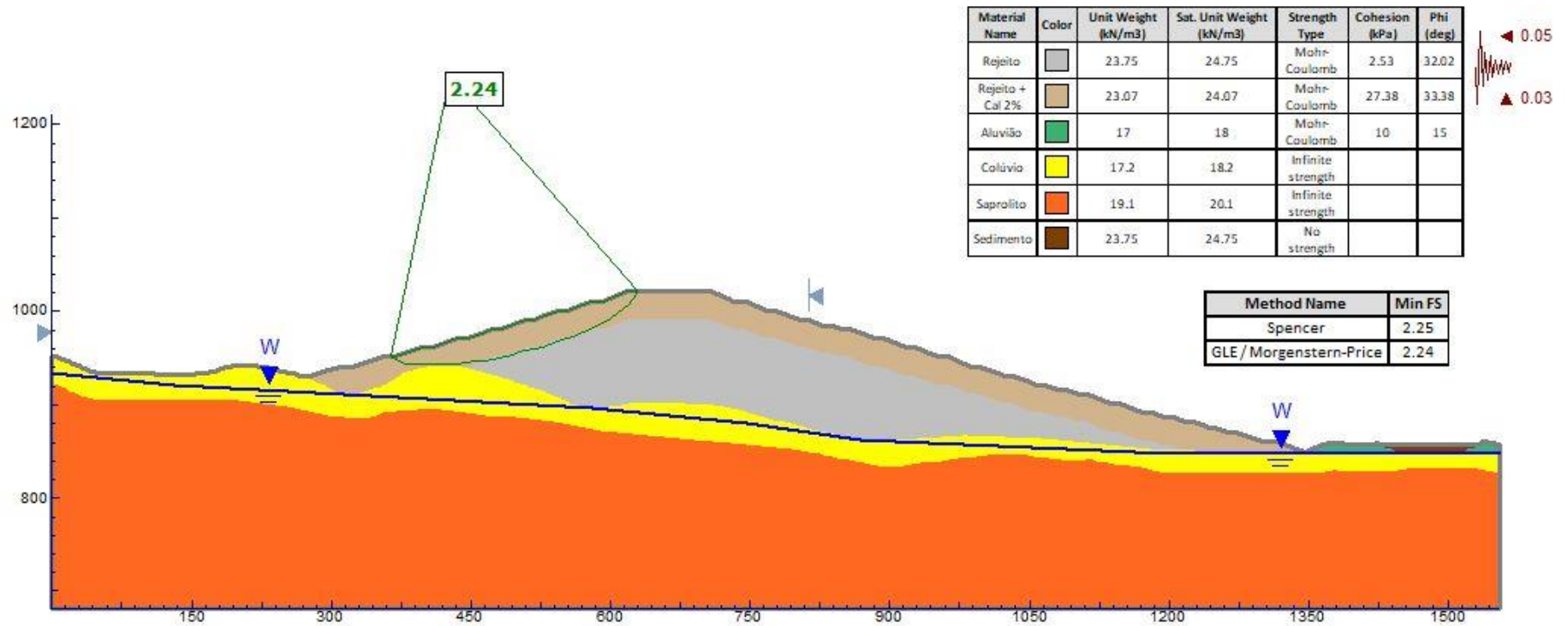
Fonte: Autoria própria

Figura 202 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

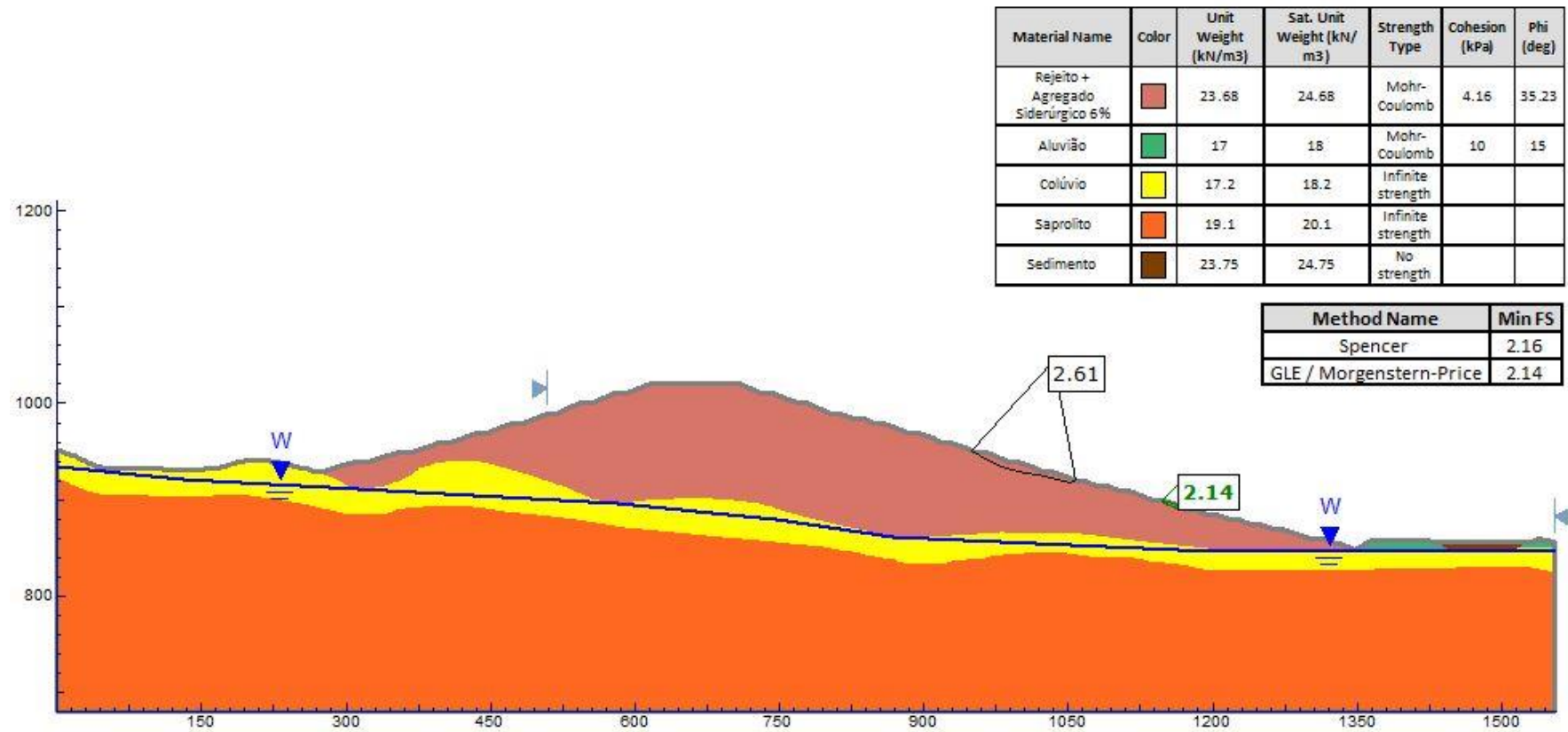
Figura 203 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

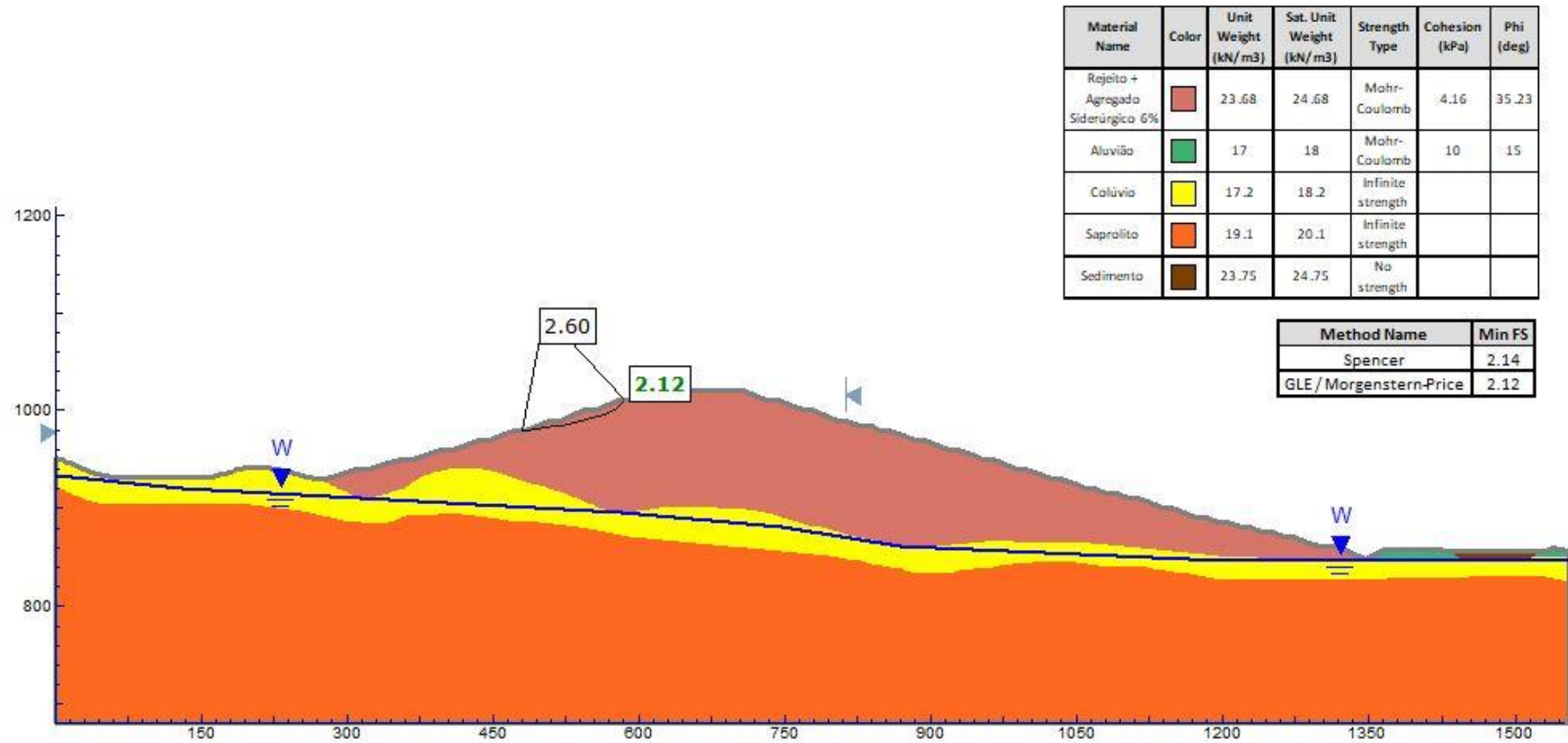
## REJEITO + 6% DE AGREGADO SIDERÚRGICO

Figura 204 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



Fonte: Autoria própria

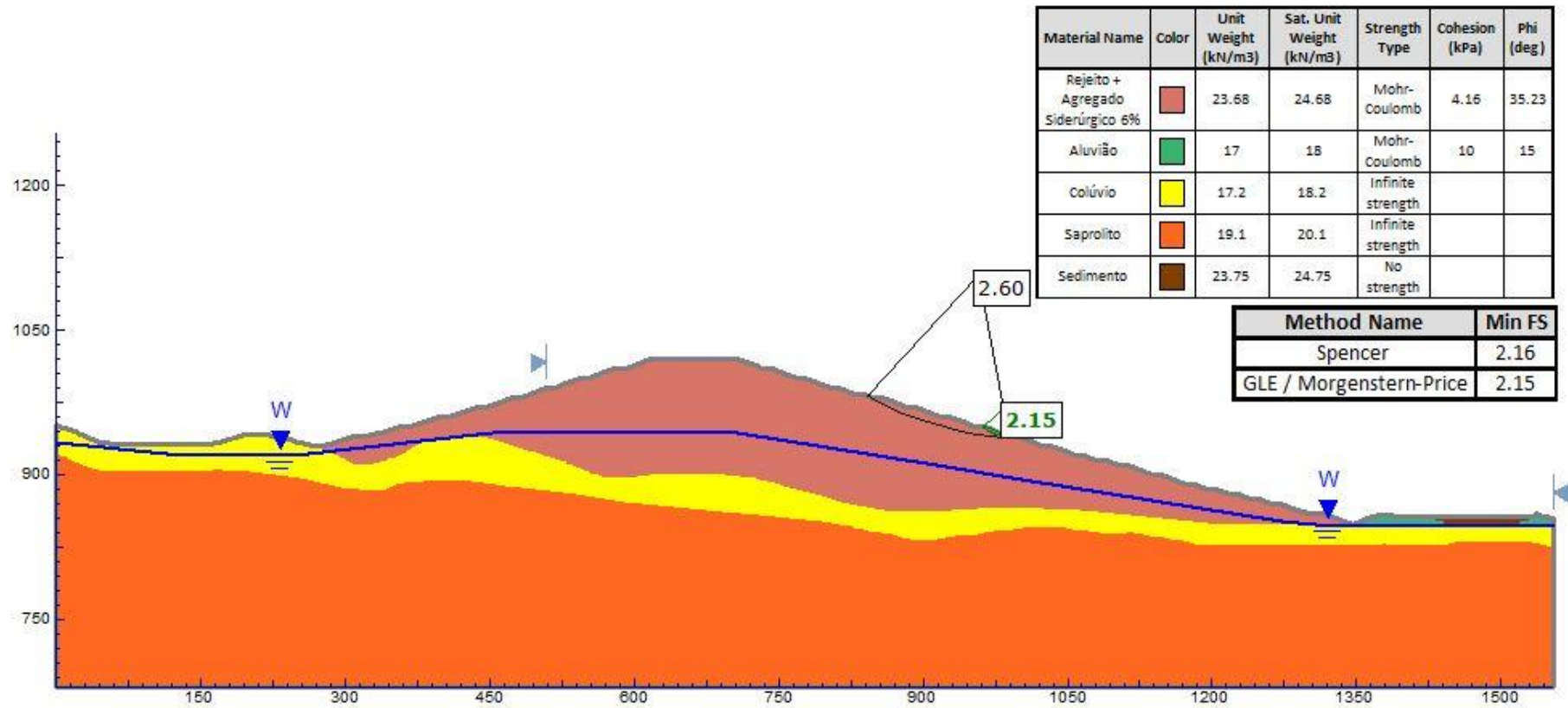
Figura 205 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

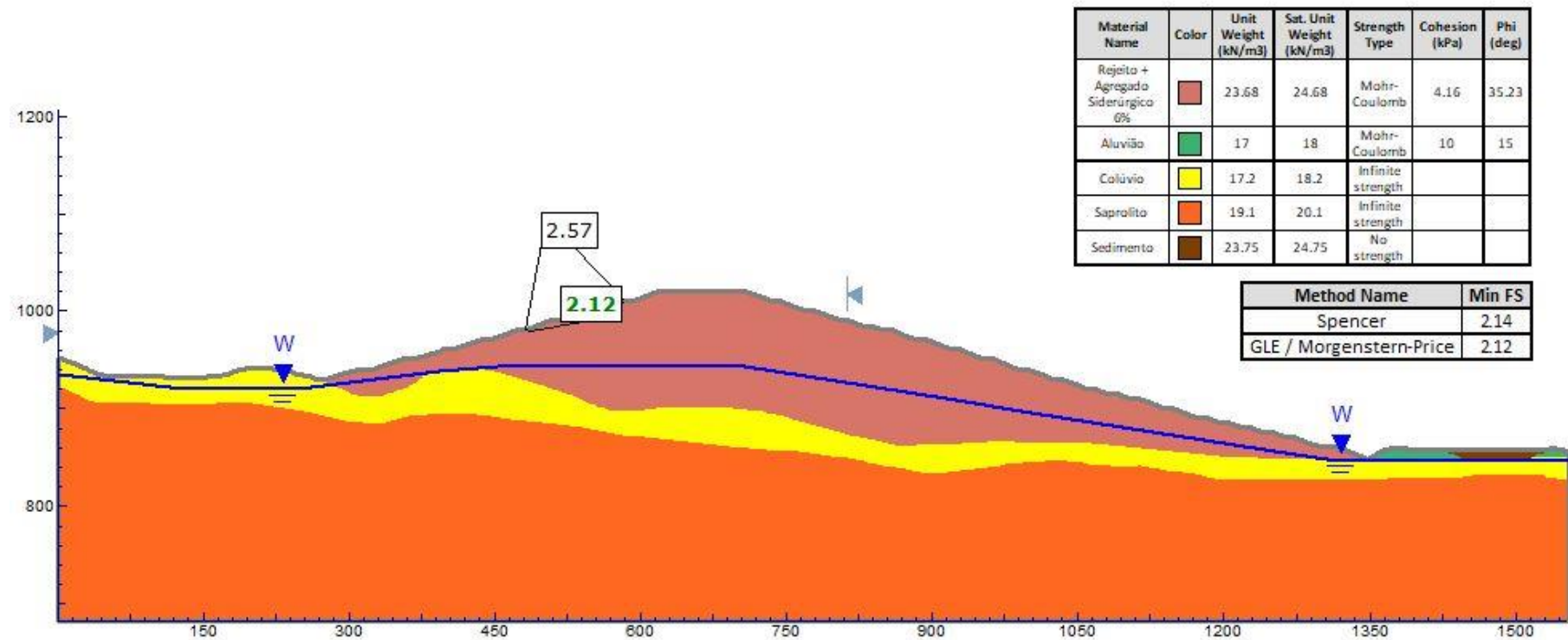


Figura 206 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



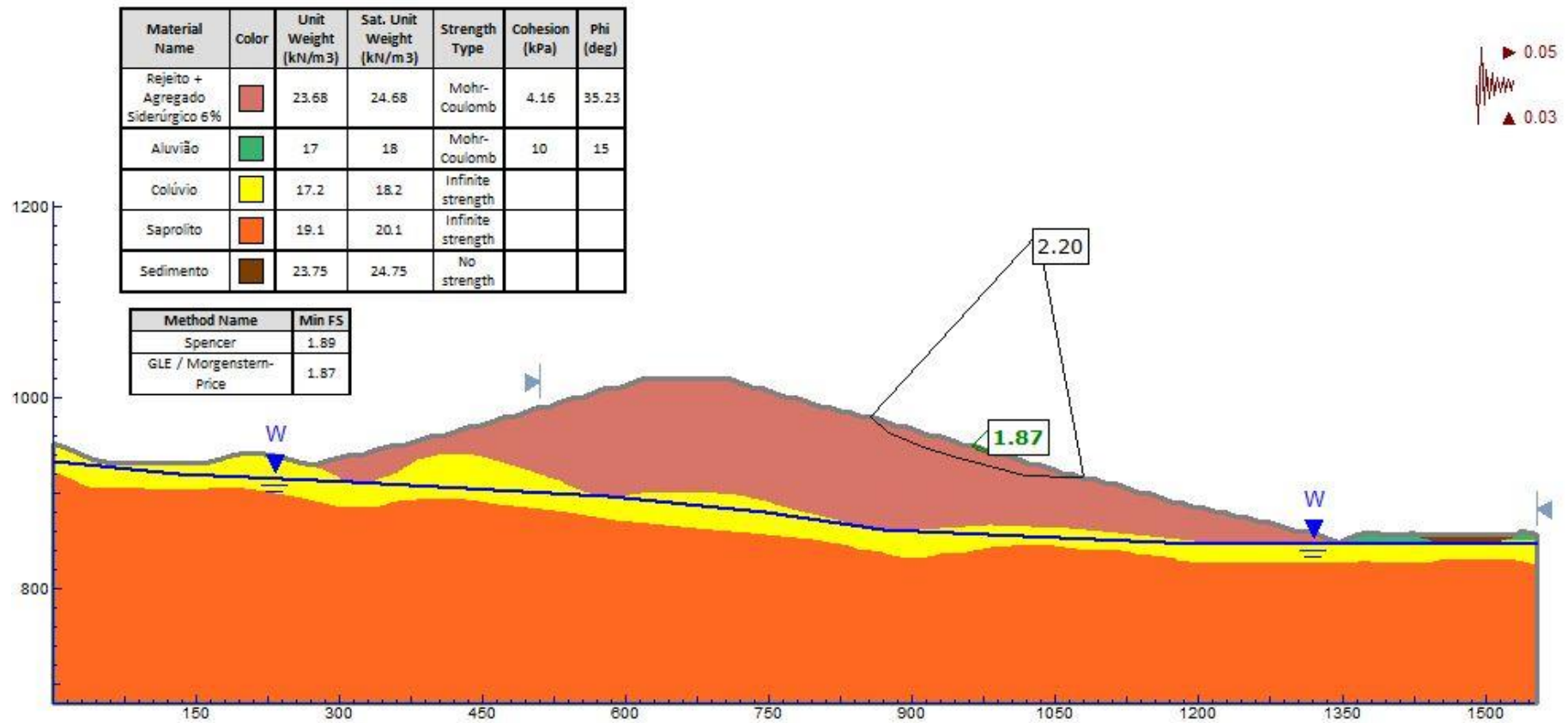
Fonte: Autoria própria

Figura 207 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



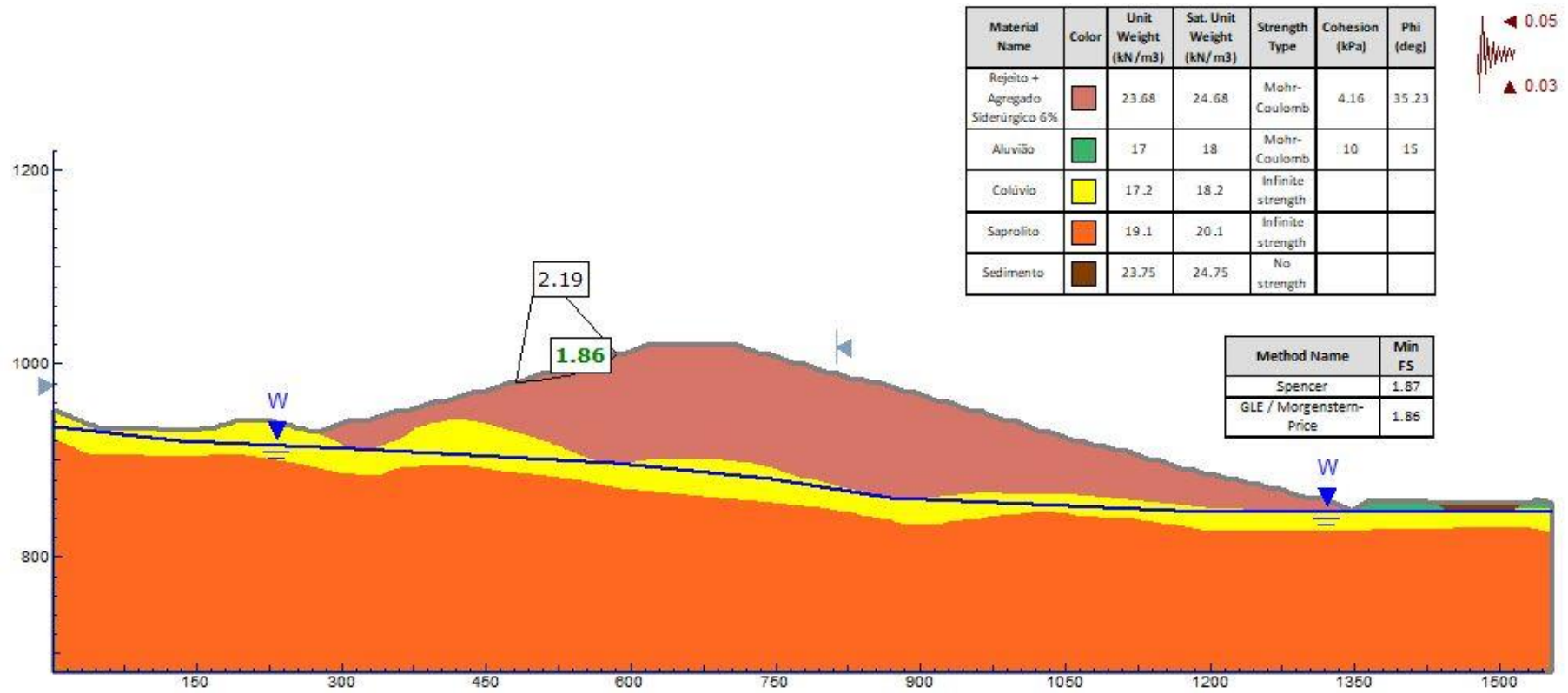
Fonte: Autoria própria

Figura 208 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



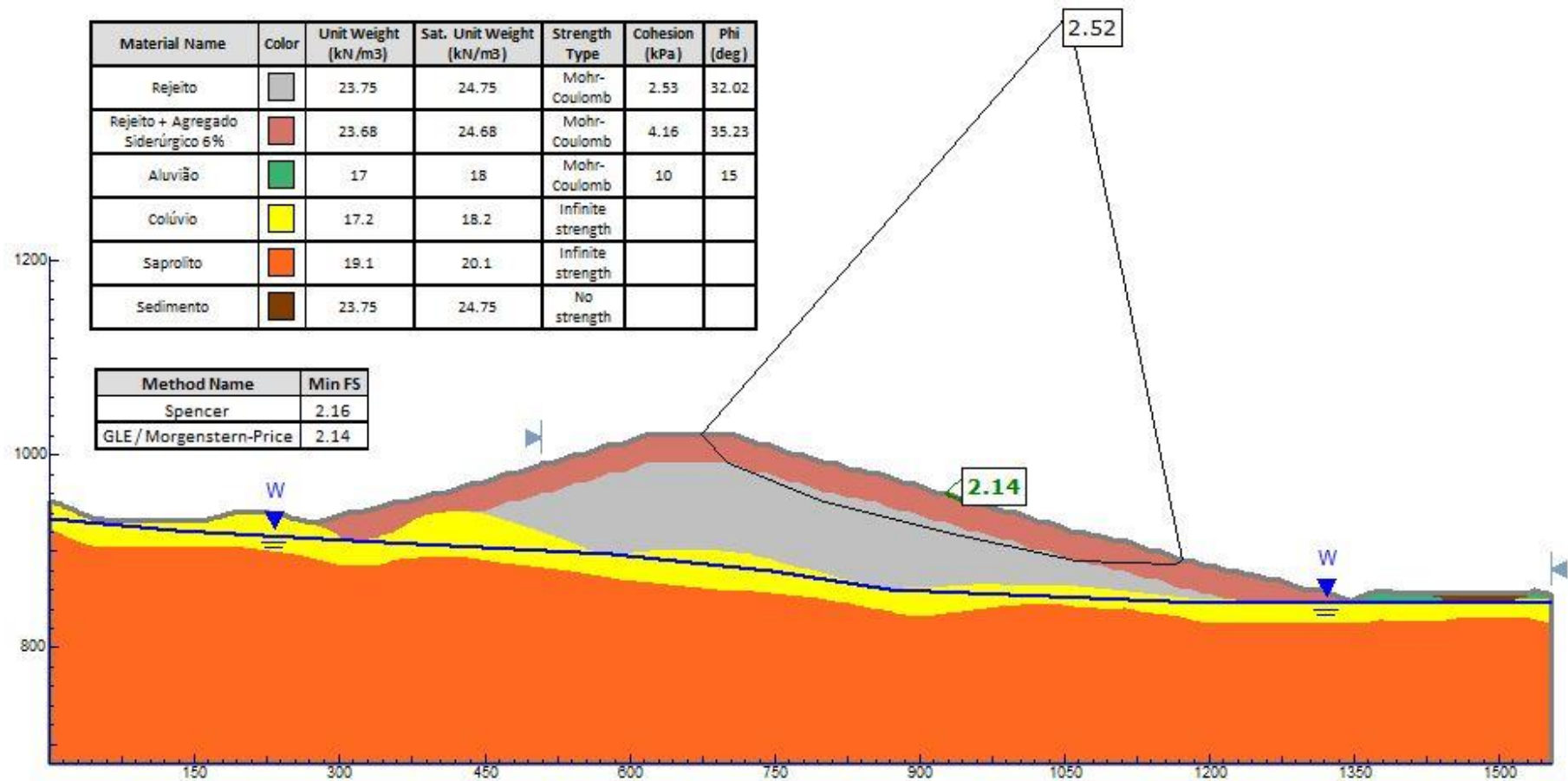
Fonte: Autoria própria

Figura 209 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



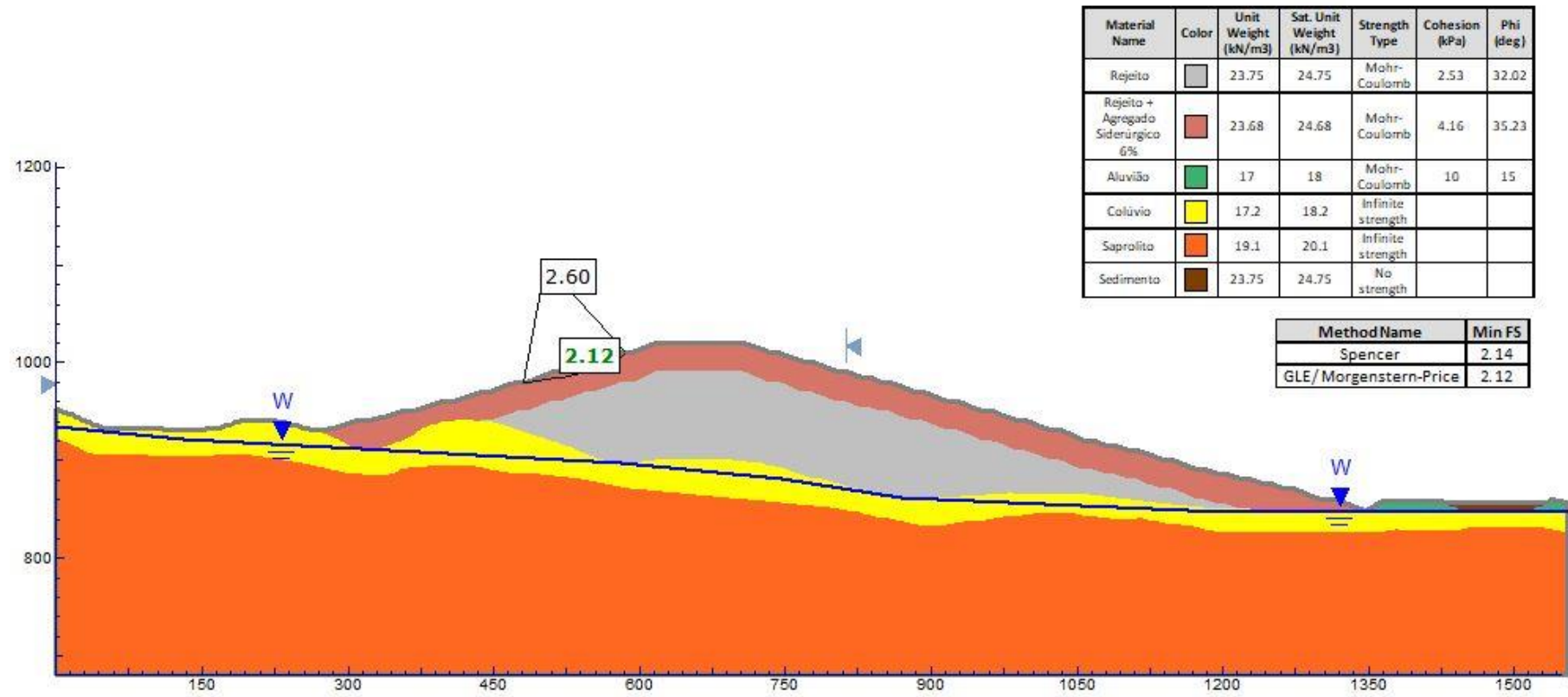
Fonte: Autoria própria

Figura 210 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo –  
Superfície freática normal – Talude direito



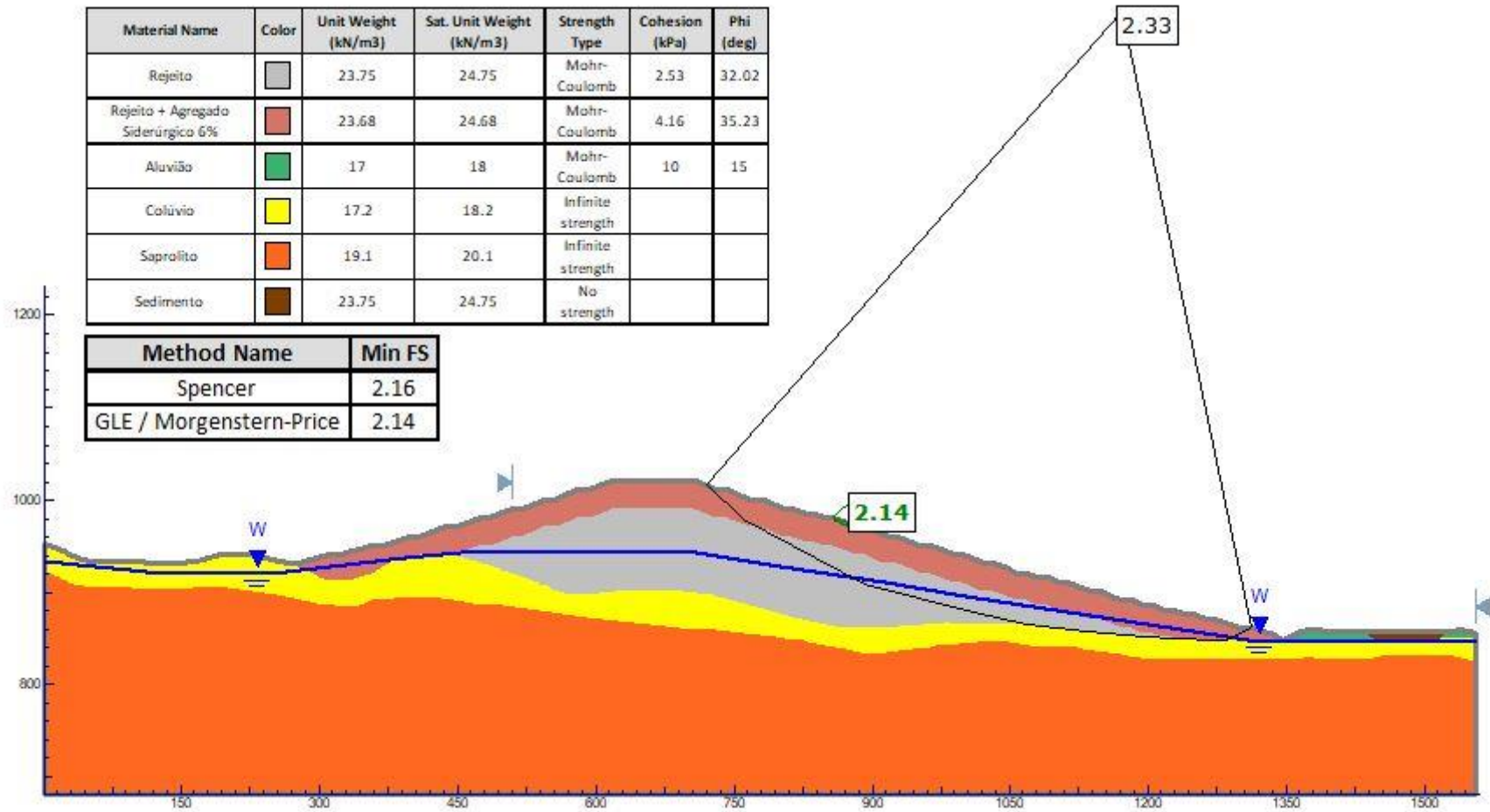
Fonte: Autoria própria

Figura 211 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo



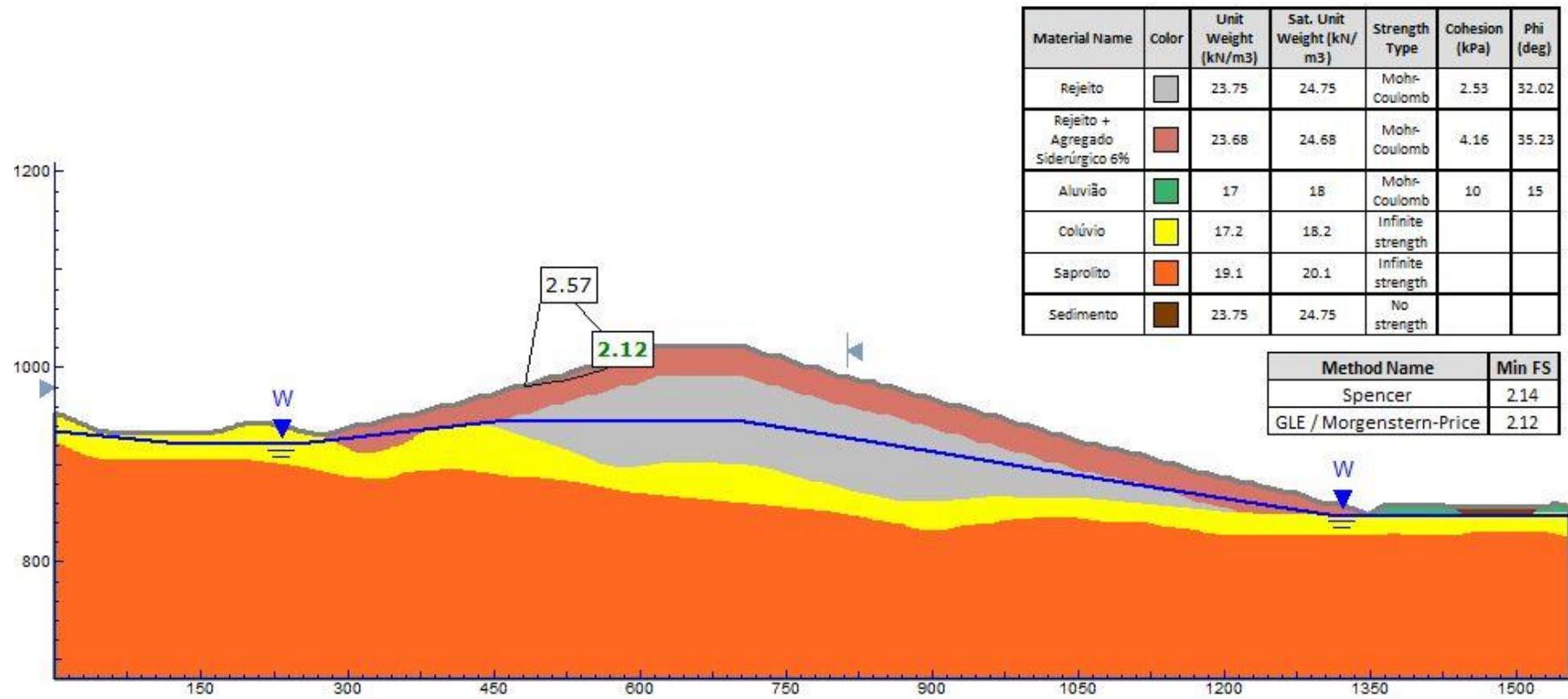
Fonte: Autoria própria

Figura 212 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo –  
Superfície freática crítica – Talude direito



Fonte: Autoria própria

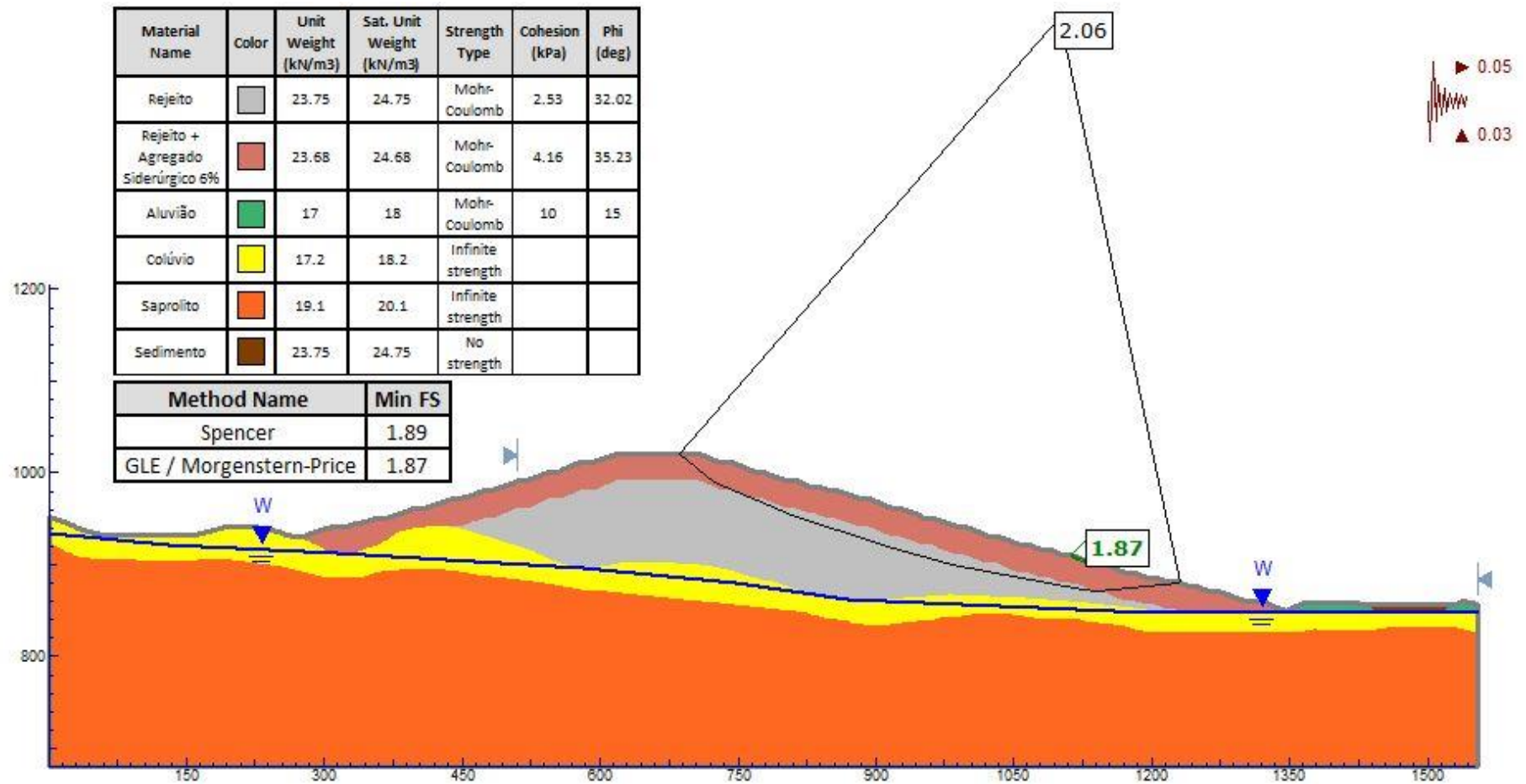
Figura 213 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

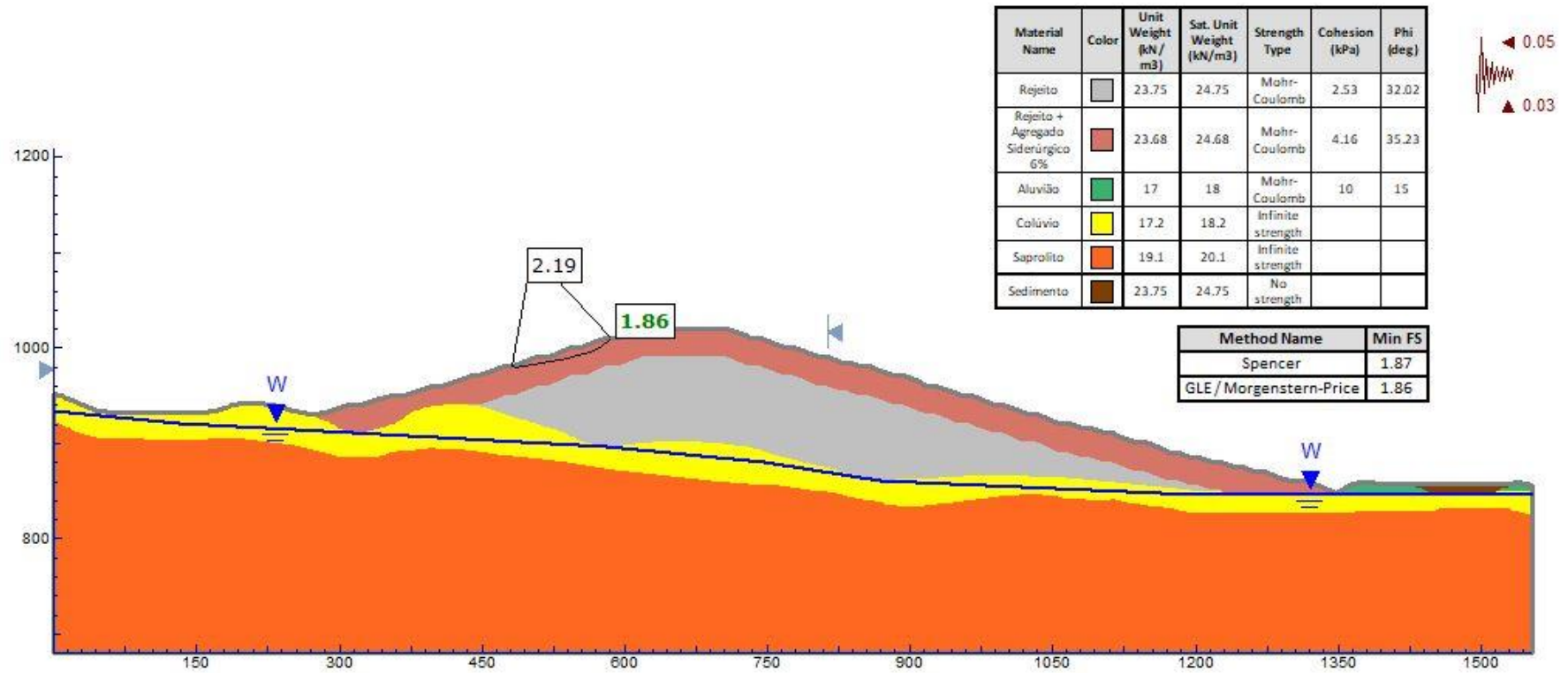


Figura 214 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

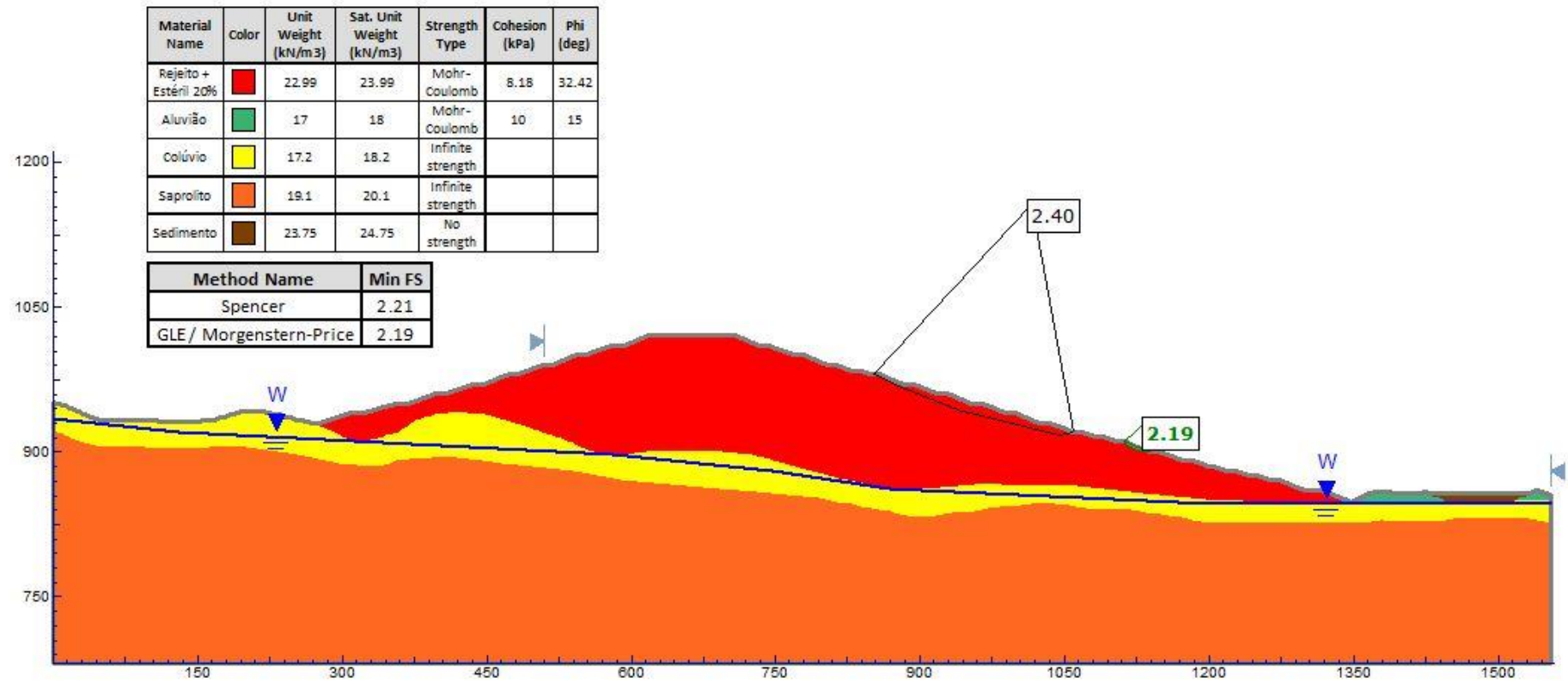
Figura 215 – Análise de estabilidade – Rejeito + 6% de agregado siderúrgico – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

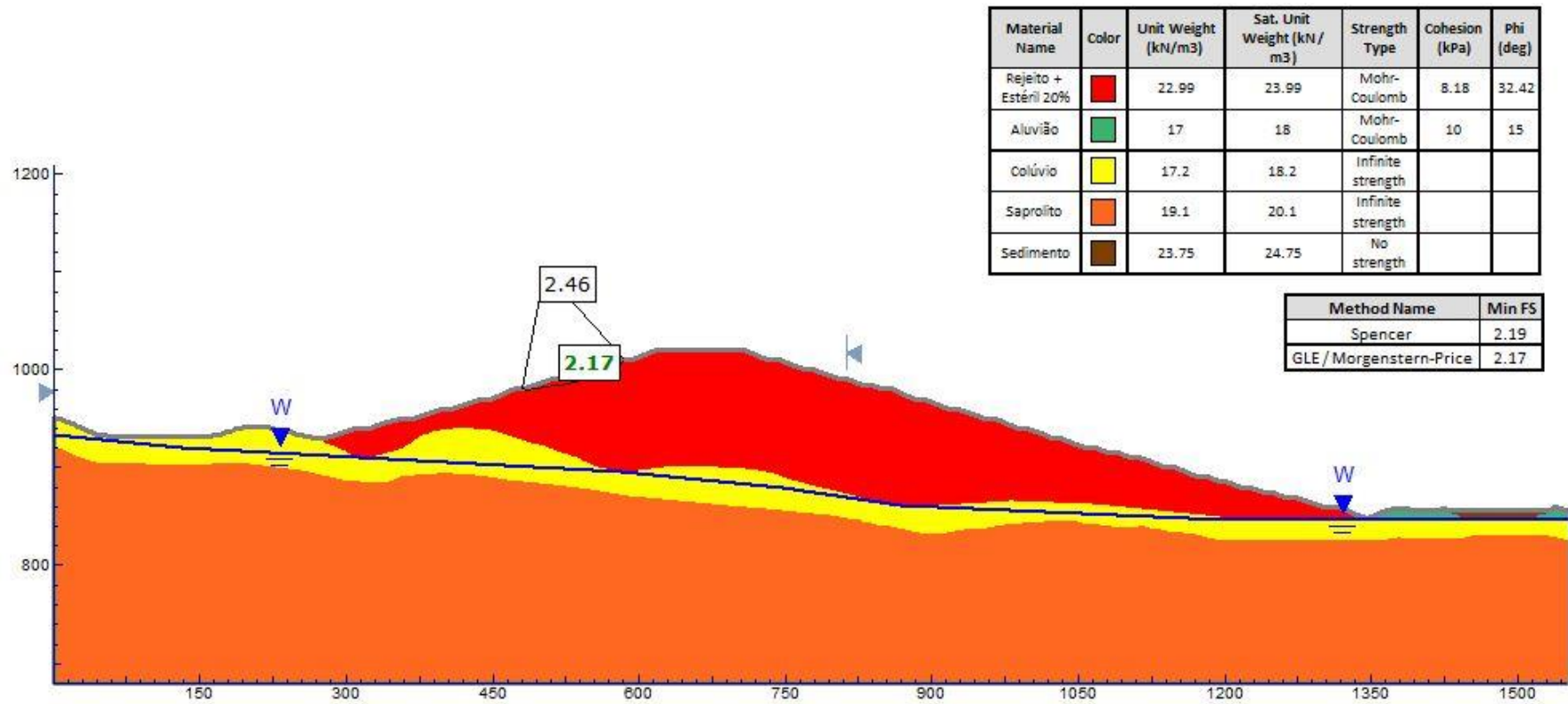
### 80% DE REJEITO + 20% DE ESTÉRIL

Figura 216 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



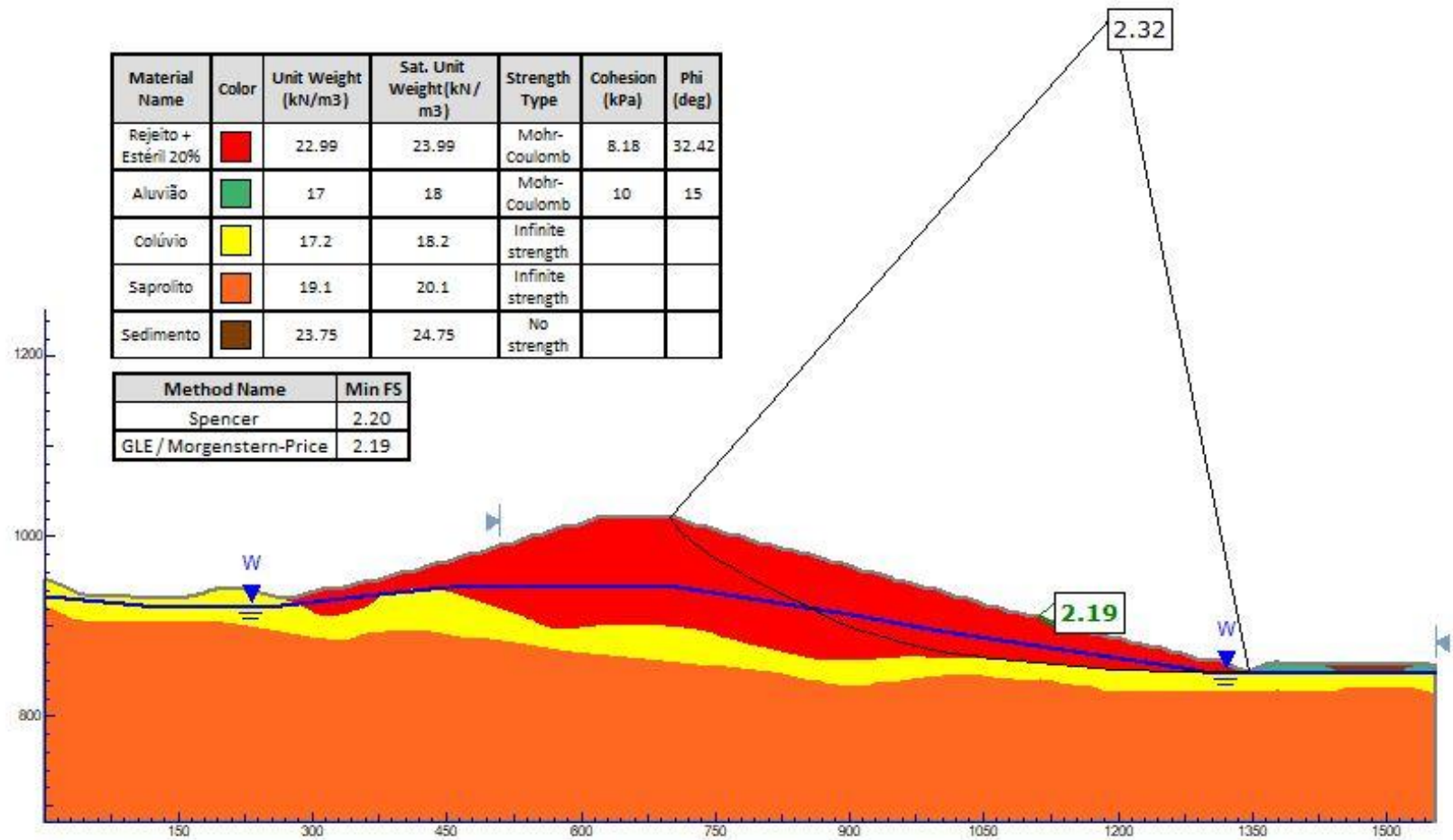
Fonte: Autoria própria

Figura 217 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



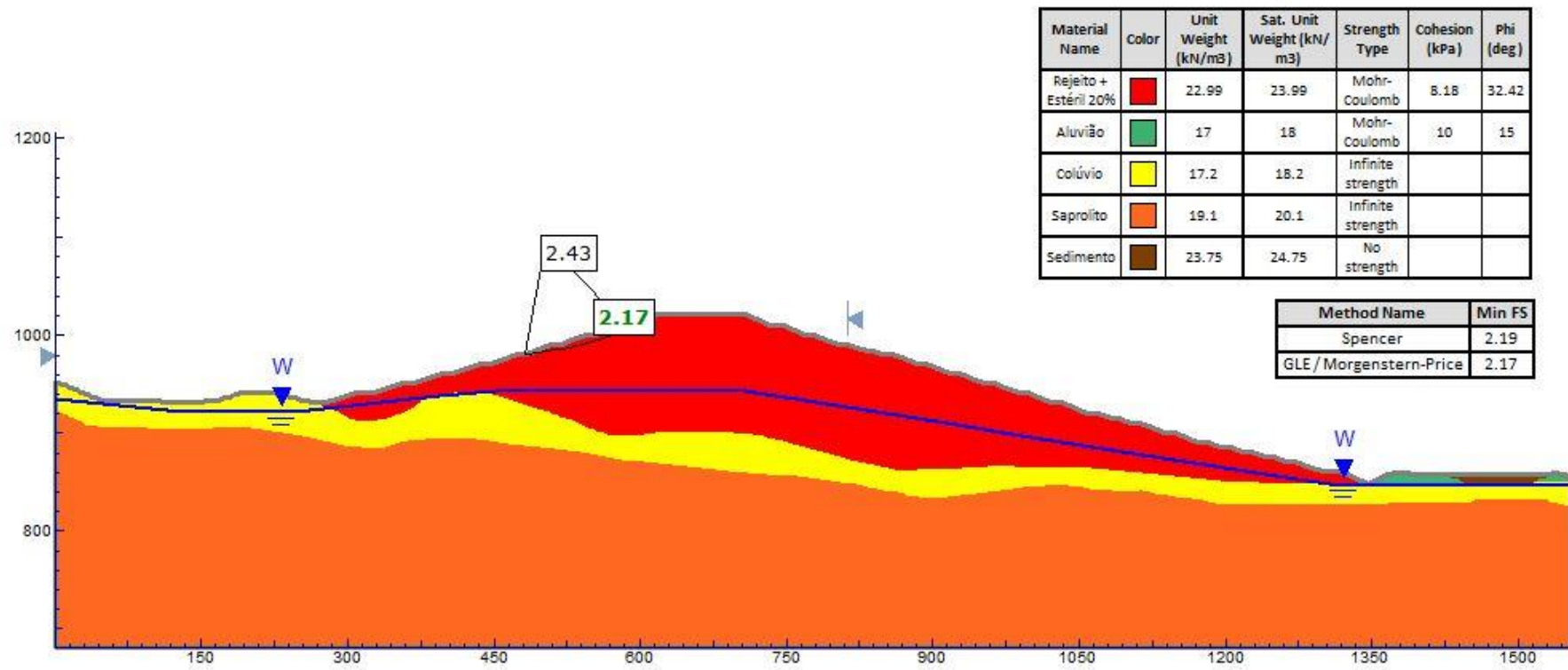
Fonte: Autoria própria

Figura 218 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



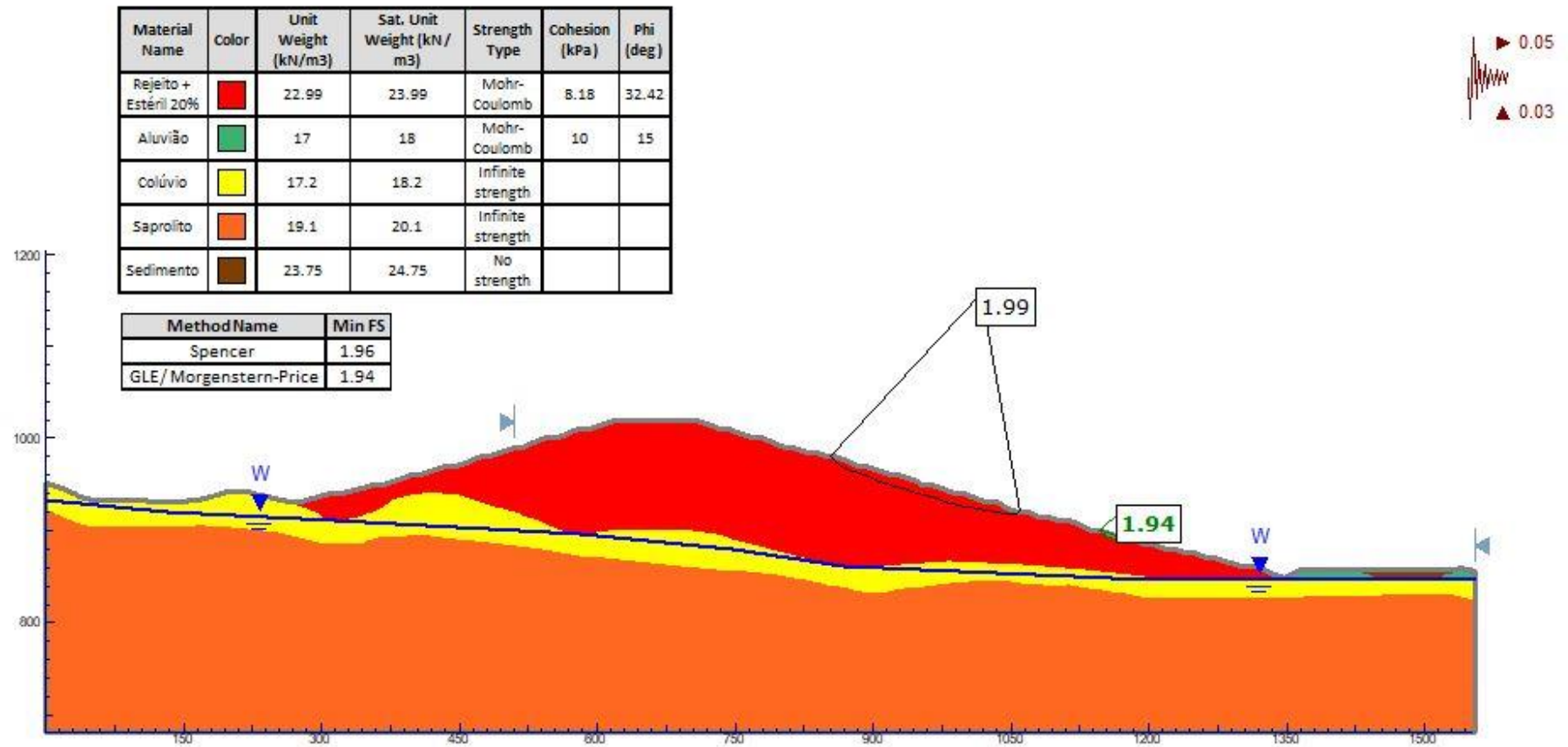
Fonte: Autoria própria

Figura 219 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



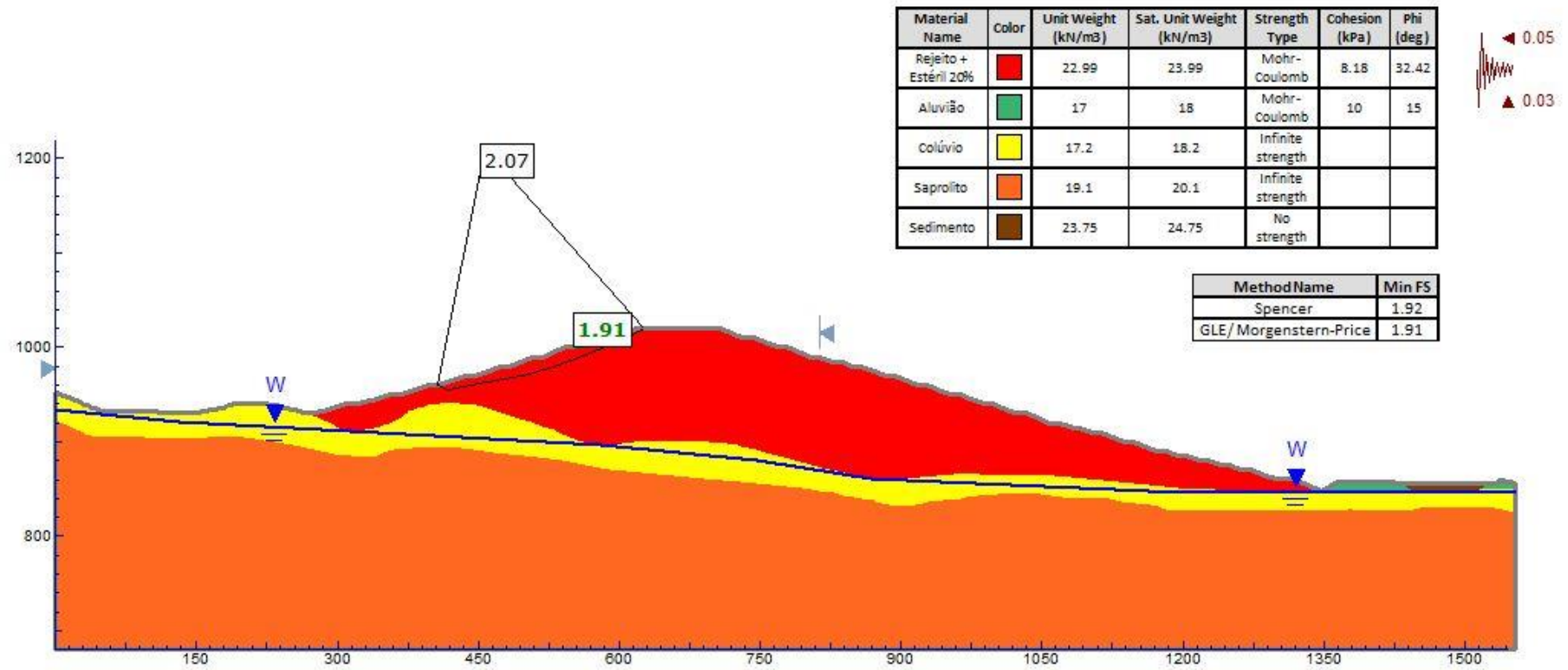
Fonte: Autoria própria

Figura 220 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

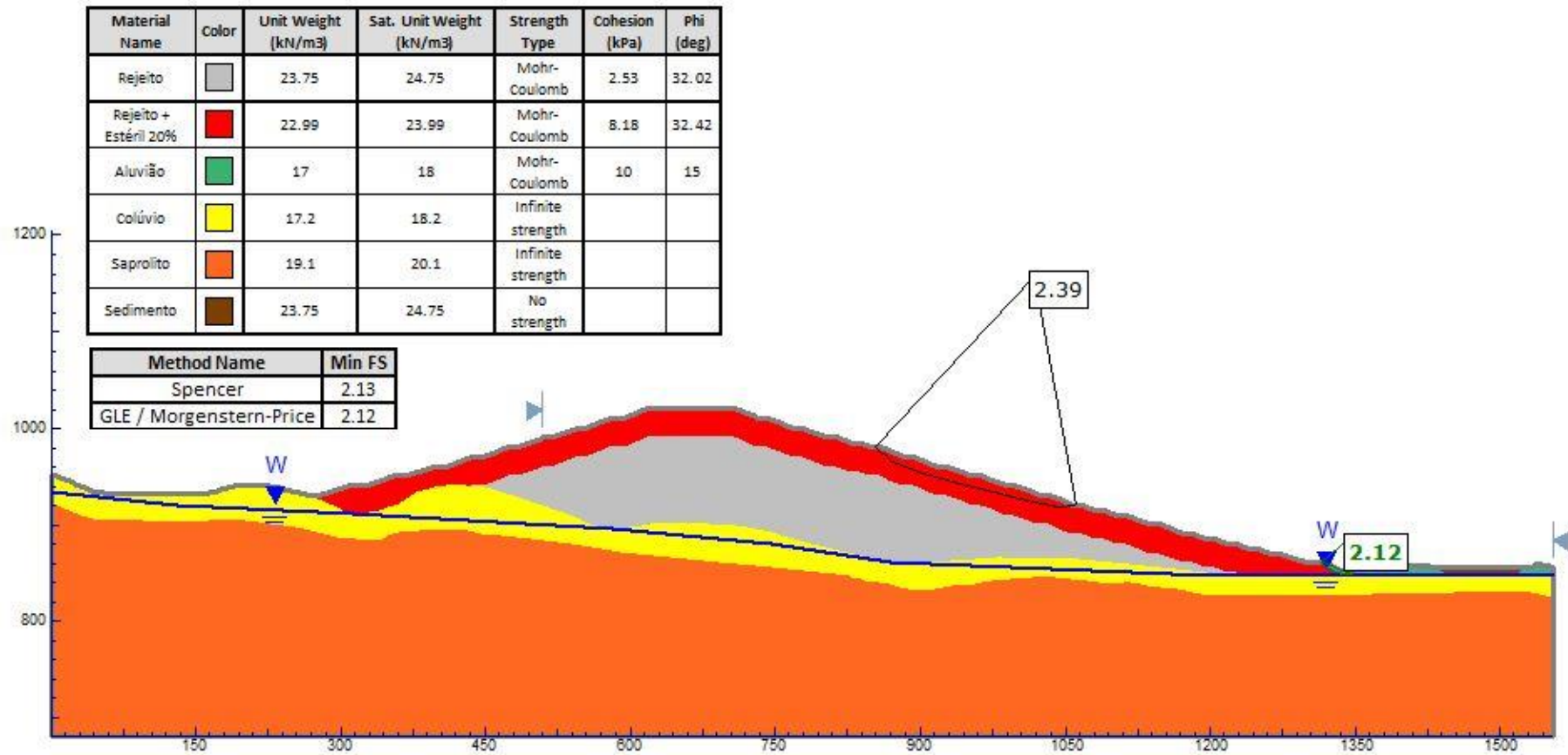
Figura 221 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

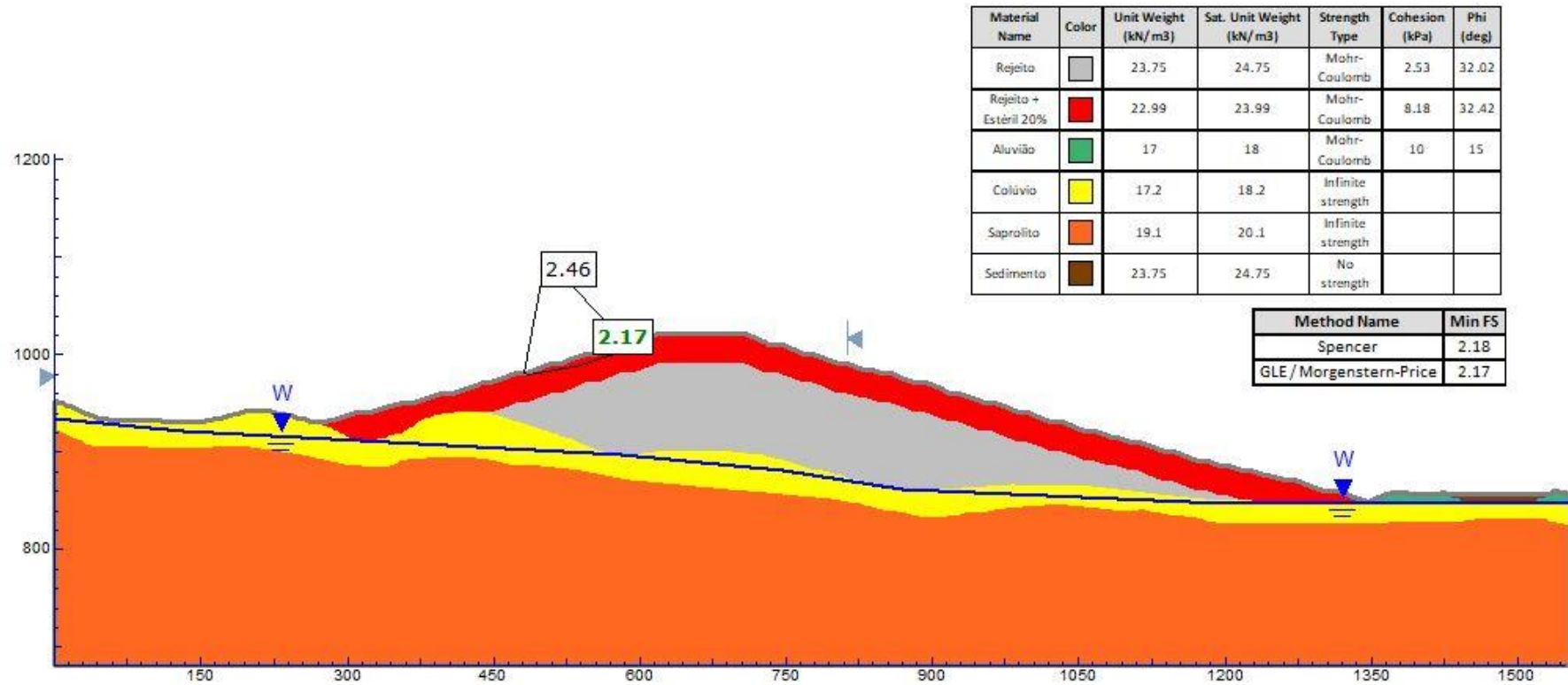


Figura 222 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude direito



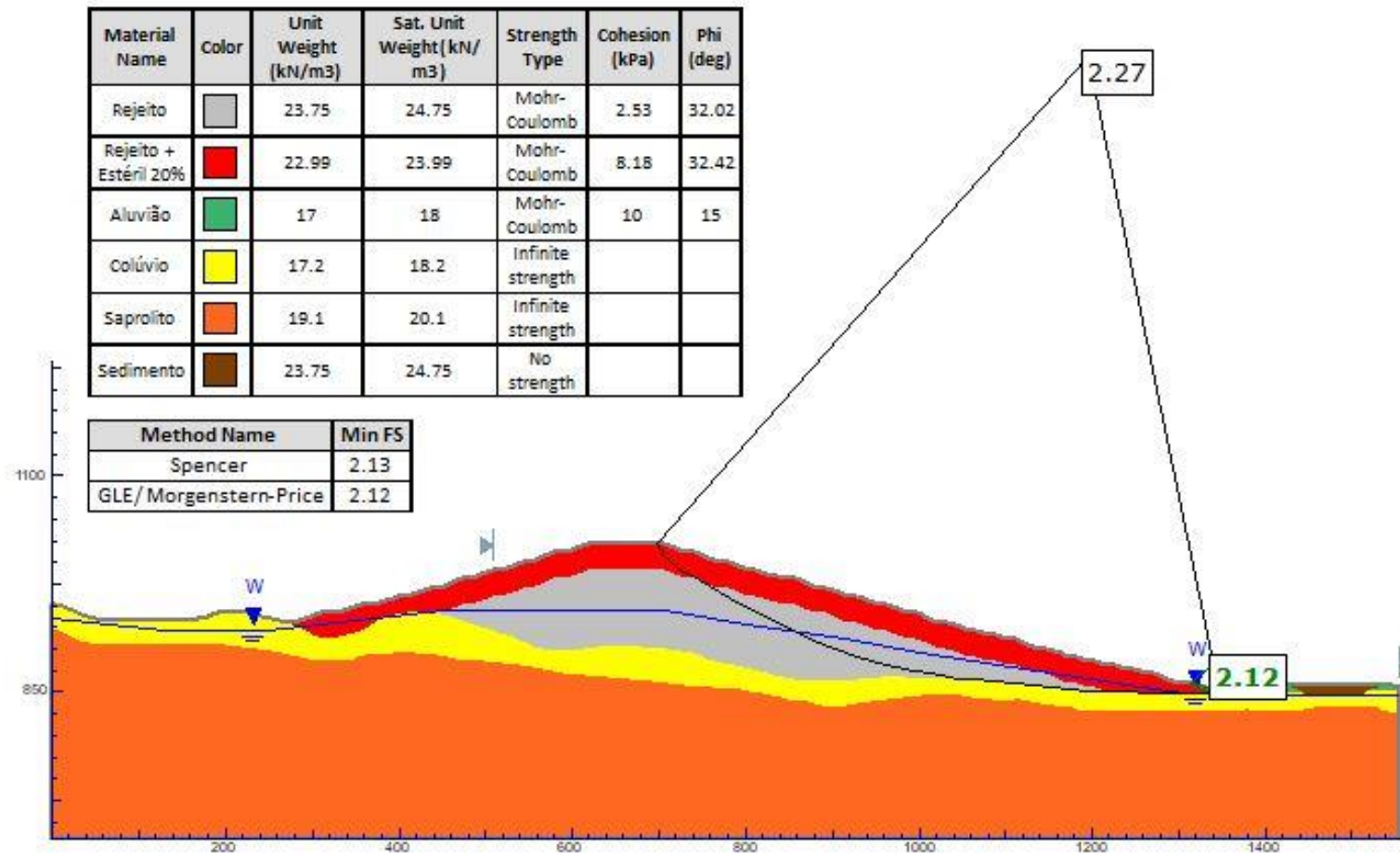
Fonte: Autoria própria

Figura 223 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática normal – Talude esquerdo



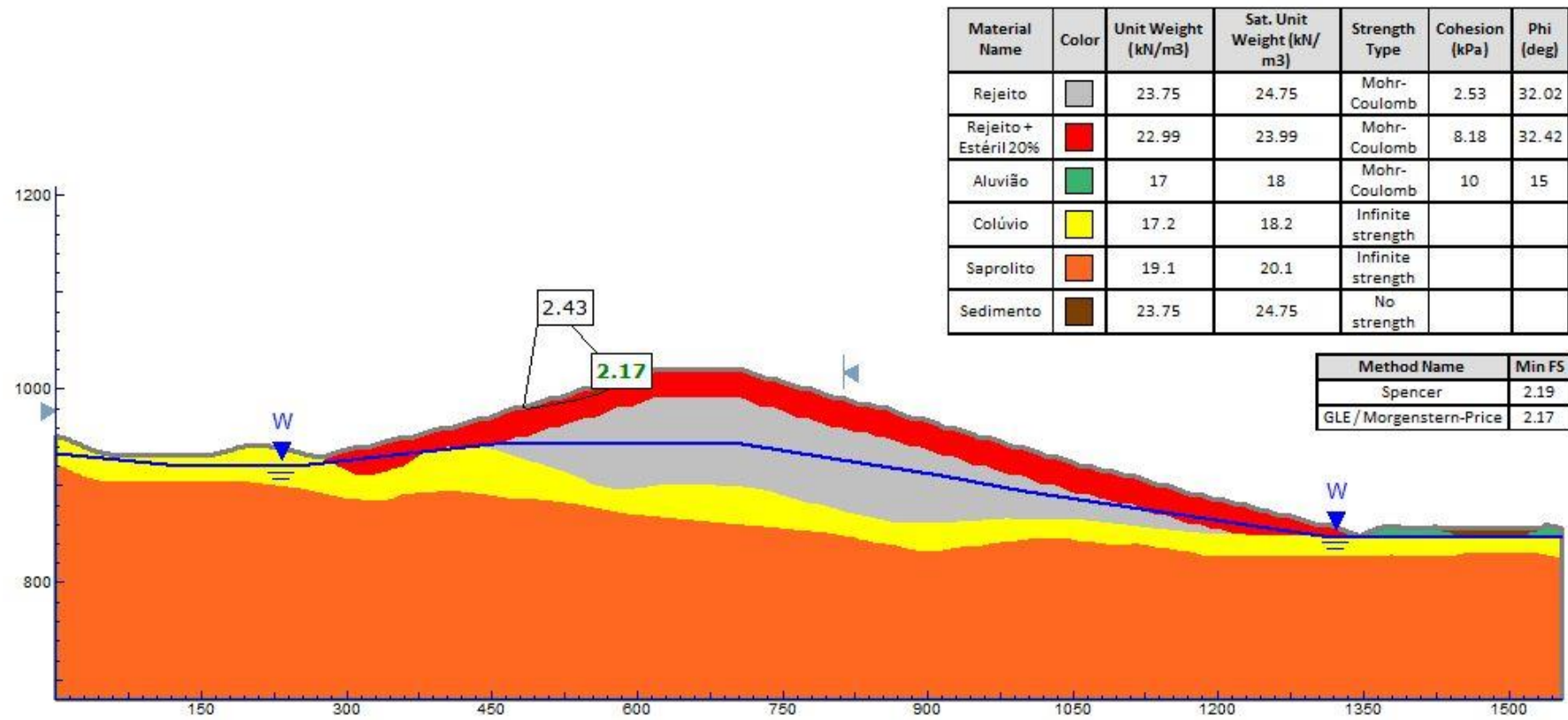
Fonte: Autoria própria

Figura 224 – Análise de estabilidade – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude direito



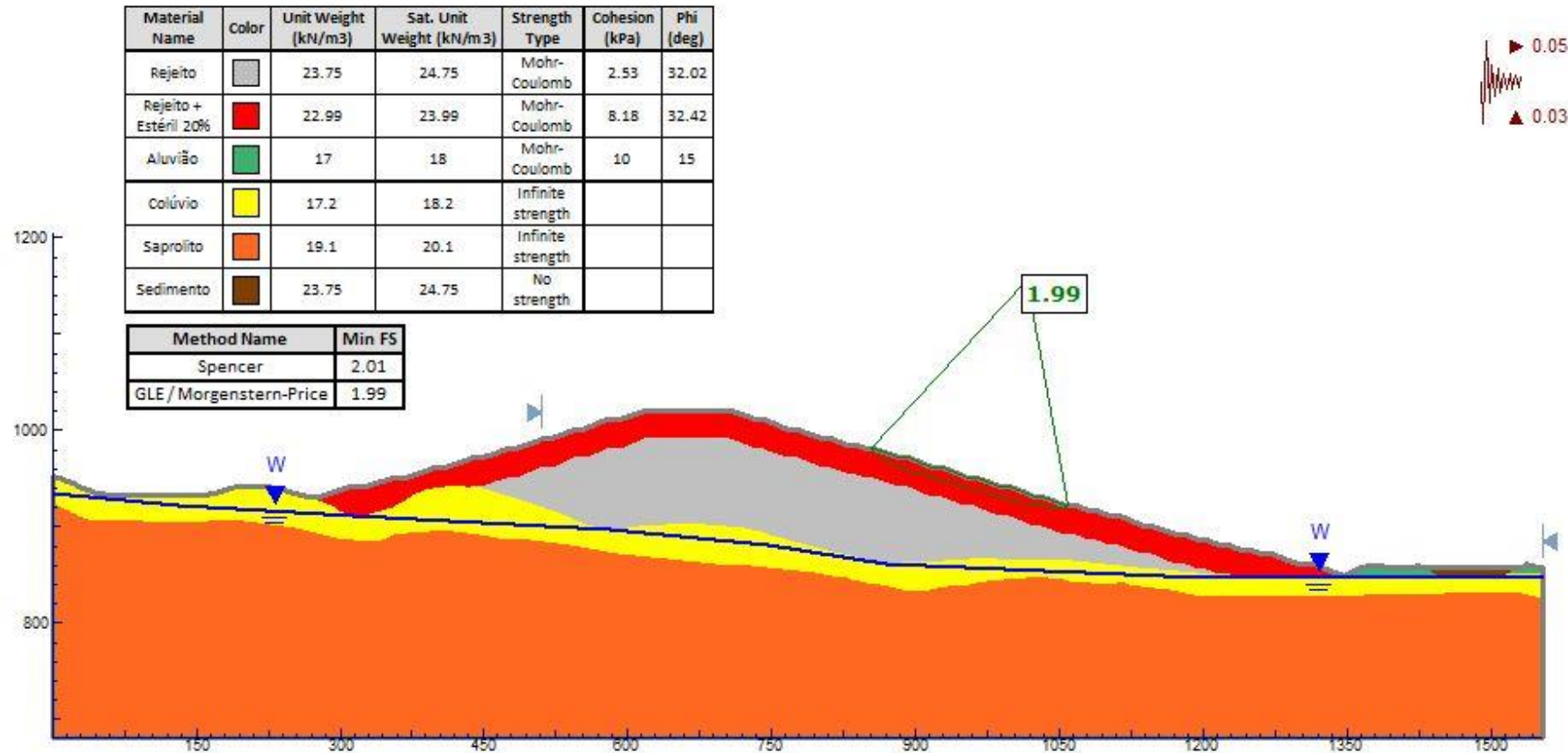
Fonte: Autoria própria

Figura 225 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



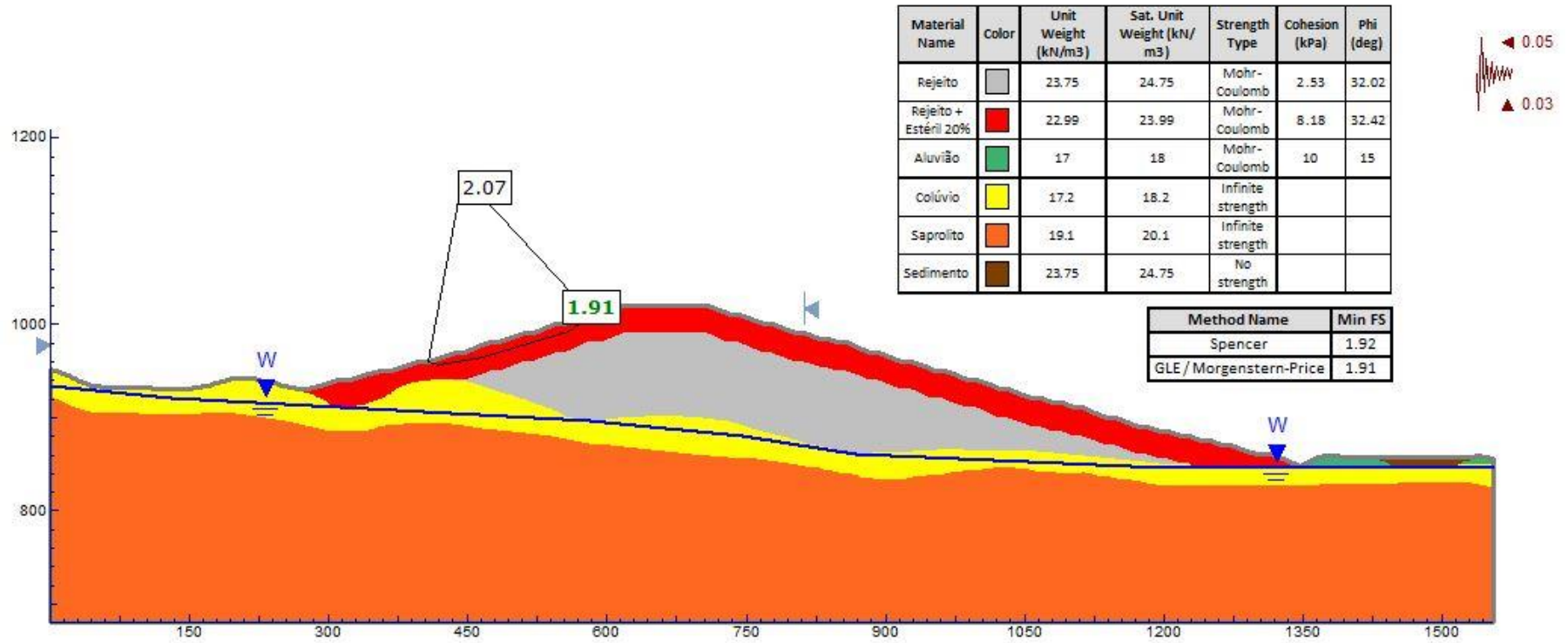
Fonte: Autoria própria

Figura 226 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

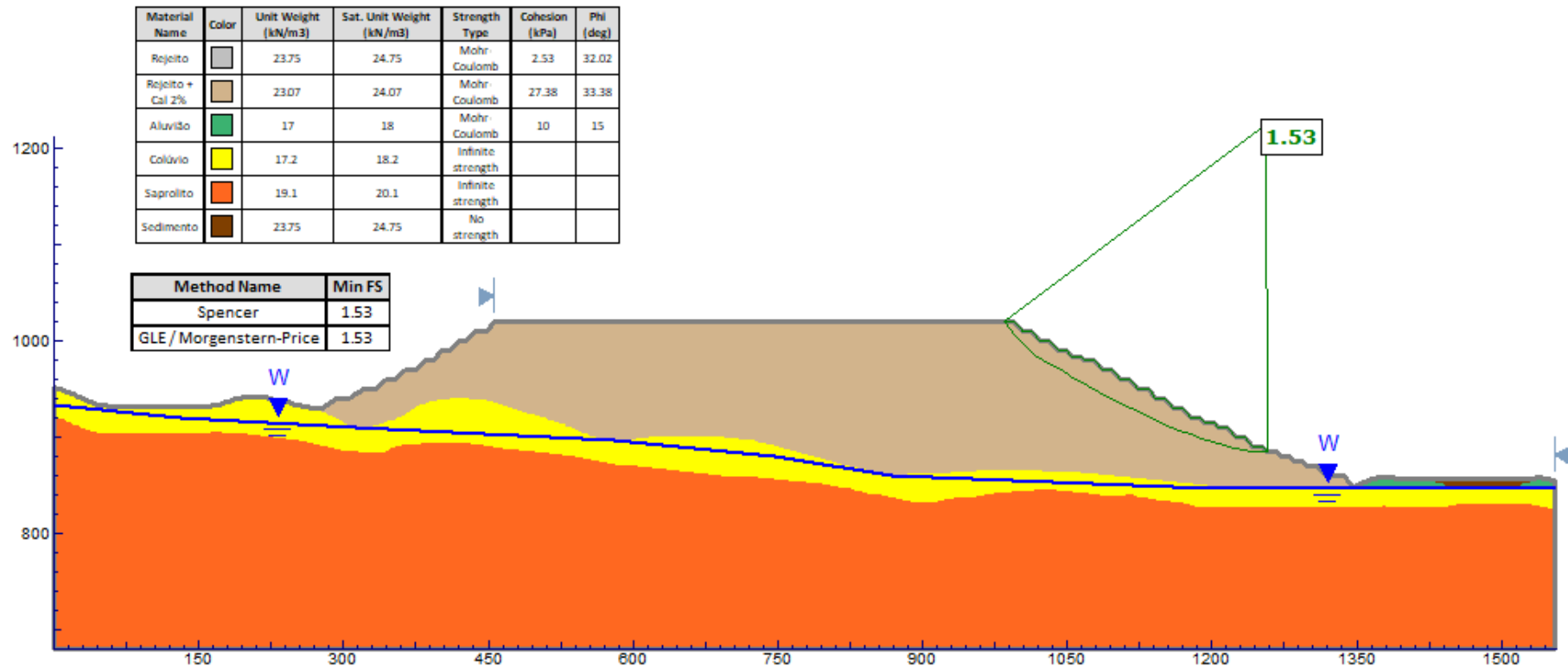
Figura 227 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Pilha de 172 m – Face da pilha com utilização de aditivo – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

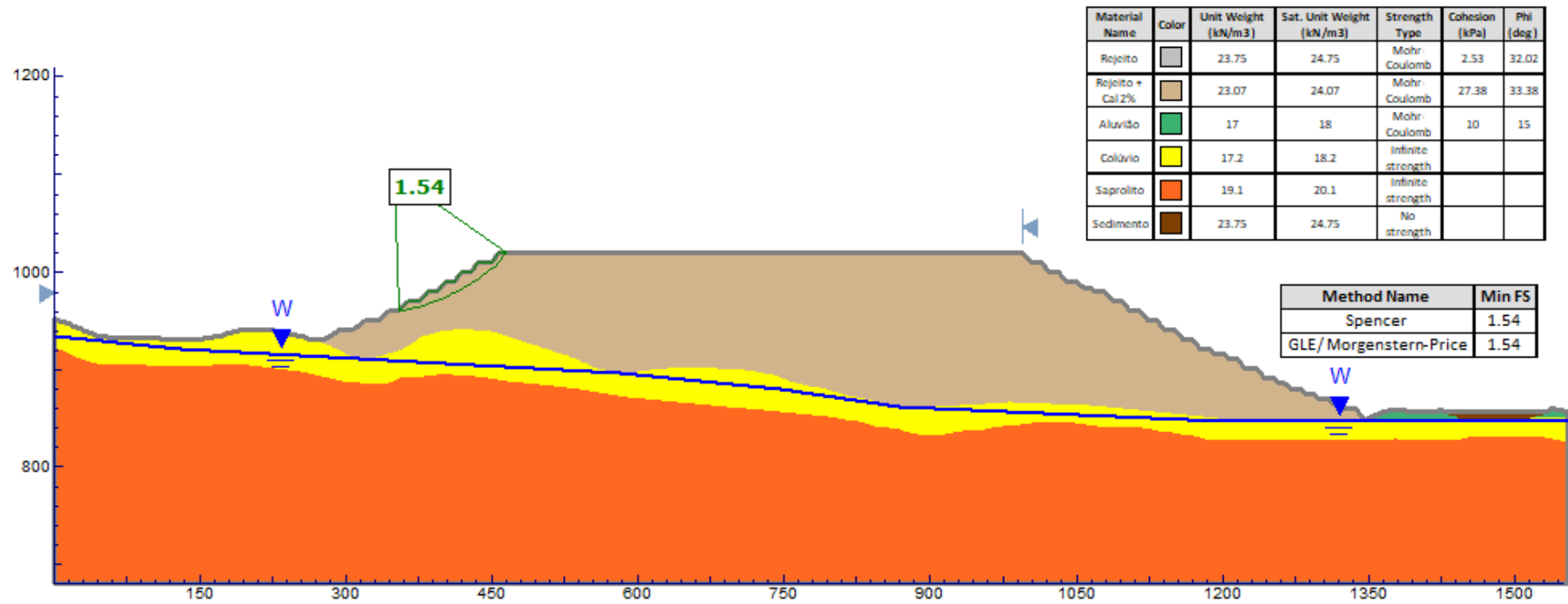
## REJEITO + 2% DE CAL – OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GERAL DOS TALUDES

Figura 228 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único  
– Superfície freática normal – Talude direito



Fonte: Autoria própria

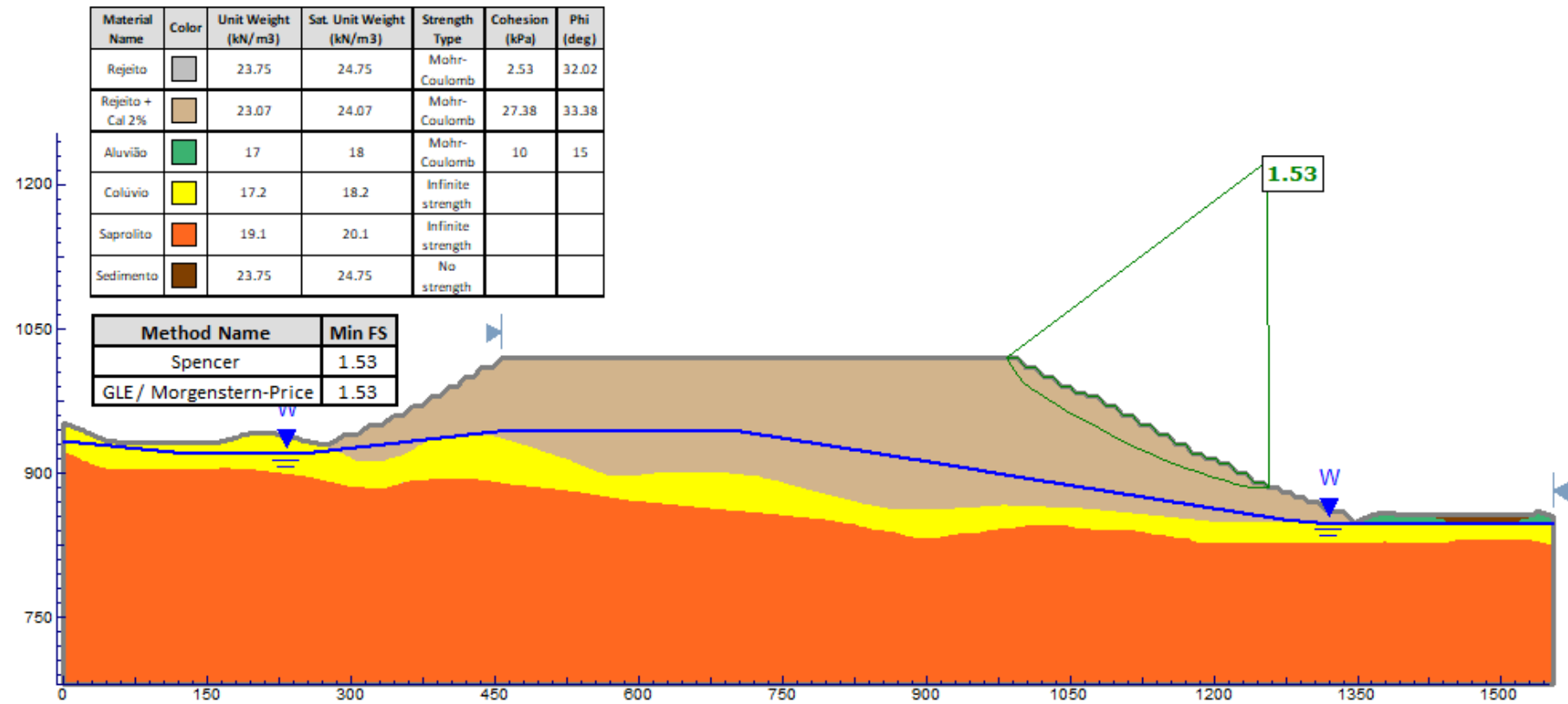
Figura 229 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único  
 – Superfície freática normal – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

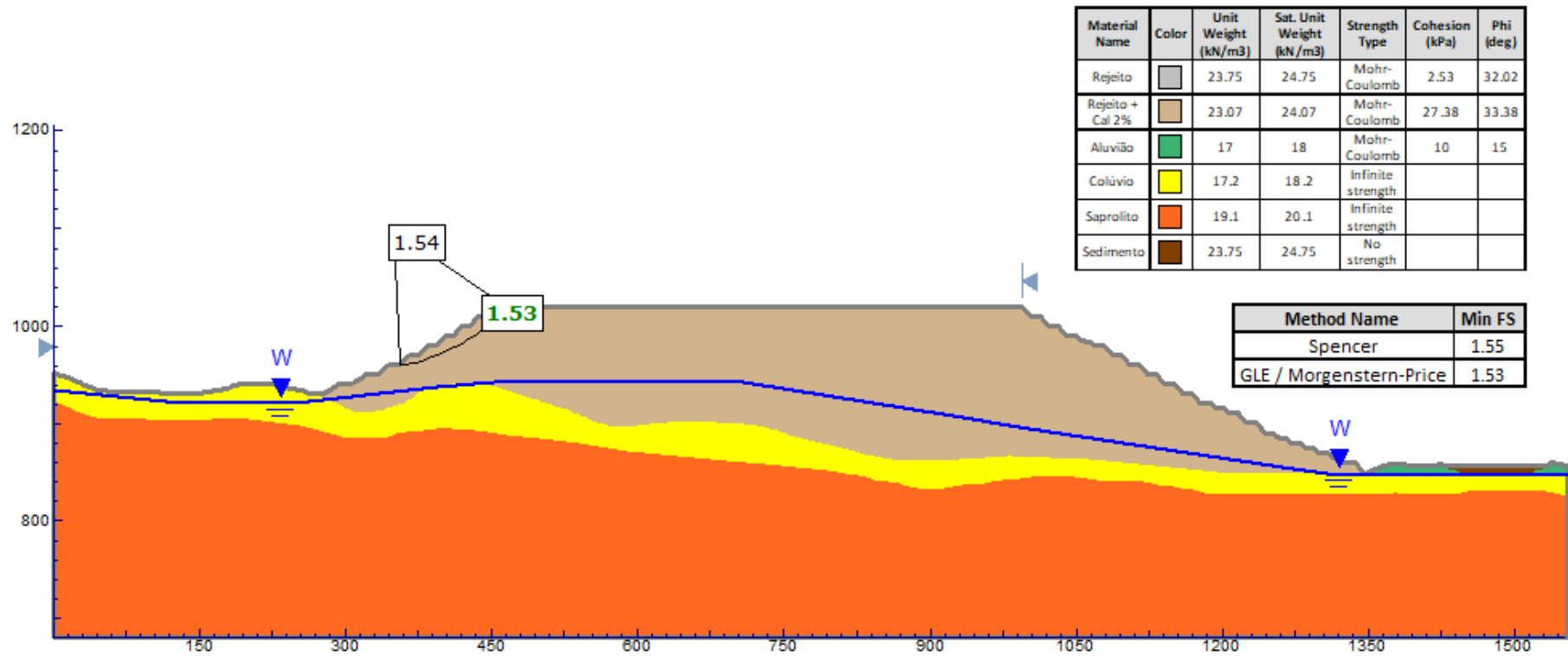


Figura 230 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único  
– Superfície freática crítica – Talude direito



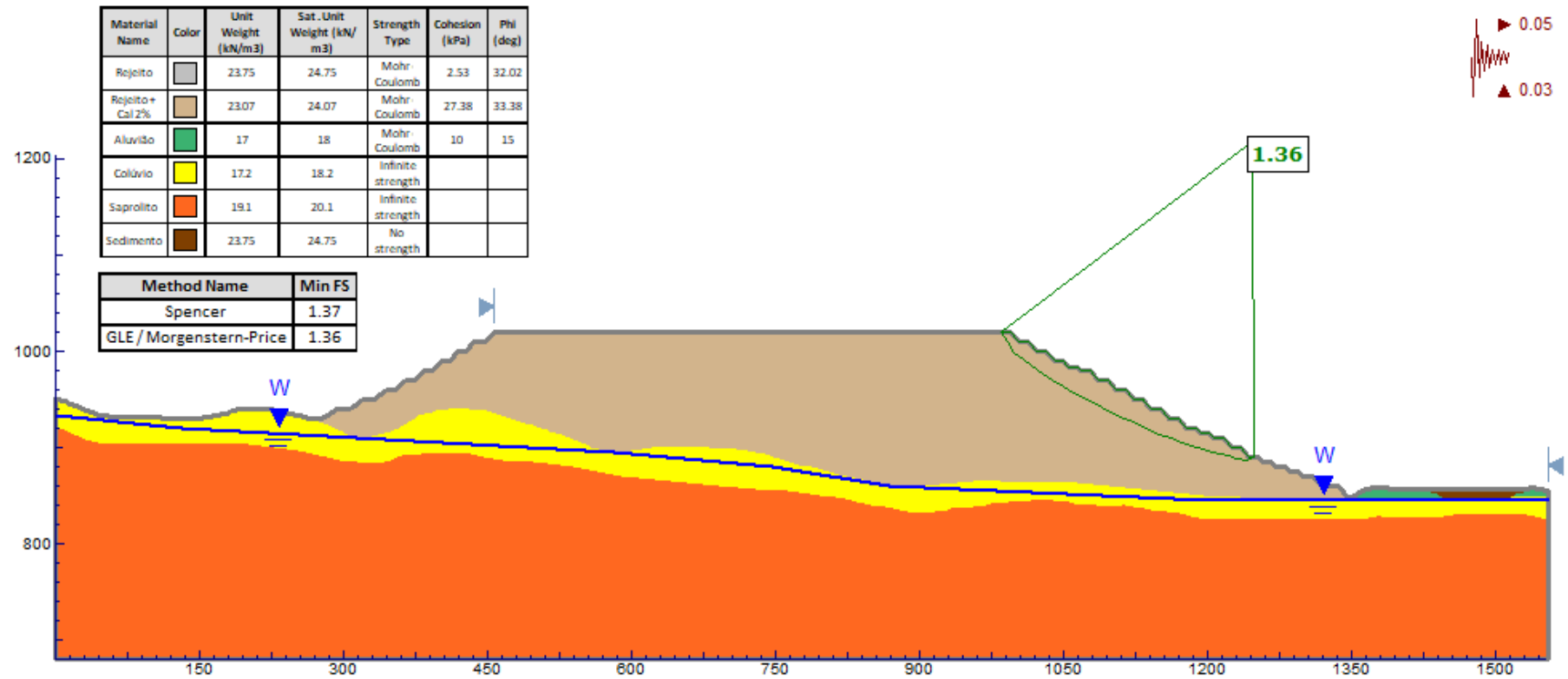
Fonte: Autoria própria

Figura 231 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único  
 – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



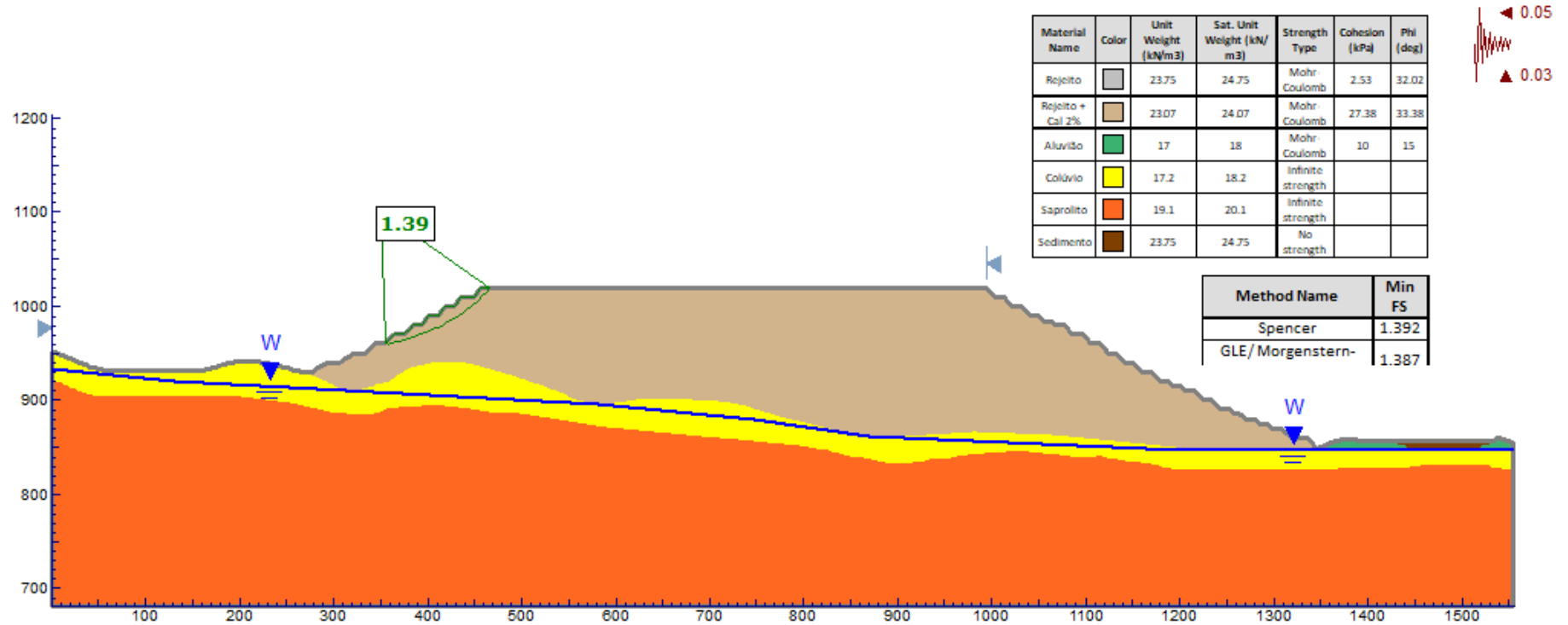
Fonte: Autoria própria

Figura 232 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único  
 – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

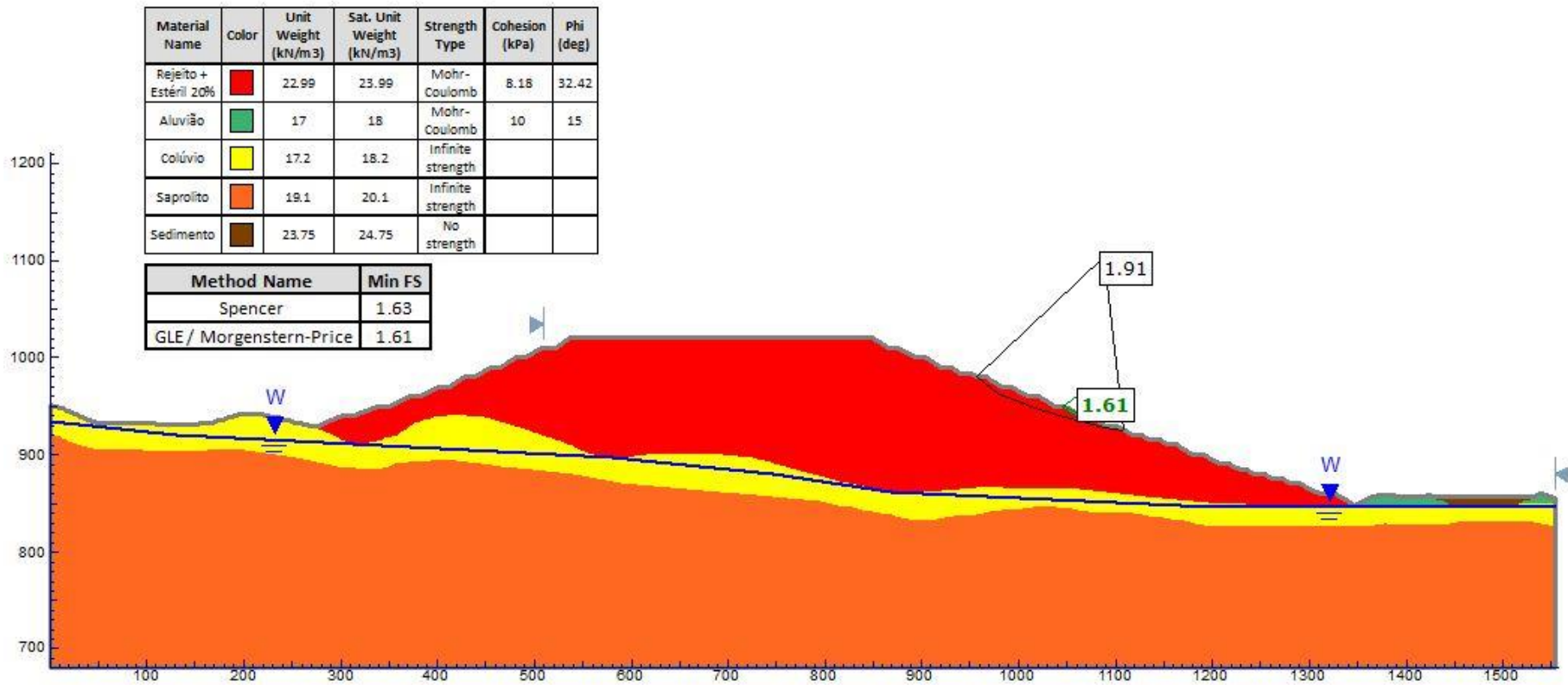
Figura 233 – Análise de estabilidade – Rejeito + 2% de cal – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

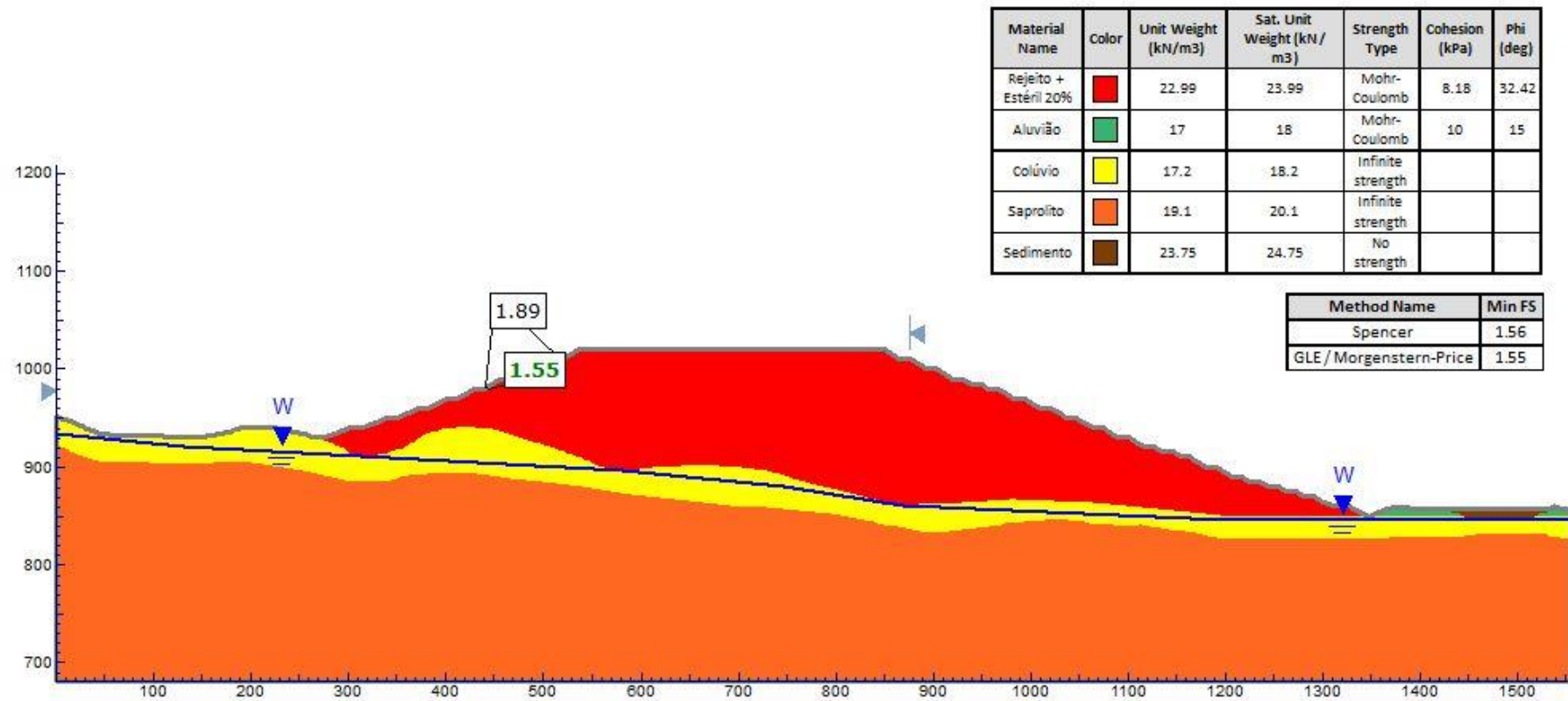
**80% DE REJEITO + 20% DE ESTÉRIL – OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GERAL DOS TALUDES**

Figura 234 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude direito



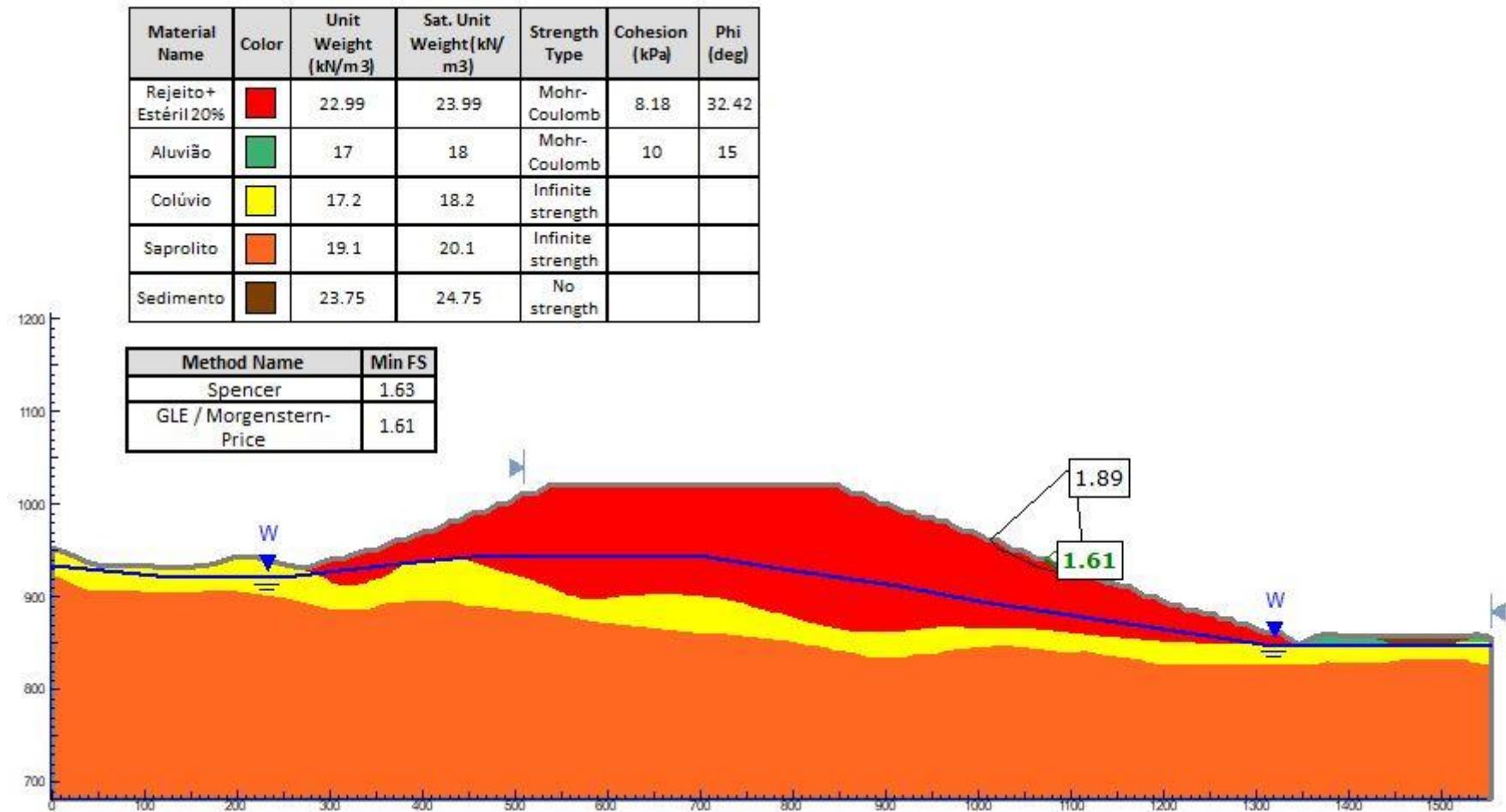
Fonte: Autoria própria

Figura 235 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática normal – Talude esquerdo



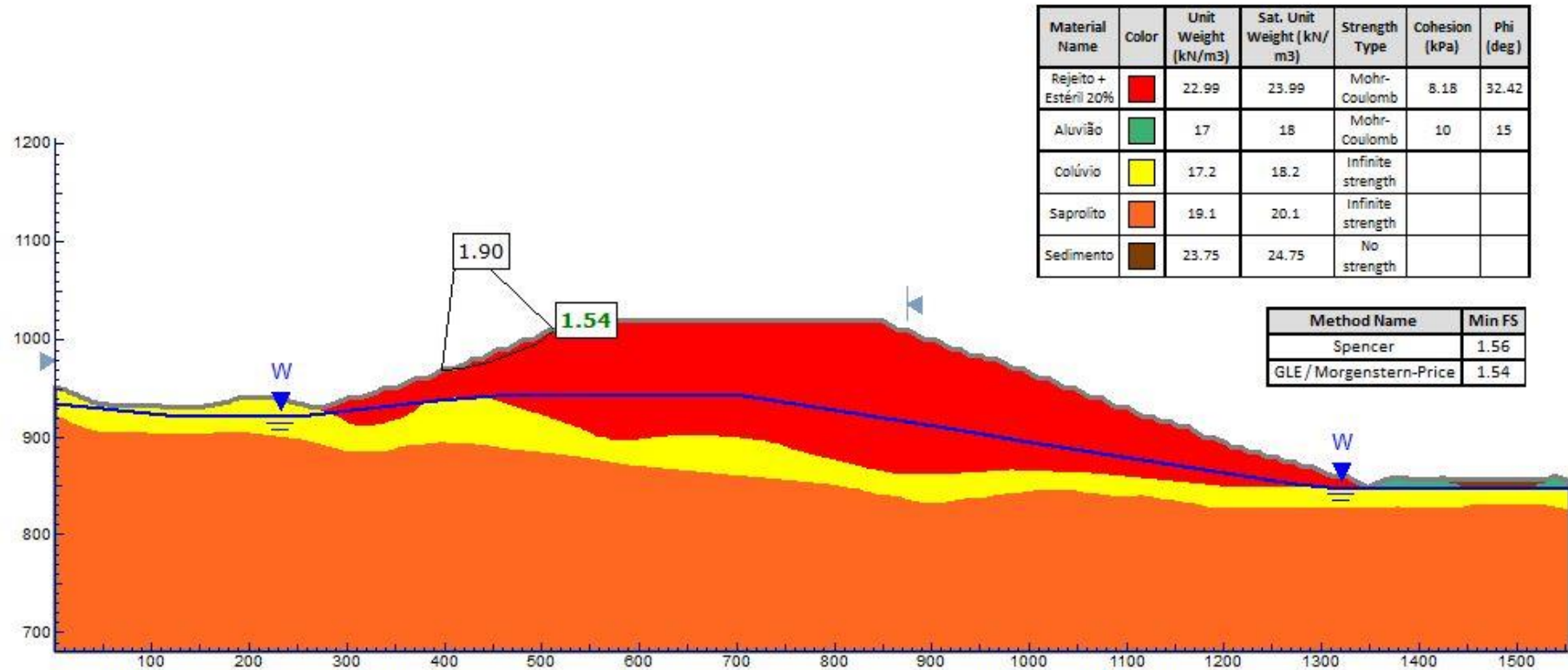
Fonte: Autoria própria

Figura 236 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude direito



Fonte: Autoria própria

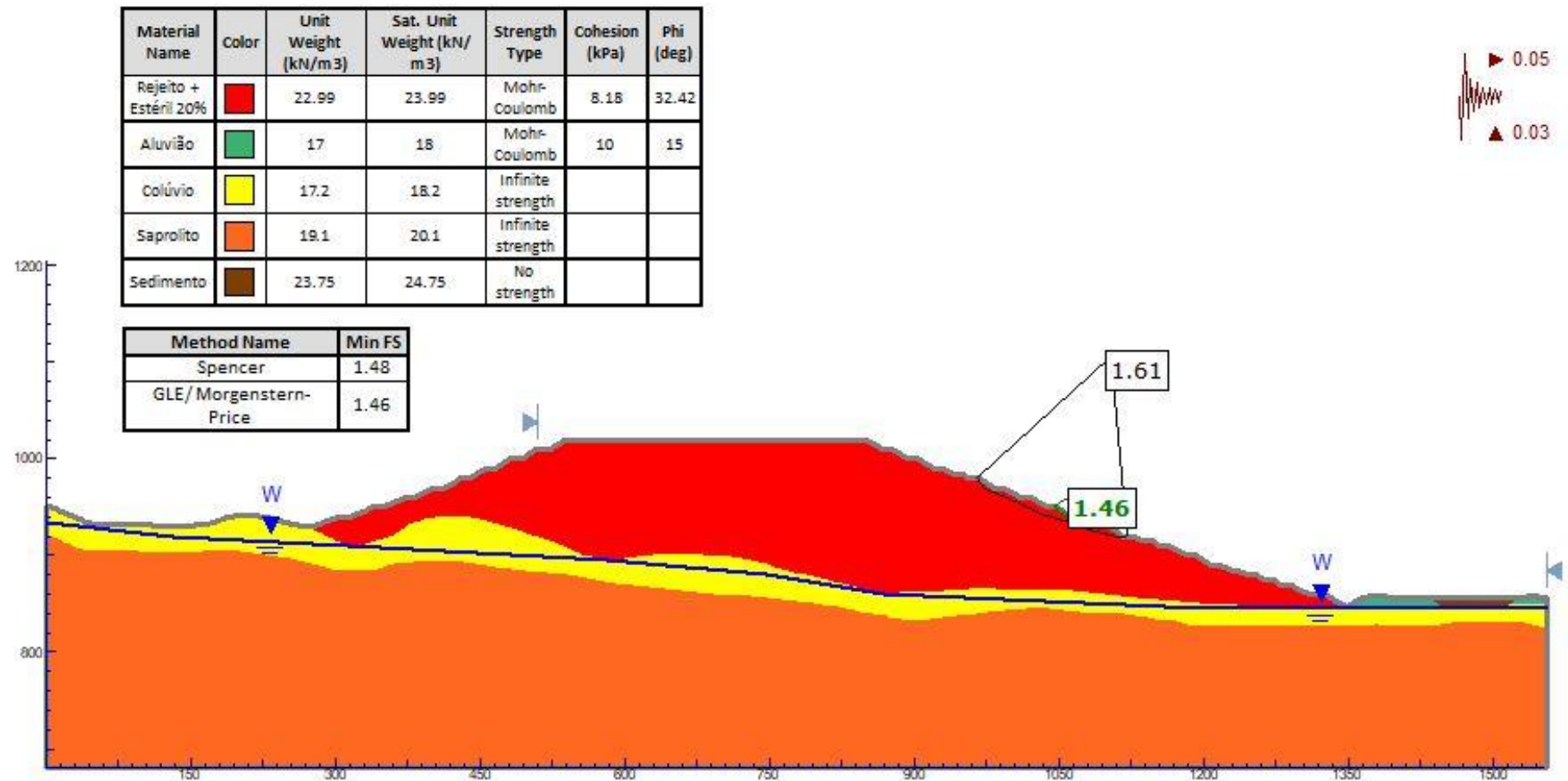
Figura 237 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Superfície freática crítica – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria

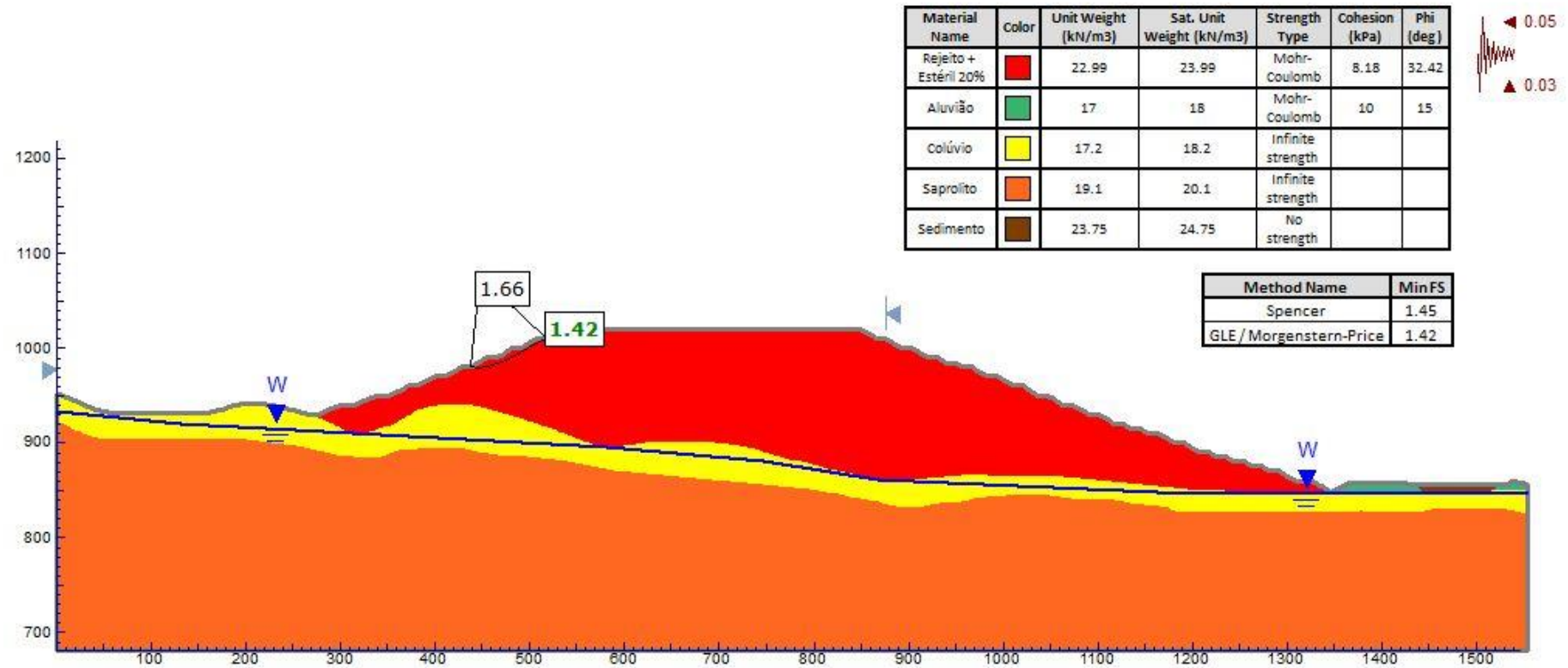


Figura 238 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude direito



Fonte: Autoria própria

Figura 239 – Análise de estabilidade – 80% de rejeito + 20% de estéril – Otimização do ângulo geral dos taludes – Pilha de 172 m – Pilha de material único – Pseudoestática – Talude esquerdo



Fonte: Autoria própria