

Sumário

Guia para projetos de taludes de minas a céu aberto em rochas brandas

1. INTRODUÇÃO – p. 21

Peter Stacey e Derek Martin

- 1.1 Histórico – p. 21
- 1.2 Descrições e definições gerais para rochas brandas – p. 22
 - 1.2.1 Sedimentos cimentados – p. 23
 - 1.2.2 Rochas sedimentares brandas – p. 24
 - 1.2.3 Saprolitos: rocha intemperizada e solo residual – p. 25
 - 1.2.4 Minérios de ferro friáveis e rochas lixiviadas – p. 27
 - 1.2.5 Rochas hidrotermalmente alteradas – p. 27
- 1.3 Terminologia de projeto de taludes – p. 28
 - 1.3.1 Configurações de taludes – p. 28
 - 1.3.2 Instabilidade – p. 29
 - 1.3.2.1 Resposta ao descarregamento – p. 29
 - 1.3.2.2 Movimentação ou dilatância – p. 29
 - 1.3.2.3 Ruptura – p. 29
- 1.4 Implicações no projeto – p. 30
- 1.5 Implementação do projeto – p. 32

2. COLETA DE DADOS EM CAMPO E METODOLOGIA – p. 33

Peter Stacey e Derek Martin

- 2.1 Introdução – p. 33
- 2.2 Descrições gerais em campo – p. 34
 - 2.2.1 Estimativa de resistência em campo – p. 34
 - 2.2.2 Intemperismo e alteração – p. 35
 - 2.2.3 Rochas brandas sensíveis à umidade – p. 35
 - 2.2.4 Solos residuais e rochas intemperizadas – p. 36
- 2.3 Mapeamento de campo – p. 37
- 2.4 Perfilagem, amostragem e preservação das amostras – p. 37
 - 2.4.1 Armazenamento e registro fotográfico de testemunhos – p. 37
 - 2.4.2 Perfilagem – p. 38

- 2.4.3 Descontinuidades e cisalhamento pelo plano de estratificação – p. 38
- 2.4.4 Amostragem – p. 40
 - 2.4.4.1 Deformação das amostras – p. 40
 - 2.4.4.2 Sondagem rotativa e amostradores – p. 40
 - 2.4.4.3 Amostras tipo bloco – p. 41
 - 2.4.4.4 Preservação das amostras – p. 41
- 2.5 Ensaios em laboratório – p. 42
 - 2.5.1 Métodos de ensaios de rotina – p. 42
 - 2.5.2 Ensaios de caracterização – p. 43
 - 2.5.2.1 Porosidade e índice de vazios – p. 43
 - 2.5.2.2 Distribuição granulométrica – p. 43
 - 2.5.2.3 Teor de umidade – p. 43
 - 2.5.2.4 Limites de Atterberg – p. 45
 - 2.5.2.5 Ensaios de durabilidade – p. 46
 - 2.5.3 Ensaios de resistência – p. 46
 - 2.5.3.1 Ensaios de carga pontual e penetração de agulha – p. 46
 - 2.5.3.2 Ensaios de tração – p. 47
 - 2.5.3.3 Ensaios de compressão uniaxial – p. 47
 - 2.5.3.4 Ensaios triaxiais – p. 48
 - 2.5.3.5 Ensaios de cisalhamento direto in situ – p. 48
- 2.6 Caracterização in situ – p. 48
 - 2.6.1 Métodos de determinação de resistência e rigidez in situ – p. 48
 - 2.6.2 Métodos geofísicos – p. 49
 - 2.6.3 Ensaios geoquímicos – p. 49
- 2.7 Resumo – p. 51

3. MODELOS DE RESISTÊNCIA DE ROCHAS BRANDAS – p. 53

Derek Martin e Peter Stacey

- 3.1 Introdução – p. 53
- 3.2 Modelos geológicos e estruturais – p. 53
 - 3.2.1 Litologia e alteração – p. 54
 - 3.2.1.1 Sedimentos cimentados – p. 54
 - 3.2.1.2 Rochas sedimentares brandas – p. 54
 - 3.2.1.3 Saprolitos – p. 54
 - 3.2.1.4 Minérios de ferro friáveis e rochas lixiviadas – p. 55
 - 3.2.1.5 Rochas hidrotermalmente alteradas – p. 56
 - 3.2.2 Estruturas principais – p. 56
 - 3.2.3 Fábrica (fabric) estrutural – p. 57
 - 3.2.4 Sismicidade – p. 57
- 3.3 Papel dos sistemas de classificação de maciços rochosos – p. 57
- 3.4 Resistência ao cisalhamento e critérios de ruptura em ensaios de laboratório – p.

59

- 3.4.1 Resistência ao cisalhamento e envoltórias de ruptura – p. 59
- 3.4.2 Tensões e trajetória de tensões durante escavação a céu aberto – p. 61
- 3.4.3 Fatores que afetam a resistência de rochas brandas – p. 63
 - 3.4.3.1 Granulometria e densidade – p. 63
 - 3.4.3.2 Mineralogia – p. 63
 - 3.4.3.3 Teor de umidade – p. 64
 - 3.4.3.4 Porosidade – p. 64
 - 3.4.3.5 Anisotropia induzida pela fábrica (fabric) – p. 65
 - 3.4.3.6 Saturação e sucção – p. 66
 - 3.4.3.7 Fragilidade – p. 66
- 3.4.4 Ensaios laboratoriais em rochas brandas – p. 66
 - 3.4.4.1 Métodos de ensaio – p. 66
 - 3.4.4.2 Resistência drenada, resistência não drenada e trajetória de tensões – p. 68
- 3.4.5 Comportamento das rochas brandas – p. 70
 - 3.4.5.1 Uma envoltória de ruptura para uma rocha branda de baixa coesão – p. 71
 - 3.4.5.2 Uma envoltória de ruptura em conglomerados cimentados – p. 73
- 3.4.6 Resistência ao cisalhamento anisotrópica – p. 75
- 3.4.7 Resistência parcialmente saturada – p. 76
- 3.4.8 Resposta hidromecânica durante a lavra – p. 79
- 3.5 Erodibilidade/degradabilidade – p. 82

4. O PAPEL DA ÁGUA NO PROJETO DE TALUDES EM ROCHAS BRANDAS – p. 83

Geoff Beale

- 4.1 Introdução – p. 83
- 4.2 Histórico hidrogeológico – p. 84
 - 4.2.1 Classificação geral – p. 84
 - 4.2.2 Discussão sobre parâmetros básicos – p. 85
 - 4.2.2.1 Porosidade – p. 85
 - 4.2.2.2 Permeabilidade e difusividade – p. 87
 - 4.2.2.3 Teor de umidade – p. 88
 - 4.2.2.4 Diferenças entre rochas brandas e rochas resistentes – p. 88
 - 4.2.3 Águas subterrâneas não confinadas e confinadas – p. 88
 - 4.2.3.1 Armazenamento de águas subterrâneas não confinadas – p. 88
 - 4.2.3.2 Armazenamento confinado (elástico) de águas subterrâneas – p. 89
 - 4.2.4 Poropressão – p. 89
 - 4.2.4.1 Poropressão em relação ao lençol freático – p. 89
 - 4.2.4.2 Gradientes hidráulicos verticais – p. 90
 - 4.2.4.3 Poropressão acima do lençol freático – p. 91

- 4.2.4.4 Impacto da poropressão na resistência ao cisalhamento – p. 91
- 4.2.5 Acoplamento hidromecânico – p. 91
 - 4.2.5.1 Piping – p. 92
 - 4.2.7 Falha Gouge – p. 93
- 4.3 Caracterização de águas subterrâneas – p. 93
 - 4.3.1 Geral – p. 93
 - 4.3.2 Definição das metas – p. 93
 - 4.3.3 Coleta e compilação de dados – p. 94
 - 4.3.3.1 Introdução – p. 94
 - 4.3.3.2 Coleta de dados – p. 95
 - 4.3.3 Ensaios em um único furo – p. 96
 - 4.3.4 Ensaios cross-hole – p. 97
 - 4.3.5 Monitoramento de poropressões – p. 98
 - 4.3.6 Monitoramento geotécnico e de poropressão integrado – p. 99
 - 4.3.7 Compilação de dados – p. 100
- 4.4 Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual – p. 101**
 - 4.4.1 Geral – p. 101
 - 4.4.2 Modelo em escala regional e de mina – p. 101
 - 4.4.2.1 Geologia – p. 101
 - 4.4.2.2 Hidrologia – p. 102
 - 4.4.2.3 Hidráulica – p. 102
 - 4.4.3 Modelo em escala setorial – p. 102
- 4.5 Análise e modelagem de poropressão – p. 103**
 - 4.5.1 Definição de metas – p. 103
 - 4.5.2 Entrada de dados de poropressão na análise geotécnica – p. 104
 - 4.5.2.1 Análise Re – p. 104
 - 4.5.2.2 Superfícies freáticas – p. 104
 - 4.5.2.3 Malhas de poropressão – p. 104
 - 4.5.3 Análise de poropressões – p. 104
 - 4.5.4 Planejamento de modelos numéricos – p. 105
 - 4.5.5 Inclusão de acoplamento hidromecânico – p. 106
 - 4.5.6 Desenvolvimento de modelos numéricos – p. 107
- 4.6 Despressurização de rochas brandas – p. 108**
 - 4.6.1 Importância do tempo – p. 108
 - 4.6.2 Importância da recarga – p. 108

4.6.3 Métodos para despressurização de rochas brandas – p. 109

 4.6.3.1 Faces de surgência – p. 109

 4.6.3.2 Drenos horizontais – p. 110

 4.6.3.3 Monitoramento durante a instalação de drenos – p. 112

 4.6.3.4 Drenos verticais ou inclinados – p. 113

 4.6.3.5 Poços de bombeamento – p. 114

 4.6.3.6 Túneis de drenagem – p. 114

 4.6.3.7 Melhoria da drenagem interna à cava – p. 114

4.7 Caracterização de águas superficiais – p. 115

 4.7.1 Fontes de águas superficiais – p. 115

 4.7.2 Estimativa de vazões – p. 116

 4.7.2.1 Cursos d'água de maior porte que requerem desvios externos – p. 116

 4.7.2.2 Pequenas bacias de contribuição – p. 116

 4.7.2.3 Escoamento superficial no interior da cava – p. 117

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETO DE TALUDES – p. 119

Derek Martin, Lorn Lorig e Peter Stacey

5.1 Introdução – p. 119

5.2 Modos de ruptura – p. 121

 5.2.1 Modos primários – p. 123

 5.2.1.1 Escorregamento ao longo de uma camada/interface de baixa resistência – p. 123

 5.2.1.2 Escorregamento ao longo de uma superfície de cisalhamento desenvolvida em maciço de rocha branda – p. 123

 5.2.2 Modos secundários – p. 123

 5.2.2.1 Rupturas envolvendo estruturas reliquias/existentes – p. 123

5.3 Mecanismos de instabilidade – p. 124

 5.3.1 Processos de perda de coesão – p. 124

 5.3.1.1 Amolecimento – p. 124

 5.3.1.2 Ruptura progressiva – p. 124

 5.3.1.3 Afragamento – p. 125

 5.3.2 Planos de fraqueza em depósitos estratificados – p. 125

 5.3.3 Colapso em rochas brandas de alta porosidade – p. 126

 5.3.4 Resumo de mecanismos de instabilidade – p. 127

5.4 Análises de estabilidade e previsões – p. 128

5.4.1 Abordagens – p. 128

5.4.2 Análise sísmica – p. 132

5.5 Análises de equilíbrio limite – p. 132

5.5.1 Métodos LEM – p. 132

5.5.2 Papel do Fator de Segurança – p. 133

5.5.3 Deformações e Fator de Segurança – p. 133

5.5.4 A superfície de deslizamento postulada – p. 133

5.5.5 Anisotropia – p. 133

5.6 Abordagens numéricas – p. 133

5.6.1 Papel dos modelos numéricos – p. 133

5.6.2 Modelos contínuos – p. 134

5.6.2.1 Modelos de materiais isotrópicos – p. 134

5.6.2.2 Modelos de materiais anisotrópicos – p. 134

5.6.3 Modelos descontínuos – p. 135

5.6.4 Simulação de modos comuns de comportamento em modelos numéricos – p. 135

5.6.4.1 Elasto-perfeitamente plástico – p. 135

5.6.4.2 Perda de coesão – p. 136

5.6.4.3 Planos de fraqueza em depósitos estratificados – p. 137

5.6.4.4 Colapso volumétrico – p. 138

5.6.5 Poropressões – p. 138

5.6.5.1 Análise transiente – p. 139

5.6.5.2 Análise não drenada – p. 139

5.6.5.3 Análise não drenada e cisalhamento pelo plano de estratificação – p. 140

5.6.6 Redução da resistência ao cisalhamento – p. 141

5.7 Aplicação de modelos numéricos – p. 142

5.7.1 Análise 2D versus 3D – p. 142

5.7.2 Contornos – p. 143

5.7.3 Tamanho dos setores – p. 143

5.7.4 Condições iniciais – p. 143

5.7.5 Sequência de escavação – p. 144

5.7.6 Interpretação de resultados numéricos – p. 144

5.7.7 Análise de grandes deformações – p. 145

5.8 Critérios de aceitação – p. 148

- 5.8.1 Projeto baseado em limites (pré-viabilidade) – p. 148
 - 5.8.2 Projeto baseado em desempenho durante as operações – p. 149
 - 5.9 Resumo – p. 149
-

6. SEDIMENTOS CIMENTADOS – p. 151

Derek Martin e Peter Stacey

- 6.1 Introdução – p. 151
- 6.2 Contexto geológico geral – p. 151
 - 6.2.1 Geologia – p. 151
 - 6.2.2 Geologia estrutural – p. 152
- 6.3 Hidrogeologia – p. 153
 - 6.3.1 Depósitos de tipo bacia e cordilheira – p. 153
 - 6.3.2 Sedimentos estratificados cimentados: Formação Carlin – p. 154
- 6.4 Propriedades geotécnicas gerais – p. 155
 - 6.4.1 Sedimentos estratificados cimentados – p. 155
 - 6.4.2 Cascalhos cimentados – p. 155
- 6.5 Considerações sobre projeto de taludes – p. 156
- 6.6 Mina a céu aberto Goldstrike Betze-Post, Nevada: instabilidade na Formação Carlin – p. 156
 - 6.6.1 Introdução – p. 157
 - 6.6.2 Geologia – p. 157
 - 6.6.3 Histórico do desenvolvimento da parede leste – p. 157
 - 6.6.4 Geologia de engenharia – p. 158
 - 6.6.5 Hidrogeologia – p. 158
 - 6.6.6 Ensaios de laboratório e propriedades de resistência dos materiais – p. 159
 - 6.6.7 Análise e projeto do talude de expansão Nordeste – p. 160
 - 6.6.8 Modelagem numérica de deformação de taludes em profundidade – p. 161
 - 6.6.9 Instabilidade na Formação Carlin – p. 161
 - 6.6.10 Instabilidade contínua, monitoramento e recuperação – p. 161
 - 6.6.11 Controle de movimentação de talude na Formação Carlin – p. 162
 - 6.6.12 Conclusões – p. 162
- 6.7 Ruptura do talude Nine Points na mina a céu aberto Gold Quarry da Newmont – p. 162

- 6.7.1 Introdução – p. 163
- 6.7.2 Geologia – p. 163
- 6.7.3 Hidrogeologia – p. 163
- 6.7.4 Instabilidade do talude Midway – p. 164
- 6.7.5 Instabilidade do talude Nine Points em abril de 2009 – p. 165
- 6.7.6 Comportamento da instabilidade Nine Points após abril de 2009 – p. 165
- 6.7.7 Ruptura de dezembro de 2009 – p. 166
- 6.7.8 Investigação geológica e atualização do modelo – p. 167
- 6.7.9 Resultados iniciais da modelagem de taludes – p. 167
- 6.7.10 Resultados da sondagem geotécnica – p. 167
- 6.7.11 Resultados da hidrogeologia – p. 167
- 6.7.12 Resultados da resistência dos materiais – p. 168
- 6.7.13 Projeto de recuperação de taludes – p. 168
- 6.7.14 Resumo das lições aprendidas – p. 169
- 6.8 Visão geral da experiência da mineração a céu aberto em cascalhos cimentados (aluviais) encontrados no sudoeste dos Estados Unidos – p. 170
 - 6.8.1 Geral – p. 170
 - 6.8.2 Contexto geológico para cascalhos cimentados do sudoeste dos Estados Unidos – p. 171
 - 6.8.3 Caracterização das propriedades dos materiais – p. 173
 - 6.8.3.1 Amostragem – p. 174
 - 6.8.3.2 Distribuição granulométrica – p. 174
 - 6.8.3.3 Tensão-deformação e comportamento de mudança de volume – p. 174
 - 6.8.3.4 Efeitos de escala e resistência ao cisalhamento – p. 175
 - 6.8.3.5 Retroanálises – p. 177
 - 6.8.3.6 Parâmetros de resistência ao cisalhamento aplicados – p. 177
 - 6.8.3.7 Deformação – p. 178
 - 6.8.4 Hidrogeologia – p. 178
 - 6.8.5 Desempenho de taludes de mina – p. 179
 - 6.8.5.1 Mina Ruby Hill – p. 179
 - 6.8.5.2 Mina de Ouro Cortez – p. 180
 - 6.8.5.3 Mina Twin Creeks – p. 181
 - 6.8.5.4 Alturas e ângulos conforme construídos – p. 182
 - 6.8.6 Considerações de projeto – p. 183
 - 6.8.6.1 Caracterização – p. 183

- 6.8.6.2 Resistência ao cisalhamento – p. 184
 - 6.8.7 Considerações operacionais – p. 184
 - 6.8.8 Desempenho de taludes – p. 184
- 6.9 Mina Ministro Hales, Codelco: ruptura de bancadas em cascalhos maciços – p. 185
- 6.9.1 Histórico – p. 185
 - 6.9.2 Caracterização – p. 185
 - 6.9.2.1 Caracterização geotécnica – p. 186
 - 6.9.2.2 Ensaios – p. 186
 - 6.9.3 Descrição da ruptura – p. 190
 - 6.9.3.1 Plano de ruptura – p. 190
 - 6.9.3.2 Monitoramento da ruptura – p. 190
 - 6.9.4 Retroanálise – p. 191
 - 6.9.5 Mudança proposta para a geometria das bancadas – p. 192
 - 6.9.6 Conclusões e recomendações – p. 192

Agradecimentos

7. ARGILITOS SEDIMENTARES BRANDOS – p. 193

Derek Martin e Peter Stacey

- 7.1 Introdução – p. 193
- 7.2 Contexto geológico geral – p. 193
 - 7.2.1 Geologia – p. 193
 - 7.2.2 Geologia estrutural – p. 194
- 7.3 Hidrogeologia – p. 194
 - 7.3.1 Argilitos – p. 194
 - 7.3.2 Boratos – p. 195
- 7.4 Propriedades geotécnicas gerais – p. 195
 - 7.4.1 Terminologia – p. 195
 - 7.4.2 Microfábrica (micro-fabric), macrofábrica (macro-fabric), fissuras e cisalhamentos pelo plano de estratificação – p. 195
 - 7.4.3 Mineralogia e plasticidade – p. 196
 - 7.4.4 Resistência, módulo e umidade – p. 197
 - 7.4.5 Empoleamento, amolecimento e deformações dependentes do tempo – p.

198

- 7.4.6 Parâmetros de classificação – p. 199
- 7.5 Considerações sobre projeto de taludes – p. 199
 - 7.5.1 Cinemática de ruptura – p. 199
 - 7.5.2 Projeto – p. 200
- 7.6 Mina Voorspoed, África do Sul: mina a céu aberto de diamantes em argilito brando – p. 200
 - 7.6.1 Introdução – p. 200
 - 7.6.2 Contexto geológico – p. 200
 - 7.6.3 Desempenho do talude – p. 202
 - 7.6.4 Estudo de viabilidade e domínios geotécnicos atuais – p. 204
 - 7.6.5 Base de dados de ensaios em laboratório e informações de descrições de testemunhos – p. 205
 - 7.6.6 Precipitação e água subterrânea – p. 208
- 7.7 Mecanismos hipotéticos de ruptura – p. 209
 - 7.7.1 Ruptura clássica por cisalhamento de maciço rochoso – p. 209
 - 7.7.2 Ruptura em grandes falhas – p. 209
 - 7.7.3 Ruptura basal em blocos deformados ou inclinados na zona deformada – p. 210
 - 7.7.4 Ruptura basal e camadas de argila – p. 210
- 7.8 Resumo dos mecanismos de ruptura em Voorspoed e consequências no projeto – p. 211
- 7.9 Estratégia de gestão de riscos – p. 212
- 7.10 Projeto futuro e estratégia de lavra – p. 212
 - 7.10.1 Minimização do impacto de material rompido em frentes de lavra – p. 213
 - 7.10.2 Mitigação do risco de perda de acesso – p. 214
- 7.11 Conclusões – p. 214

Agradecimentos

8. CARVÃO, GIZ E CALCÁRIO SEDIMENTARES BRANDOS – p. 227

John Simmons, Patrick Ebeling e Peter Stacey

8.1 Introdução – p. 227

8.2 Contexto geológico geral – p. 227

 8.2.1 Geologia – p. 227

 8.2.2 Geologia estrutural – p. 227

 8.2.3 Propriedades dos materiais – p. 228

8.3 Considerações sobre projeto de taludes – p. 228

 8.3.1 Modos de ruptura típicos – p. 228

 8.3.1.1 Controle de estratificação – p. 229

 8.3.1.2 Resistência do maciço rochoso – p. 229

 8.3.2 Projetos de taludes – p. 229

 8.3.2.1 Lamas (footwalls) – p. 229

 8.3.2.2 Capas (hangingwalls) e paredes laterais – p. 229

8.4 Camadas carboníferas brandas – p. 229

 8.4.1 Visão geral – p. 229

 8.4.2 Desenvolvimento de modelos empíricos de resistência ao cisalhamento de maciços rochosos – p. 230

 8.4.3 Interpretação das condições das águas subterrâneas em maciços de camadas de carvão – p. 231

8.4.4 Lavra a céu aberto em larga escala em maciços rochosos de baixa resistência nos Projetos PT Kaltim Prima Coal Sangatta e Bengalon – p. 233

 8.4.4.1 Visão geral regional – p. 233

 8.4.4.2 Litologia e estrutura em escala de mina – p. 234

 8.4.4.3 Materiais rochosos e caracterização do maciço rochoso – p. 234

 8.4.4.4 Características de defeitos do maciço rochoso – p. 237

 8.4.4.5 Hidrogeologia – p. 238

 8.4.4.6 Exemplos de desempenho de taludes de mina – p. 238

8.4.5 Condições geotécnicas para a lavra de rochas carboníferas da Bacia Sedimentar do Oeste do Canadá – p. 243

 8.4.5.1 Estrutura geológica – p. 243

 8.4.5.2 Propriedades geotécnicas – p. 245

 8.4.5.3 Condições hidrogeológicas – p. 246

 8.4.5.5 Descrição geral de experiências com desempenho de taludes – p. 246

8.5 Giz e calcários brandos – p. 247

8.5.1 Introdução – p. 247
8.5.2 Geologia geral e classificação – p. 247
8.5.3 Amostragem – p. 248
8.5.4 Propriedades dos materiais – p. 249
 8.5.4.1 Giz – p. 249
 8.5.4.2 Calcários brandos – p. 251

8.5 Giz e calcários brandos – p. 247

8.5.1 Introdução – p. 247
8.5.2 Geologia geral e classificação – p. 247
8.5.3 Amostragem – p. 248
8.5.4 Propriedades dos materiais – p. 249
 8.5.4.1 Giz – p. 249
 8.5.4.2 Calcários brandos – p. 251

8.5.5 Hidrogeologia – p. 252
8.5.6 Estudos de caso – p. 252
 8.5.6.1 Lägerdorf – p. 252
 8.5.6.2 Danne – p. 252
 8.5.6.3 Mina a céu aberto de Talacogon – p. 253

8.5.7 Projetos de taludes – p. 254
 8.5.7.1 Investigações e caracterização de depósitos – p. 255
 8.5.7.2 Variabilidade dos dados – p. 255

8.5.8 Implementação do projeto – p. 255
 8.5.8.1 Despressurização de taludes e rebaixamento do lençol freático na cava – p. 255
 8.5.8.2 Métodos de lavra – p. 256

9. SAPRÓLITO: ROCHA INTEMPERIZADA E SOLO RESIDUAL – p. 257

Derek Martin e Peter Stacey

9.1 Introdução – p. 257

9.2 Terminologia – p. 258
 9.2.1 Saprólito – p. 259
 9.2.2 Pedolito – p. 259

9.3 Processos de intemperismo e geologia – p. 260

- 9.3.1 Intemperismo químico – p. 260**
- 9.3.2 Intemperismo físico – p. 261**
- 9.3.3 Taxas de intemperismo – p. 261**
- 9.3.4 Influência da rocha-mãe – p. 261**
 - 9.3.4.1 Rochas ígneas – p. 261**
 - 9.3.4.2 Rochas sedimentares – p. 261**
 - 9.3.4.3 Rochas metamórficas – p. 262**
- 9.3.5 Exemplos de perfis de intemperismo – p. 262**

9.4 Propriedades geotécnicas gerais – p. 263

- 9.4.1 Descrições de intemperismo – p. 264**
- 9.4.2 Composição e estrutura em profundidade – p. 266**
- 9.4.3 Efeito do intemperismo na resistência – p. 266**
 - 9.4.3.1 Resistência intacta – p. 267**
 - 9.4.3.2 Ligação: coesão e escoamento – p. 268**
 - 9.4.3.3 Resistência residual – p. 269**
 - 9.4.3.4 Resistência ao cisalhamento de estrutura reliquiar e anisotropia – p. 269**
 - 9.4.3.5 Resistência ao cisalhamento não saturada – p. 270**
 - 9.4.3.6 Ensaios de resistência multiestágios – p. 271**

9.5 Hidrogeologia – p. 271

- 9.5.1 Perfis de hidrogeologia típicos – p. 271**
- 9.5.2 Rebaixamento – p. 271**
- 9.5.3 Observações de hidrogeologia na mina de ouro Rosebel – p. 272**

9.6 Considerações sobre projeto de taludes – p. 274

- 9.6.1 Cinemática de ruptura – p. 274**
- 9.6.2 Projeto – p. 275**
- 9.6.3 Implementação do projeto – p. 275**

9.7 Mina de ouro Côval: retroanálise – p. 277

- 9.7.1 Introdução – p. 277**
- 9.7.2 Geologia – p. 277**
- 9.7.3 Avaliações de estabilidade de taludes (pré-lavra) – p. 278**
 - 9.7.3.1 Premissas de lençol freático (pré-lavra) – p. 278**
 - 9.7.3.2 Avaliações de estabilidade (pré-lavra) – p. 280**
- 9.7.4 Lavra – p. 280**
- 9.7.5 Instabilidade da parede leste – p. 280**
- 9.7.6 Retroanálise – p. 281**
 - 9.7.6.1 Comentários sobre os resultados da retroanálise – p. 281**
- 9.7.8 Conclusões – p. 282**

9.8 Newmont Boddington Gold: otimização de projeto de taludes em material oxidado/saprólito – p. 283

9.8.1 Introdução – p. 284

9.8.2 Aspectos locais – p. 284

 9.8.2.1 Clima – p. 285

 9.8.2.2 Geologia regional – p. 285

 9.8.2.3 Geologia local – p. 285

 9.8.2.4 Condições geotécnicas da área – p. 286

9.8.3 Material oxidado na NBG – p. 286

9.8.4 Rupturas de taludes em material intemperizado na NBG – p. 287

9.8.5 Ensaios em laboratório de material intemperizado/saprólito na NBG – p. 288

9.8.6 Condições de lençol freático – p. 289

9.8.7 Avaliação geotécnica para projeto de taludes em material intemperizado/saprólito – p. 290

9.8.8 Otimização de projeto de taludes em material intemperizado/saprólito na NBG – p. 291

9.8.9 Drenagem superficial em taludes em material intemperizado – p. 291

9.8.10 Resumo – p. 292

Agradecimentos

10. MINÉRIOS DE FERRO FRIÁVEIS E OUTRAS ROCHAS LIXIVIADAS – p. 295

Paulo França, Teófilo Costa e Peter Stacey

10.1 Introdução – p. 295

10.2 Histórico – p. 295

10.3 Minérios de ferro friáveis: geologia – p. 296

 10.3.1 Litologia – p. 296

 10.3.2 Alteração – p. 297

 10.3.3 Estrutura – p. 298

10.4 Minérios de ferro friáveis: características geotécnicas – p. 298

 10.4.1 Definições – p. 299

 10.4.2 Caracterização em campo – p. 300

 10.4.3 Caracterização e ensaios em laboratório – p. 302

 10.4.3.1 Coleta e preparação de amostras – p. 302

 10.4.3.2 Granulometria e porosidade – p. 303

 10.4.3.3 Ensaios de resistência ao cisalhamento – p. 304

- 10.4.3.4 Colapso – p. 306
- 10.4.3.5 Discussão sobre estimativas de resistência – p. 307
- 10.4.4 Conclusões – p. 309
- 10.5 Rochas cangaixantes intemperizadas – p. 309
 - 10.5.1 Intemperismo e resistência – p. 309
 - 10.5.2 Caracterização – p. 311
 - 10.5.2.1 Litologia/texturas – p. 311
 - 10.5.2.2 Alteração/intemperismo – p. 311
 - 10.5.2.3 Resistência/consistência – p. 312
 - 10.5.2.4 Anisotropia – p. 312
 - 10.5.2.5 Erodibilidade – p. 314
 - 10.5.2.6 Resumo – p. 314
 - 10.5.3 Parâmetros de resistência – p. 314
 - Por Paulo Cella e Rodrigo Pelluci
 - 10.5.3.1 Estimativa em campo da resistência da rocha – p. 314
 - 10.5.3.2 Resistência em laboratório: resumo das rochas encaixantes do Quadrilátero Ferrífero – p. 315
- 10.6 Hidrogeologia de minérios de ferro friáveis e rochas associadas – p. 317
 - 10.6.1 Hidrogeologia no Quadrilátero Ferrífero do Brasil – p. 317
 - 10.6.1.1 Xistos (Grupo Nova Lima, Embasamento) – p. 317
 - 10.6.1.2 Quartzitos (Formação Moeda) – p. 318
 - 10.6.1.3 Filitos dolomíticos e sericíticos (Formação Batatal) – p. 318
 - 10.6.1.4 Minérios de ferro friáveis (Formação Cauê) – p. 318
 - 10.6.1.5 Resumo – p. 320
 - 10.6.2 Desaguamento e despressurização de taludes – p. 320
 - 10.6.3 Hidrogeologia de Carajás – p. 320
 - 10.6.3.1 Minérios de ferro friáveis (Formação Carajás) – p. 320
 - 10.6.3.2 Rochas vulcânicas maficas – p. 321
 - 10.6.3.3 Conglomerados – p. 321
 - 10.6.3.4 Resumo – p. 321
- 10.7 Quartzitos lixiviados e sedimentos quartzíticos – p. 321
- 10.8 Desempenho de taludes e estudos de caso – p. 321

10.8.1 Introdução – p. 321

10.8.1.1 Desempenho de taludes em minério de ferro maciço – p. 322

10.8.1.2 Rochas encaixantes associadas – p. 322

10.8.2 Patrimônio: retroanálise – p. 322

10.8.2.1 Geral – p. 322

10.8.2.2 Descrição da ruptura – p. 323

10.8.2.3 Análise da ruptura – p. 323

10.8.3 Carajás: rupturas dos taludes sul e sudeste da cava N4E – p. 324

10.8.4 Mina Pau Branco Mine – Quadrilátero Ferrífero, MG: filitos intemperizados associados a minérios de ferro friáveis – p. 326

10.8.5 Mina do Pico: uma avaliação do mecanismo de tombamento flexural em filito brando – p. 329

10.8.5.1 Introdução – p. 329

10.8.5.2 Histórico de instabilidades – p. 329

10.8.5.3 Avaliação do mecanismo de tombamento – p. 330

10.8.5.4 Métodos de equilíbrio limite – p. 332

10.8.5.5 Conclusões – p. 334

Agradecimentos

11. ROCHAS HIDROTERMALMENTE ALTERADAS – p. 335

Peter Stacey e Derek Martin

11.1 Introdução – p. 335

11.2 Contexto geológico geral – p. 335

11.2.1 Depósitos ígneos – p. 335

11.2.2 Depósitos epitermas – p. 336

11.2.3 Geologia estrutural – p. 337

11.3 Propriedades geotécnicas – p. 337

11.3.1 Descrição e classificação – p. 338

11.3.2 Resistência e deformação – p. 338

11.4 Hidrogeologia – p. 339

11.5 Estabilidade de taludes e geologia de engenharia na Mina Pierina – p. 340

11.5.1 Introdução – p. 340

11.5.2 Geologia de engenharia – p. 341

11.5.3 Experiência de estabilidade de taludes – p. 341

 11.5.3.1 Instabilidade P2-00-B – p. 342

11.5.4 Análise de estabilidade e fator de perturbação (D) – p. 345

11.5.5 Escoamento superficial e hidrogeologia – p. 345

11.5.6 Monitoramento dos taludes da mina – p. 346

11.5.7 Resultados e conclusões – p. 347

11.6 Instabilidade em rochas brandas – Talude norte da Cava El Tapado, Operação Yanacocha – p. 347

11.6.1 Introdução – p. 347

11.6.2 Condições do local – p. 347

 11.6.2.1 Topografia e clima – p. 347

 11.6.2.2 Geologia geral e descrição do corpo de minério – p. 348

 11.6.2.3 Características gerais das rochas brandas na Operação Yanacocha – p. 349

11.6.3 Fase 2 da Cava El Tapado – p. 350

 11.6.3.1 Caracterização geotécnica – p. 350

 11.6.3.2 Parâmetros de projeto de taludes da Cava ET (Fase 2) – p. 352

 11.6.3.3 Desaguamento – p. 352

11.6.4 Instabilidade profunda (deep-seated) no talude norte – p. 353

 11.6.4.1 Caracterização – p. 353

 11.6.4.2 Análises de estabilidade – p. 354

 11.6.4.3 Plano de mitigação – p. 354

 11.6.4.4 Plano de lavra revisado – p. 354

 11.6.4.5 Despressurização – p. 355

 11.6.4.6 Drenos horizontais – p. 356

 11.6.4.7 Controle das águas superficiais – p. 356

 11.6.4.8 Sistema de monitoramento de taludes – p. 357

11.6.5 Retomada da lavra – p. 357

 11.6.5.1 Linha do tempo – p. 357

 11.6.5.2 Monitoramento de deslocamentos de taludes – p. 357

 11.6.5.3 Desmonte com explosivos – p. 359

 11.6.5.4 Reconciliação – p. 359

11.7 Mina a céu aberto de Lihir em materiais argilosos – p. 359

11.7.1 Introdução – p. 359

11.7.1.1 Descrição da área da mina – p. 359

11.7.1.2 Lavra – p. 360

11.7.1.3 Geologia – p. 360

11.7.1.4 Águas subterrâneas e condições geotécnicas – p. 361

11.7.2 Propriedades de engenharia de materiais argilosos – p. 362

11.7.2.1 Classificação do registro argílico (VRQ) – p. 362

11.7.2.2 Dados registrados em campo – p. 362

11.7.2.3 Limites de Atterberg – p. 362

11.7.2.4 Ensaios triaxiais – p. 362

11.7.3 Talude GW28 – p. 363

11.7.3.1 Introdução – p. 363

11.7.3.2 Investigação – p. 364

11.7.3.3 Retroanálise – p. 364

11.7.3.4 (Re)Projeto e desempenho – p. 365

11.7.4 Pilha de Estoque Oeste – p. 366

11.7.4.1 Introdução – p. 366

11.7.4.2 Avaliação da pilha de estoque – p. 366

11.7.4.3 Desempenho da pilha de estoque – p. 367

11.7.5 Conclusões – p. 369

12. IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETOS E CONSIDERAÇÕES OPERACIONAIS – p. 371

Peter Stacey, Paulo França e Geoff Beale

12.1 Introdução – p. 371

12.2 Planejamento de mina – p. 371

12.2.1 Pré-lavra (Níveis 1 e 2) – p. 372

12.2.2 Nível de viabilidade e projeto detalhado – p. 373

12.3 Implementação de projetos – p. 374

12.3.1 Escavação e acabamento de faces de taludes – p. 375
12.3.2 Desmonte com explosivos – p. 377

12.4 Controle das águas superficiais – p. 377

12.4.1 Desvio de águas superficiais – p. 378
12.4.2 Coleta do escoamento superficial nas bermas de segurança e rampas de acesso – p. 379
12.4.3 Controle da recarga – p. 380
12.4.4 Gestão de grandes volumes de águas superficiais – p. 381
12.4.5 Manutenção de sistemas de controle de águas superficiais – p. 382
12.4.6 Estudo de caso – p. 382

12.5 Proteção de taludes – p. 384

12.6 Avaliação e monitoramento de desempenho – p. 385

12.6.1 Validação do modelo geotécnico – p. 385
12.6.2 Desempenho dos taludes – p. 386
12.6.3 Monitoramento de movimentações de taludes – p. 386
 12.6.3.1 Monitoramento em superfície – p. 386
 12.6.3.2 Técnicas em subsuperfície – p. 388

12.6.4 Monitoramento das águas da mina – p. 388
 12.6.4.1 Instalações típicas de monitoramento – p. 389
 12.6.4.2 Piezômetros de corda vibrante – p. 390
 12.6.4.3 Monitoramento de águas superficiais – p. 390
 12.6.4.4 Monitoramento de mudanças transitórias na poropressão – p. 391
 12.6.4.5 Elaboração do programa de monitoramento – p. 392

12.7 Planos de gestão e controle de terreno – p. 392

12.8 Fechamento da mina – p. 393

12.8.1 Considerações sobre estabilidade de taludes – p. 393
12.8.2 Considerações hidrogeológicas – p. 394
12.8.3 Monitoramento pós-fechamento – p. 396

Glossário – p. 397

Abreviações – p. 397

Palavras-chave e convenções – p. 397

Referências – p. 399

Índice Remissivo – p. 413