



- IAEG -

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND
THE ENVIRONMENT

PUBLICAÇÃO Nº 1 DA COMISSÃO 25 DA IAEG

**Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos
Geológico-Geotécnicos**

Principais autores

Fred Baynes e Steve Parry

Principais Editores

Martin Culshaw e Jim Griffiths

Demais autores e editores colaboradores

Wayne Barnett, Jorge Bergeman, Anthony Bowden, Richard Brehaut, Joe Cant, Trevor Carter, Dafydd Chandler, Roberto Cravero, Martin Culshaw, Antonio Dematteis, Yogendra Deva, Diego Dicurzio, David Dobson, Jia-Jyun Dong, Mark Eggers, Peter Fair, Robin Fell, Phil Flentje, Andrew Forsythe, Martin Griffin, Jim Griffiths, Bill Haneberg, Nizam Hasan, Chris Jack, Graeme Jardine, Stratis Karantanellis, Aliko Kokkala, Christoph Kraus, Teemu Lindqvist, Robert MacKean, Vassilis Marinos, Stuart Millis, Tim Nash, Judith Nathanail, Paul Nathanail, Simon Nelis, Alicia Newton, Jan Novotny, Darren Paul, Alistair Schofield, David Shilston, Ian Shipway, Doug Stead, Keith Turner, Giovanna Vessia, David Waring, Felicia Weir, Ann Williams, Erik Wunder

Referência bibliográfica

Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 129 pp.



Diretrizes para Desenvolvimento e Aplicação do Modelo Geológico-Geotécnico

Download do original em inglês pode ser feito em <https://www.iaeg.info/C25MGGuidelines/>

Os direitos autorais são de propriedade da IAEG, exceto para algumas figuras que foram originalmente publicadas por terceiros. Esta publicação não pode ser copiada ou adaptada sem permissão prévia. Caso necessário, entre em contato com o Secretário Geral da IAEG em iaegsg@163.com. Você pode citar trechos de extensão razoável sem permissão prévia, desde que seja feita uma citação completa da fonte dos mesmos.



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

Documento produzido pelo Grupo de Trabalho da Comissão 25 da
IAEG

E

Traduzido para o Português pela
ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

Revisores:

Bruna Maria Cruz Fernandes
Camila Milli
Flávio Bergonzoni
Haline Ceccato
João Antônio Curtis Neto
Jozias Bravo

Revisão Final

Lilian Pimentel Diniz dos Santos
Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá
Erik Wunder

Versão	Data	Status	Produzida por
--------	------	--------	---------------



Diretrizes Modelo Geológico-Geotécnico IAEG C25 v1.0.pdf	14 de dezembro de 2022	Diretrizes & Exemplos v1.0	Fred Baynes e Steve Parry
---	---------------------------	-------------------------------	------------------------------

Estas **Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos** corresponde à tradução para a língua portuguesa da sua versão original em inglês chamada ***Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects***, publicada em dezembro de 2022 pela **Comissão IAEG C25 – Use of engineering geological models**, e representa o resultado do trabalho aplicado e voluntário de profissionais associados da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental - ABGE

Durante o processo de tradução para o português, foi feito uso de um certo grau de liberdade para, além de traduzir, ajustar as palavras e frases de modo que a ideia e o conceito originais fossem transmitidos e encaixados nas idiossincrasias da língua portuguesa falada no Brasil. Neste contexto, alguns termos consagrados em inglês receberam os seguintes correspondentes nestas diretrizes:

- . Engineering Geology: Geologia de Engenharia
- . Engineering Geological Models: Modelos Geológico-Geotécnicos
- . Geological Hazards ou Geohazards: Perigos Geológicos
- . Geological Risks ou Georisks: Riscos Geológicos
- . Failure: Ruptura
- . Fault: Falha

Entretanto, com o objetivo de manter a estrita essência das informações apresentadas na forma de figuras, estas foram mantidas nestas diretrizes em sua forma de exibição original.

A International Association for Engineering Geology and the Environment - IAEG, seus os revisores e todos os colaboradores não fazem declaração de qualquer natureza em relação à integridade, adequação ou utilidade das informações contidas neste documento. Aqueles que usarem estas Diretrizes são responsáveis pelas suas próprias decisões ao aplicar as informações aqui fornecidas.



Índice

INTRODUÇÃO	8
HISTÓRICO	9
1 DISPOSIÇÃO CONSULTIVAS	12
1.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO	13
1.1.1 Definições	13
1.1.2 Princípios fundamentais	15
1.2. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO	20
1.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento	20
1.2.2 Escolha do nível de desenvolvimento do Modelo Geológico	22
1.2.3 Detalhes do processo de desenvolvimento	25
1.2.4 Modelo Geológico e Eurocode	36
1.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	38
1.3.1 Introdução	38
1.3.2 Resumo para documentação dos componentes do Modelo Geológico	38
1.3.3 Implicações de provisionamento do projeto	39
1.3.4 Relatórios Informativos do Modelo Geológico	40
1.3.5 Criando e visualizando um modelo digital 3D	43
1.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO	49
1.4.1 Introdução	49
1.4.2 Fontes de incerteza	49
1.4.3 Avaliação holística da confiabilidade do Modelo Geológico	49
1.4.4 Outros métodos de avaliação da incerteza e confiabilidade do Modelo Geológico	50
1.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO	54
1.5.1 Verificação da qualidade do processo de desenvolvimento do Modelo Geológico	54
2 COMENTÁRIOS	55
2.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO	56
2.1.1 Definições	56
2.1.2 Princípios fundamentais	56
2.2. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO	57
2.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento	57
2.2.2 Escolha do nível de desenvolvimento do Modelo Geológico	60
2.2.3 Detalhes do processo de desenvolvimento	61



Diretrizes para Desenvolvimento e Aplicação do Modelo Geológico-Geotécnico	
2.2.4 Modelo Geológico e Eurocode	75
2.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	76
2.3.1 Introdução	76
2.3.2 Resumo para preparação de componentes do Modelo Geológico	76
2.3.3 Implicações de provisionamento do projeto	76
2.3.4 Relatórios Informativos de Modelos Geológicos	76
2.3.5 Criando e visualizando um modelo digital 3D	82
2.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO	96
2.4.1 Introdução	96
2.4.2 Fontes de incerteza	99
2.4.3 Avaliação holística do Modelo Geológico	100
2.4.4 Outros métodos de avaliação da incerteza e confiabilidade do Modelo Geológico	101
2.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO	108
2.5.1 Objetivos gerais de qualidade do Modelo Geológico	108
2.5.2 Verificação da qualidade do processo de desenvolvimento do Modelo Geológico	108
2.6 MODELOS GEOLÓGICOS E ENGENHARIA DE PROJETOS	111
2.6.1 Descrição Geral	111
2.6.2 Descrição geral do Modelo Geológico e das etapas do projeto	111
2.6.3 Modelo Geológico em investigações no local do projeto	113
2.6.4 Modelo Geológico em análise e projeto	114
2.6.5 Modelo Geológico em gestão de obras	117
2.7 REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A - COLABORADORES	122
3 EXEMPLOS	124
3.1 APLICAÇÃO E DADOS DE SAÍDA DE MODELOS GEOLÓGICOS	125
3.2 MODELOS GEOLÓGICOS PARA PEQUENOS PROJETOS	125
3.3 MODELOS GEOLÓGICOS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA DE ROCHAS	129
3.4 MODELOS DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA PROJETO DE ESCAVAÇÕES EM MACIÇOS ESTRUTURALMENTE CONTROLADOS	145
3.5 MODELOS GEOLÓGICOS PARA ESTUDOS DE ENGENHARIA DE SOLOS	159
3.6 MODELOS GEOLÓGICOS PARA ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS	164
3.7 MODELOS GEOLÓGICOS PARA ESTUDOS DE ESCORREGAMENTOS	118
3.8 MODELOS GEOLÓGICOS PARA ÁREAS CONTAMINADAS	128
3.9 MODELOS GEOLÓGICOS PARA ESTUDOS OFFSHORE	138

Índice de Figuras

Figura 1-1: Visualização esquemática do desenvolvimento do Modelo Geológico ao longo do ciclo de vida do projeto.	16
Figura 1-2: A análise de engenharia deve prosseguir quando as observações forem compatíveis com os conceitos.	18
Figura 1-3: Processo de desenvolvimento do Modelo Geológico	22
Figura 1-4: Estabelecendo unidades geológicas e a base do Modelo Geológico.	33
Figura 1-5: Processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D.	47
Figura 1-6: Abordagem para avaliar a confiabilidade do componente conceitual do Modelo Geológico.	51
Figura 2-1: Influência do tipo de projeto no Modelo Geológico. Reimpresso com permissão da Springer Nature. Boletim de Geologia de Engenharia e Ambiental. Parry et al. 2014, Modelos Geológicos - uma introdução: Comissão 25 da IAEG.	62
Figura 2-2: Características típicas do granito. Reproduzido de Fookes et al. 2015. Geomodelos em geologia de engenharia - uma introdução. © Whittles Publishing 2015.	69
Figura 2-3: Estruturas associadas com dobras abertas (baseado em Price & Cosgrove, 1990).	70
Figura 2-4: Modelo genérico de frequência de magnitude de deslizamento (Moon et al, 2005). Reproduzido com permissão dos autores.	71
Figura 2-5: Visualização após um estudo documental do item conceitual de um Modelo Geológico para um duto que cruza terreno instável afetado por atividades de mineração e escorregamentos (Baynes et al, 2021).	73
Figura 2-6: Convenções de traçado de contatos geológicos.	78
Figura 2-7: Arquitetura SIG para um Modelo Geológico.	80
Figura 2-8: Visualização explícita da geologia da fundação de uma barragem de gravidade em concreto, incluindo andesitos de mergulho suave e zonas de falha atravessadas por diques de felsito em estágio avançado (imagem fornecida por Richard Brehauss e reproduzida com sua permissão).	86
Figura 2-9: Modelo implícito desenvolvido a partir de observações de superfície usando algoritmos para projetar limites em subsuperfície (imagem fornecida por Pat McLarin e reproduzida com sua permissão).	87
Figura 2-10: Melhorias idealizadas na confiabilidade do Modelo Geológico à medida que o projeto avança.	96
Figura 2-11: Malha de retroalimentação para atualizar progressivamente o Modelo Geológico durante o ciclo de vida do projeto.	98
Figura 2-12: Diagrama de confiabilidade para níveis estratigráficos Ting et al (2020).	102
Figura 2-13: Componentes do Modelo Geológico e investigação no local Baynes et al (2021).	115
Figura 2-14: Comparação entre a abordagem clássica e a prática de projeto atual Carter (2015).	116
Figura 3.2-1: Descrição das tarefas iniciais críticas que devem ser realizadas	126
Figura 3.2-2: Esboço de seção transversal antes do desenvolvimento de um Modelo Geológico para as obras temporárias.	127
Figura 3.2-3: Seção transversal do local, incluindo condições previstas e riscos potenciais com base no Modelo Geológico específico simplificado concluído para os trabalhos temporários.	128
Figura 3.3-1: Diagrama de fluxo de trabalho para desenvolvimento do Modelo Geológico em engenharia de rochas (Eggers & Bertuzzi 2020)	131
Figura 3.3-2: Componentes do Modelo Geológico em engenharia de rochas (Eggers & Bertuzzi (2020).	133
Figura 3.3-3: Formato usado para avaliar e descrever os principais componentes do Modelo Geológico.	134
Figura 3.4-1: Exemplo de um modelo de maciço rochoso em escala para um calcário carbonífero com base em interpretação de dados de furos de sondagem para investigar a viabilidade da construção de cavidade no Túnel do Porto de Dublin (esboço à mão por Robert MacKean).	147
Figura 3.4-2: Limitações no uso do sistema GSI (Geological Strength Index) dependendo da escala (Hoek et al. 2013).	149

- Figura 3.4-3:** Ampla distinção de tipos de maciços rochosos ilustrando a mudança na forma de análise na transição de rocha intacta em rocha diaclasada e, em seguida, rocha completamente tectonizada, para um túnel com vão livre de 10m (os esboços são altamente indicativos). Adaptado de Bandis et al. (2011). 150
- Figura 3.4-4:** Principais componentes de um Modelo de Maciço Rochoso (MMR). 151
- Figura 3.4-5:** Desenvolvimento do Modelo de Maciço Rochoso de Wrens Nest (MacKean et al, 2015). 152
- Figura 3.4-6:** Modelo Digital de Elevação para um talude rochoso alto com detalhes do modelo concentrados em áreas de maior concentração de tensões (Sharp & MacKean 2000). 152
- Figura 3.4-7:** Ombreira Leste da Ponte Suspensa de Clifton - Talude Rochoso com 70m de altura aproximadamente. Disponibilizado por Robert MacKean com permissão dos curadores da CSB. 154
- Figura 3.4-8:** Ilustração da classificação do tipo de descontinuidade para granitos tropicalmente intemperizados. Classificação para juntas sub-horizontais usando fotografias de testemunhos e dados de perfilagem ótica de fundo de poço (preparados por Robert MacKean). 154
- Figura 3.4-9:** Avaliação da estabilidade da mina de Wrens Nest (MacKean et al, 2015). 155
- Figura 3.4-10:** Modelo Digital de Elevação em UDEC para o projeto de cavidade de travessia do Túnel do Porto de Dublin (Geo-Design 2002). 156
- Figura 3.4-11:** Modelo Digital de Elevação em UDEC gerado para a principal distribuição de tensões sob carregamento da Ponte Suspensa de Clifton (com permissão dos curadores da CSB). 157
- Figura 3.5-1:** Desenvolvimento de um Modelo Geológico para estudos de solos. 161
- Figura 3.5-2:** Planta e Seção Transversal extraídas de Modelo Geológico para um edifício com subsolo em uma área ribeirinha. A linha vermelha indica o novo nível do subsolo. 163
- Figura 3.6-1:** Protocolo padrão de modelagem de águas subterrâneas segundo Reilly (2001) Crédito: U.S. Geological Survey 175
- Figura 3.7-1:** Exemplo de visualização de um MCR para fins informativos (de Parry & Ng 2010) 119
- Figura 3.7-2:** Exemplo da visualização de possível risco de solo, incluindo deslizamentos, desenvolvido a partir de um modelo conceitual (Baynes et al. 2021). 120
- Figura 3.7-3:** Mapeamento em Hong Kong, (a) Escorregamentos e um possível grande e degradado delta deposicional de corrida de detritos, identificado a partir da interpretação de fotografia aérea. (b) & (c) O mapeamento de campo indicou que o delta é derivado de múltiplos eventos. Por exemplo, a feição identificada em vermelho consiste em um depósito distinto compreendendo seixos e matações angulares a subangulares, ligeiramente a moderadamente decompostos, com uma matriz de clastos. Uma depressão (em amarelo) é evidente acima deste lobo. A evidência de campo sugere que o delta pode representar detritos de uma grande avalanche de rochas. De: Mapeamento Geomorfológico: Desenvolvimento de Métodos e Aplicações em Processos Superficiais da Terra, Capítulo 15 A Aplicação de Mapeamento Geomorfológico na Avaliação do Risco de Deslizamentos em Hong Kong. Parry 2011, © 2011 Elsevier. 122
- Figura 3.7-4:** Unidades de terreno desenvolvidas a partir do Modelo Geológico (Parry 2011). De: Mapeamento Geomorfológico: Desenvolvimento de Métodos e Aplicações nos Processos Superficiais da Terra, Capítulo 15 A Aplicação do Mapeamento Geomorfológico na Avaliação do Risco de Deslizamentos em Hong Kong. Parry 2011, © 2011 Elsevier. 124
- Figura 3.7-5:** Eventos de projeto obtidos do Modelo Geológico (Parry 2011). De: Mapeamento Geomorfológico: Desenvolvimento de Métodos e Aplicações em Processos Superficiais da Terra, Capítulo 15 A Aplicação do Mapeamento Geomorfológico na Avaliação do Risco de Escorregamentos em Hong Kong. Parry 2011, © 2011 Elsevier. 125
- Figura 3.7-6:** Uso de Modelos Geológicos em Avaliações de Risco de Escorregamentos. De: Anais do 11º Simpósio Internacional sobre Deslizamentos (ISL) e 2º Simpósio Norte Americano sobre Escorregamentos, mapeamento geomorfológico de engenharia de risco de deslizamentos em Hong Kong, Parry & Hart 2012. © 2012 CRC Press. Reproduzido com permissão de Taylor & Francis Group. 126
- Figura 3.8-1:** MCA na APR (Avaliação Preliminar de Risco) - Planta - mostra a localização de fontes e receptores; a linha verde tracejada indica a seção transversal na Figura 3-28. © Land Quality Management Ltd. Reproduzido com permissão. 130
- Figura 3.8-2:** MCA na APR - Seção Transversal - mostra fontes, vias e receptores em relação à geologia. Neste exemplo, a continuidade da camada de argila é incerta. © Land Quality Management Ltd. Reproduzido com permissão. 131



- Figura 3.8-3:** MCA na APR - Diagrama de Rede - mostra potenciais ligações com contaminantes. 132
- Figura 3.8-4:** MCA com base nos resultados da investigação intrusiva da área e análise quantitativa de risco - Seção transversal. Neste exemplo, a investigação da área comprovou que a camada de argila é contínua. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão. 133
- Figura 3.8-5:** MCA baseado nos resultados da investigação intrusiva da área e desenvolvido durante a análise quantitativa de risco - diagrama de rede - Neste exemplo, a ligação envolvendo o Aquífero Arenítico não está mais presente, mas os riscos para futuros residentes e futuras habitações permanecem. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão. 134
- Figura 3.8-6:** MCA pós-remediação - Planta - ligação restante eliminada pela colocação de camada de cobertura e membranas abaixo das casas. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão. 135
- Figura 3.8-7:** MCA pós-remediação - Seção Transversal - neste exemplo, a remediação com uma camada de cobertura e membranas abaixo das casas comprovadamente elimina as ligações com contaminantes relevantes restantes. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão. 136
- Figura 3.8-8:** MCA pós-remediação - Diagrama de Rede - neste exemplo, todas as ligações com contaminantes relevantes restantes são mostradas como eliminadas, com os motivos. (A investigação da área e a análise quantitativa de risco demonstraram que P1 não estava presente no local). © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão. 136
- Figura 3.9-1:** Modelo Geológico offshore simples utilizando furos geotécnicos e dados sísmicos. 139
Nota: BML interpretado como abaixo da superfície de lama.
- Figura 3.9-2:** Alinhamento da abordagem com as necessidades do Projeto. 140
- Figura 3.9-3:** Diagrama de fluxo de trabalho para desenvolvimento de Modelo Geológico em ambiente offshore. © BP 2022. 143



Índice de Tabelas

Tabela 1-1: Níveis de desenvolvimento do Modelo Geológico de acordo com o projeto e complexidade geotécnica*	23
Tabela 1-2: Orientação sobre requisitos de escopo para níveis de desenvolvimento do Modelo Geológico *	25
Tabela 1-3: Resumo para documentação dos componentes do Modelo Geológico.	40
Tabela 1-4: Checklist para avaliação de modelos digitais 3D.	48
Tabela 1-5: Checklist de GQ/CQ do Modelo Geológico	54
Tabela 2-1: Fontes para um Estudo Documental (Shilston et al. 2012).	63
Tabela 2-2: Comparação entre modelos explícitos e implícitos.	89
Tabela 2-3: Incerteza relacionada às informações disponíveis	103
Tabela 2-4: Confiabilidade do modelo geológico e geotécnico em projetos de túneis usando o R-Index (modificado de Dematteis e Soldo 2015).	105
Tabela 2-5: Padronização de dados de entrada.	109
Tabela 3.3-1: Exemplo de uma hierarquia de estruturas baseada em dados de furos (Eggers 2016)	137
Tabela 3.3-2: Exemplo de uma classificação de fontes de dados de falhas (Eggers 2016)	137
Tabela 3.3-3: Exemplo de um sistema de classificação de confiança de falhas (Eggers 2016)	138
Tabela 3.3-4: Diferentes tipos de estrutura de foliação	139
Tabela 3.3-5: Exemplo de um modelo de maciço rochoso para um projeto de cobre pórfiro (Eggers 2016)	141
Tabela 3.8-1: Geologia como via fonte/barreira e receptor. © Land Quality Management Ltd reproduzido com permissão.	128
Tabela 3.8-2: Informações que devem constar em um MCA. © Land Quality Management Ltd reproduzida com permissão.	130
Tabela 3.8-3: Usos de um MCA em gestão de áreas contaminadas com base em risco © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.	132



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

INTRODUÇÃO

O objetivo destas Diretrizes é fornecer conselhos sucintos, práticos, acessíveis e confiáveis sobre o uso eficaz de Modelos Geológico-Geotécnicos em uma ampla gama de aplicações, como engenharia civil, mineração, estudos de perigos e riscos geológicos, estudos *offshore*, planejamento de uso do solo e avaliações ambientais. As Diretrizes são abrangentes, destinadas ao uso ou oferecer referência para as partes interessadas em projetos de diferentes escalas que interajam com o terreno ou exijam uma compreensão do mesmo. Estas Diretrizes destinam-se a ter aplicação mundial.

Um Modelo Geológico-Geotécnico é uma estrutura cognitiva abrangente que dá suporte à interpretação e à avaliação das condições geológicas do meio. Uma das suas finalidades é a utilização em projetos para que decisões técnicas apropriadas possam ser tomadas ao longo de todo ciclo de vida do projeto, da concepção ao descomissionamento.

Adotando esta definição, a intenção é ir além do conceito de que um 'modelo' é apenas uma representação tridimensional simplificada e estática das condições do terreno e reconhecer que o Modelo Geológico-Geotécnico é um processo contínuo de acúmulo de conhecimento que direciona a engenharia geotécnica ao longo da concepção, projeto, construção, operação e fechamento de um empreendimento geotécnico.

As Diretrizes foram desenvolvidas para fornecer orientação aos profissionais sobre a abordagem Modelo Geológico-Geotécnico (MGG), incluindo técnicas de modelagem digital 3D, e para informar consultores, clientes, proprietários, instituições governamentais e órgãos reguladores sobre o uso de MGG em projetos.

As Diretrizes foram desenvolvidas por membros da IAEG C25 – Comissão para o Uso de Modelos Geológico-Geotécnicos e representam as visões consensuais dos colaboradores.



O desejo é que estas Diretrizes sejam traduzidas para outros idiomas para divulgação dentro da comunidade de engenharia geotécnica internacional. As Diretrizes serão avaliadas e revisadas após um ano em resposta ao *feedback* de seu uso em diferentes partes do mundo.

As Diretrizes estão estruturadas em três partes:

- 1) Disposições consultivas para o desenvolvimento de Modelos Geológico-Geotécnicos. As Disposições Consultivas indicam como um Modelo Geológico-Geotécnico deve ser adequadamente desenvolvido para qualquer projeto que interaja com o terreno.
- 2) Comentário sobre as Disposições Consultivas. O Comentário fornece informações adicionais de suporte, onde necessário, para cada Disposição Consultiva, e é estruturado com a mesma numeração de parágrafo para facilitar sua referência. Links de hipertexto são fornecidos quando relevantes.
- 3) Exemplos de aplicações de Modelos Geológico-Geotécnicos. Os exemplos ilustram a aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos a diversos tipos de projetos.

Notas:

- 1) O objetivo destas Diretrizes é fornecer informações e auxiliar na tomada de decisões. As Diretrizes não pretendem definir um padrão de trabalho.
- 2) As Diretrizes não devem ser interpretadas como prescrições de um curso de ação ou procedimento na construção de modelos, pois pode haver variações na abordagem e no método para atender às necessidades particulares de geologia e de projeto.

HISTÓRICO

O uso de modelos em geologia de engenharia foi discutido por Zaruba e Mencl (1954 em tcheco) e Morgenstern e Cruden (1977), embora a primeira vez que uma seção transversal do terreno foi criada para ilustrar as condições geológicas em um projeto de engenharia foi, provavelmente, o primeiro modelo geológico. Um exemplo é o trabalho de William Smith e o desenvolvimento de mapas e seções geológicas associadas à construção de canais no Reino Unido no século XVIII.



Fookes (1997) trouxe a ideia de modelos em geologia de engenharia para um público mais amplo, mas referiu-se aos modelos simplesmente como modelos geológicos. Fookes et al. (2000) refinaram a abordagem para incluir o conceito de “história geológica total”, ou seja, que as características de engenharia do terreno resultam de todo o histórico geológico e geomorfológico da área. Knill (2003) sugeriu que um “modelo geológico” é inadequado por si só para fins de engenharia porque não define suficientemente as condições de engenharia no interior do terreno natural nem ajuda no desenvolvimento de um projeto. Ele propôs que seria mais útil pensar em modelos geológicos, modelos de terreno e modelos geotécnicos, estando o tipo de modelo relacionado com a fase ou evolução do projeto. Bock et al. (2004) apresentaram uma perspectiva sobre a relação entre as disciplinas de geologia de engenharia, mecânica dos solos e mecânica das rochas, as áreas de interesse das sociedades científicas internacionais associadas, e a natureza dos modelos geológicos e modelos de terreno.

A Comissão C25 da IAEG publicou um relatório provisório (Parry et al., 2014) que definiu um modelo como “uma aproximação da realidade criada com o propósito de resolver um problema”, delineou uma metodologia para desenvolver Modelos Geológico-Geotécnicos (MGG), diferenciou o componente conceitual e o observacional, e forneceu exemplos. Essa abordagem foi adotada em diretrizes recentes (por exemplo, The Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 28, para ambientes glaciais e periglaciais, Giles et al., 2017). No entanto, a abordagem C25 ainda não foi incorporada às Normas Nacionais e Internacionais.

Baynes et al. (2021) expandiram o relatório provisório C25 e enfatizaram que o Modelo Geológico-Geotécnico (MGG) é uma estrutura cognitiva que pode ser usada para entender e comunicar tudo o que se sabe sobre as informações geológicas e de engenharia associadas em qualquer estágio de um projeto.

As Diretrizes atuais foram desenvolvidas por membros da IAEG C25 - Comissão para o Uso de Modelos Geológico-Geotécnicos, em continuidade à 12ª Conferência Regional Asiática da IAEG em 2019 em Jeju, Coreia do Sul. Um primeiro rascunho das Diretrizes foi apresentado na 3ª Conferência Regional Europeia da IAEG em Atenas em outubro de

Diretrizes para Desenvolvimento e Aplicação do Modelo Geológico-Geotécnico 2021, sendo posteriormente revisadas após os comentários recebidos durante e após o evento, incluindo uma contribuição da IAEG C28 - Comissão para Quantificação de Confiabilidade do Modelo Geológico em Grandes Projetos de Engenharia Civil.



Os colaboradores das Diretrizes e seus países de origem estão listados no Apêndice A.



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

DISPOSIÇÕES CONSULTIVAS

1.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO (MGG)

1.1.1 DEFINIÇÕES

Termos importantes usados ao longo destas Diretrizes são aqui definidos. Outros termos são definidos ao longo do texto.

- Modelo – Uma aproximação da realidade criada com o propósito de resolver um problema.
- Geologia de Engenharia – A aplicação dos conhecimentos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos à engenharia.
- Modelo Geológico-Geotécnico (MGG) – Uma estrutura cognitiva abrangente que permite a interpretação e a avaliação lógica das condições geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas que podem impactar um projeto, e suas características de engenharia. O MGG compreende componentes conceituais e observacionais, e pode consistir em vários modelos e abordagens interrelacionados. O Modelo Geológico, o Modelo Geotécnico e a Avaliação de Perigos Geológico-Geotécnicos são dados de saída da estrutura cognitiva do MGG.
- Modelo Conceitual – Um modelo baseado principalmente em conceitos e interpretações geológicas de engenharia e no conhecimento de que certas condições e processos geológicos provavelmente terão determinadas características de engenharia.
- Modelo Observacional – um modelo baseado principalmente em observações e medições geológicas e de engenharia que são limitadas no espaço por dados 3D (xyz) ou no espaço e no tempo por dados 4D (xyz e tempo). Cada vez mais, o modelo observacional é desenvolvido em um ambiente digital.
- Unidades Geológicas de Engenharia¹ – Volumes de terreno com um histórico geológico e características de engenharia semelhantes que são estabelecidos no contexto da engenharia do projeto.
- Mapeamento Geológico de Engenharia² - Preparação de um mapa descrevendo a

¹ Nota do tradutor: também referido como Unidades Geotécnicas

² Nota do tradutor: também referido como Mapeamento Geotécnico



distribuição e os limites em superfície de unidades geológicas de engenharia, estruturas geológicas, geomorfologia e condições hidrogeológicas que são importantes para o projeto usando simbologia apropriada, realizado em uma escala e nível de detalhe determinados pela finalidade do mapeamento, que pode ir desde a avaliação dos recursos regionais até a confirmação das condições da fundação.

- Modelo Geológico – Um componente de saída da estrutura cognitiva do MGG que representa a distribuição no espaço 3D das unidades geológicas³, condições hidrogeológicas e processos geológicos e geomorfológicos.
- Modelo Geotécnico – Um componente de saída da estrutura cognitiva do MGG que fornece as características de engenharia e/ou parâmetros geotécnicos de feições relevantes do Modelo Geológico.
- Modelo Analítico – Uma simplificação do Modelo Geotécnico desenvolvido para fins de avaliação, análise ou projeto de engenharia.
- Modelo Digital – Apresentação de dados em um ambiente de *software* para permitir a visualização, interpretação e auxílio na comunicação de partes do MGG, cada vez mais desenvolvido em 3D.
- Visualização digital – O componente de saída de um Modelo Digital, geralmente uma exibição ilustrativa em 2D ou 3D de partes selecionadas dos dados.
- Modelo de Terreno – Tipo de modelo, muitas vezes especificado como um entregável em contratos ou exigido por normas, que fornece um resumo da compreensão das condições do terreno e das águas subterrâneas em um local, em um momento específico no tempo. Isso pode incluir parâmetros geotécnicos para as várias unidades nele contidas. O significado deste termo varia em diferentes códigos e normas.
- Perigos Geológicos - processos ou fenômenos geológicos e geomorfológicos que podem impactar adversamente um projeto, por exemplo: desenvolvimento cárstico, deslizamentos, mineração subterrânea, gás subterrâneo, atividade sísmica etc.
- Projeto – a finalidade para a qual o MGG está sendo desenvolvido. Os MGGs são comumente usados para avaliar a resposta do terreno a um projeto de engenharia, mas também são usados para aplicações mais amplas, como a avaliação de recursos

³ Nota do tradutor: O texto original apresenta “engineering geological units”, mas como o termo em descrição é Modelo Geológico, ajustou-se o texto para “unidades geológicas”.

naturais, avaliações regionais de perigos geológicos, etc.

1.1.2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

1.1.2.1 *O MGG avalia as interações entre o projeto e o meio físico natural*

O objetivo do MGG é avaliar a resposta do meio físico natural à mudança considerando as possíveis interações entre o projeto e o terreno. Um MGG eficaz deve antecipar o que pode existir no terreno e como o terreno pode responder ao projeto.

1.1.2.2 *A estrutura cognitiva do MGG*

A estrutura cognitiva do MGG representa uma compreensão das condições geológicas que são de importância para a engenharia do projeto e que podem ser usadas para resolver problemas de engenharia (**Figura 1-1**). O MGG não é 'um modelo', mas vários modelos dinâmicos, além de ser o repositório dos dados básicos (se não estiverem contidos nos próprios modelos), a documentação de suporte (por exemplo, os relatórios de investigação do local) e a estrutura cognitiva que mantém esses componentes juntos. Na medida do possível, o MGG deve ser baseado em todo o conhecimento disponível e relevante, ser construído logicamente seguindo os princípios estabelecidos nestas Diretrizes, ser focado nas condições geológicas relevantes e nas características de engenharia de importância para o projeto, e deve ser claramente comunicado.

Três componentes de saída principais do MGG para um projeto são o Modelo Geológico, o Modelo Geotécnico e a Avaliação de Perigos Geológicos.

1.1.2.3 *MGGs reúnem ideias conceituais e dados observacionais*

O equilíbrio de ideias conceituais e dados observacionais dentro de um MGG irá variar dependendo do tipo de projeto, sua escala, a complexidade geotécnica do local e o estágio do projeto (**Figura 1-1**). A avaliação do terreno no início do projeto é principalmente conceitual na medida em que se baseia no conhecimento, na experiência e na referência a outros casos publicados de condições geológicas e geomorfológicas semelhantes. À medida que o projeto avança e quantidades crescentes de dados observacionais se tornam disponíveis, o MGG evolui, mas o modelo conceitual permanece como a estrutura

para avaliar a interpretação desses dados.

As técnicas envolvidas no desenvolvimento de modelos conceituais e modelos observacionais são diferentes. A primeira envolve o ato de conceituação e a segunda envolve o ato de reunir informações e avaliar dados. No entanto, o uso de ambas no desenvolvimento de MGGs está tão profundamente interligado que, na realidade, elas formam duas ferramentas diferentes, mas essenciais e complementares, que devem ser combinadas em todas as etapas do projeto para gerar um MGG representativo.

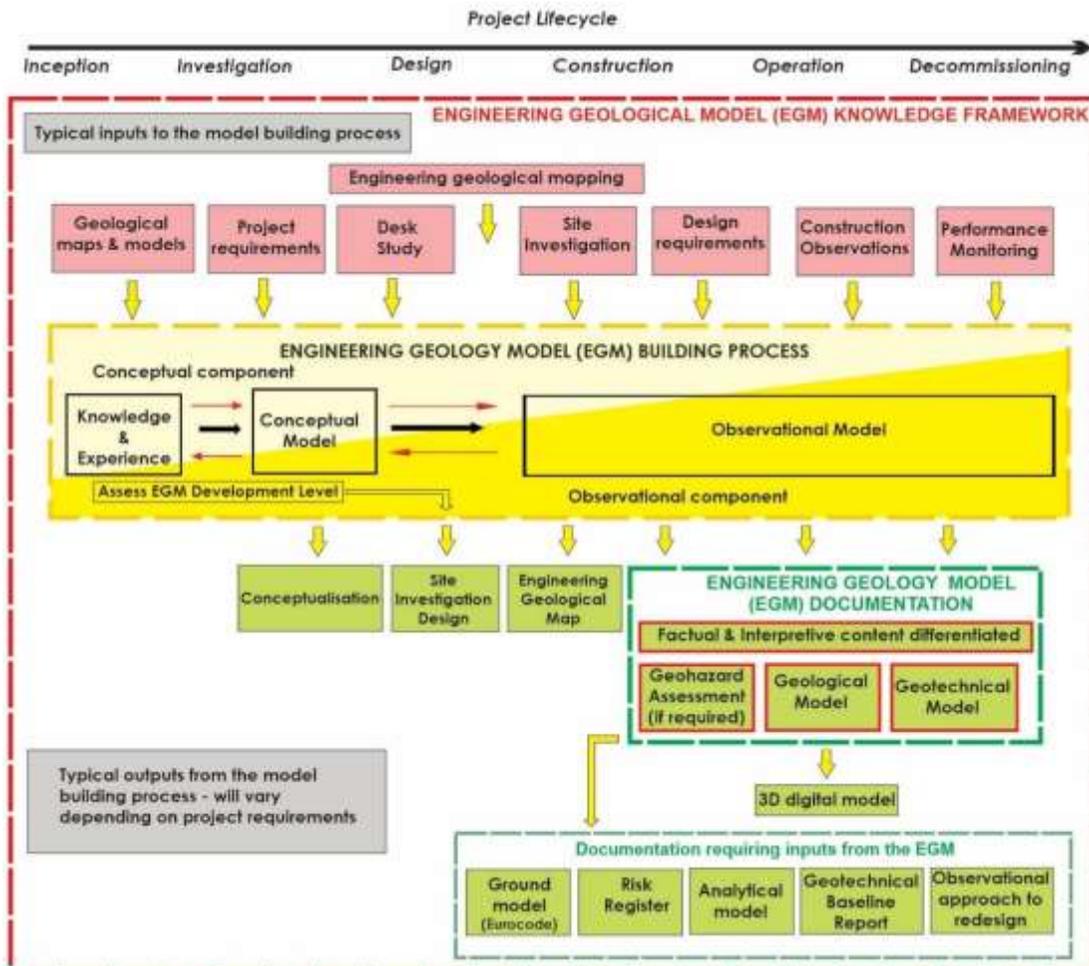


Figura 1-1: Visualização esquemática do desenvolvimento do MGG ao longo do ciclo de vida do projeto.

Em qualquer estágio do projeto, a análise deve prosseguir com cautela até que as ideias conceituais e os dados observacionais tenham sido conciliados e quaisquer discrepâncias residuais possam ser gerenciadas como riscos do projeto aceitos por todas as partes



relevantes (**Figura 1-2**).

1.1.2.4 *Um MGG deve ser desenvolvido para todos os projetos*

Um MGG deve ser desenvolvido para todos os projetos que interagem com o terreno e é igualmente aplicável para projetos muito grandes e muito pequenos, e em uma variedade de escalas geográficas. Observe que, para projetos muito pequenos e simples, o MGG pode ser apresentado em um único e sucinto relatório interpretativo.

1.1.2.5 *O MGG é relevante durante todo o ciclo de vida do projeto*

O desenvolvimento do MGG deve começar no estágio inicial do projeto e ser revisado ao longo do ciclo de vida do mesmo, eventualmente passando por entre vários proprietários, concessionários⁴ e consultores, e fornece uma estrutura transparente e lógica para o desenvolvimento de documentos do projeto relacionados ao meio físico natural (**Figura 1-1**). A estrutura cognitiva do MGG também deve ser parte integrante do sistema de gestão de projetos, pois o MGG documenta o que é conhecido sobre o terreno e, portanto, deve fazer parte dos documentos de contrato (dependendo do modelo contratual) e da documentação base para o desenvolvimento projeto.

⁴ Nota do tradutor: O texto original apresenta "multiple owners", entretanto, para fazer referência à realidade brasileira, ajustou-se para "vários proprietários, concessionários".

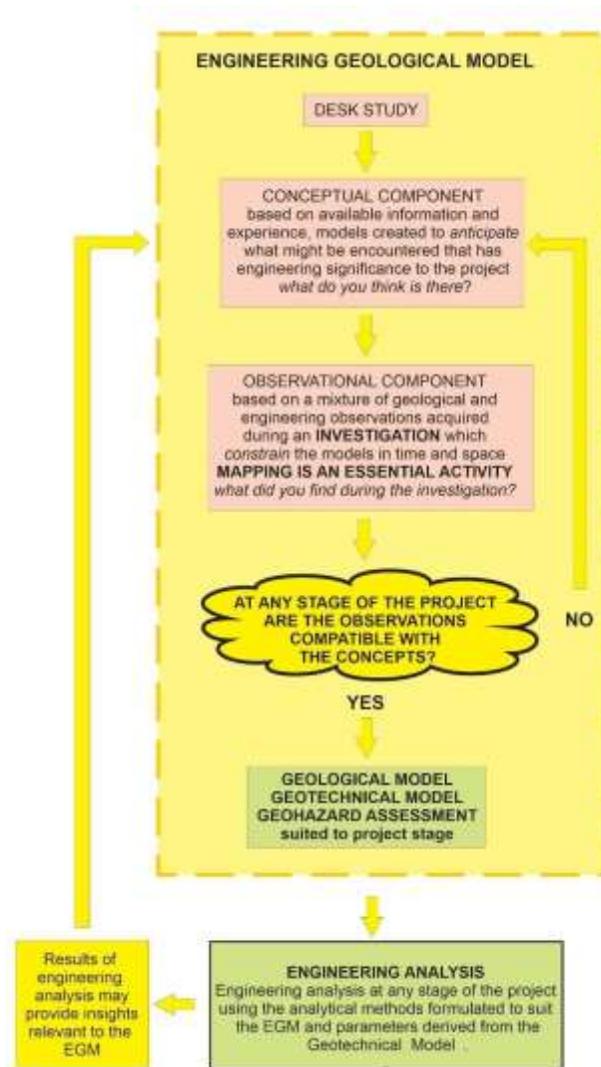


Figura 1-2: A análise de engenharia deve prosseguir quando as observações forem compatíveis com os conceitos.

1.1.2.6 *Conhecimento de geologia e engenharia é requisito para desenvolver um MGG*

Conhecimento e experiência em geologia e em engenharia são necessários para desenvolver um MGG eficaz, mas a ênfase deve ser na geologia. Este conhecimento deve ser baseado na formação profissional, de preferência envolvendo pelo menos uma graduação em geologia ou uma graduação com geologia sendo o componente principal e, idealmente, pós-graduação em geologia de engenharia ou engenharia geológica, ou um período significativo de orientação e treinamento sob a supervisão de um geólogo de



engenharia experiente. Em algumas circunstâncias e em projetos simples, um engenheiro geotécnico competente com conhecimento geológico significativo e/ou com experiência prática no contexto geológico do projeto deve ser capaz de construir um MGG representativo.



1.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

1.2.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

1.2.1.1 *Etapas iniciais*

As seguintes perguntas-chave devem ser feitas no início do projeto:

- Onde está localizado o projeto (geografia/geologia/geomorfologia/ambiente)?
- Qual é o tipo e a escala do projeto, como ele irá interagir com o terreno, quais são as principais dimensões e condicionantes de projeto, incluindo a vida útil do projeto e quais são as principais restrições geotécnicas, preocupações ou consequências de ruptura para um projeto desse tipo?
- Quais informações estão disponíveis com relação às possíveis condições do terreno?
- Qual é o histórico geológico/geomorfológico/antropogênico da região/local que pode ser de importância de engenharia para o projeto?
- Quais perigos geológicos podem estar presentes?
- Quais as condições das águas subterrâneas e superficiais e como elas podem impactar o projeto?
- Qual a situação atual do projeto, por exemplo, está em espera, buscando apoio financeiro, em construção, etc.?

A resposta a essas perguntas-chave permanece relevante durante toda a vida do projeto.

1.2.1.2 *Processo de desenvolvimento*

O processo de desenvolvimento do MGG envolve as seguintes etapas essenciais, geralmente com interações repetidas entre a maioria delas:

- Montar equipe, definir escopo e objetivo.
- Reunir, através de pesquisa, informações relevantes geológicas e de engenharia, de importância para o projeto.
- Realizar um mapeamento inicial de reconhecimento por um geólogo de engenharia competente.
- Conceituar as prováveis condições geológicas com base no conhecimento, na experiência e no estudo documental no início do projeto, mas reavaliar usando



outras informações à medida que se tornarem disponíveis em estágios posteriores do projeto.

- Identificar e documentar as principais incertezas em um registro de riscos. Este registro é utilizado durante todo o ciclo de vida do projeto e precisa ser atualizado regularmente.
- Adquirir observações por meio de investigações (que podem incluir, mas não se limitando à, sensoriamento remoto, mapeamento, geofísica, furos de sondagem, amostragem e ensaios). A importância do mapeamento geológico de engenharia no contexto das investigações não pode ser subestimada.
- Combinar as observações e os conceitos para desenvolver a interpretação das condições do local e, se necessário, reavaliar o modelo conceitual.
- Definir unidades geológicas, interpretar sua distribuição e gerar um Modelo Geológico.
- Caracterizar as unidades geológicas de engenharia, as condições hidrogeológicas e os processos geológicos utilizando parâmetros geotécnicos reunidos a partir do estudo documental, das investigações e da experiência, gerando um Modelo Geotécnico.
- Identificar incertezas, lacunas e discrepâncias significativas na estrutura cognitiva. Estas são as incertezas potenciais para o projeto e devem ser adicionadas ao registro de riscos.
- Avaliar os riscos e, se necessário, realizar investigações adicionais para melhorar a estrutura cognitiva, minimizando incógnitas e reduzindo riscos.

O processo de desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico (MGG) é ilustrado na **Figura 1-3** e detalhado abaixo.

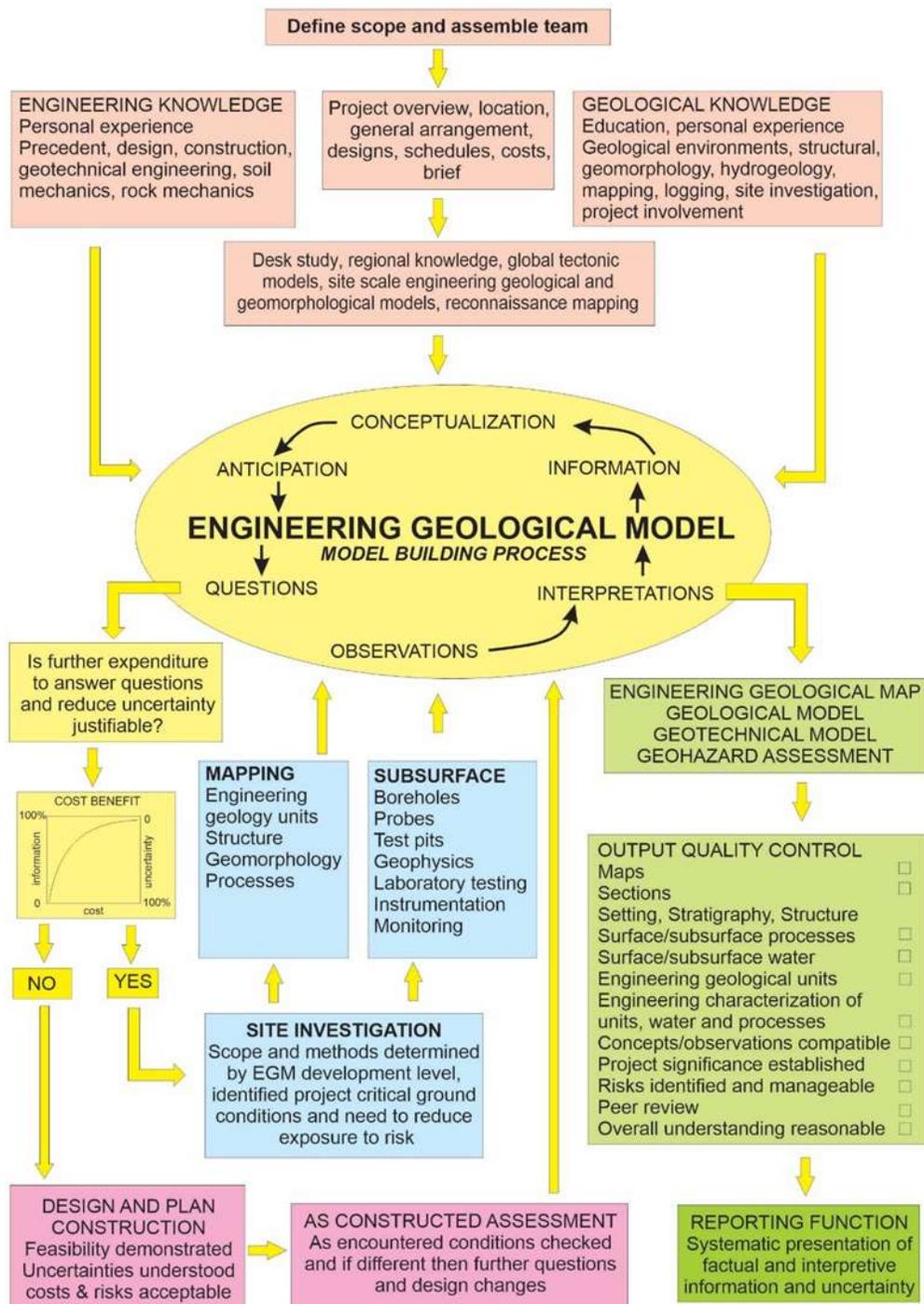


Figura 1-3: Processo de desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico (MGG).

1.2.2 ESCOLHA DO NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O nível de desenvolvimento do MGG a ser adotado é função da complexidade geotécnica



considerada no contexto da complexidade do projeto e das consequências de uma ruptura. Orientações sobre a definição do nível de desenvolvimento são fornecidas nas **Tabela 1-1** e **Tabela 1-2**. O nível de desenvolvimento deve ser revisto se a investigação indicar que a complexidade geológico-geotécnica for maior do que aquela prevista.

**Tabela 1-1:** Níveis de desenvolvimento do MGG de acordo com o projeto e complexidade geotécnica*

	Complexidade geotécnica do terreno que pode influenciar o projeto - conforme indicado pelo modelo conceitual desenvolvido de acordo com estas Diretrizes		
Complexidade do Projeto##	SIMPLES/UNIFORME Estratos horizontais ou de mergulho suave, solos homogêneos, sem perigos geológicos, poucas restrições geotécnicas	MODERADO/VARIÁVEL Dobras e/ou falhas variáveis, solos variáveis, discordâncias, poucos perigos geológicos, algumas restrições geotécnicas potenciais	COMPLEXA/PERIGOSA Dobras e/ou falhas altamente heterogêneas, solos irregulares profundos, discordâncias, complexidade geotécnica considerável, perigos geológicos significativos, como grandes deslizamentos, rupturas ativas, carste ou potencial de magnitude e/ou frequência de perigos geológicos a serem aumentados pelo projeto
Desenvolvimento de engenharia de pequeno porte, área ocupada pequena, baixa consequência de ruptura	Nível 1	Nível 1	Nível 2
Desenvolvimento de engenharia de médio porte, com média consequência de ruptura	Nível 2	Nível 2	Nível 3
Grande infraestrutura, grandes projetos lineares, estudos regionais, altas consequências de ruptura	Nível 3	Nível 3	Nível 3

* Ao avaliar o nível de desenvolvimento apropriado do MGG, deve-se buscar orientação de um geólogo de engenharia competente.

A complexidade do projeto é subjetiva. As consequências baixas e médias de uma ruptura normalmente seriam limitadas a impactos financeiros, enquanto uma alta consequência de ruptura seria tipicamente associada à perda de vida. Ruptura é quando o projeto não funciona de acordo com o design/desempenho especificado.

**Tabela 1-2:** Orientação sobre necessidades para os níveis de desenvolvimento do MGG*

	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Estudos especializados	Nenhum	Nenhum	Estudos separados de perigo geológico (quando aplicável) Possibilidade de estudos geológicos especializados. Possibilidade de estudos de interação terreno/estrutura
Mapeamento	Visitas mínimas ao local, mapeamento de reconhecimento, mapa de esboço geológico/seção transversal da área	Mapeamento geológico, incluindo seções transversais do local e arredores	Mapeamento geológico, incluindo seções transversais do local do projeto e arredores, em diversas escalas
Investigações em subsuperfície	Poucas investigações em subsuperfície conduzidas em uma única etapa, como por exemplo, cavas experimentais, testemunhos de sondagem, conforme apropriado	Investigações em subsuperfície, conforme apropriado, usando testemunhos de sondagem, ensaios de penetração de cone, geofísica, instrumentação, etc.	Investigações em subsuperfície em várias etapas utilizando métodos como testemunhos de sondagem, ensaios in situ, geofísica etc., instrumentação e monitoramento de longo prazo, conforme apropriado. Formação de conjunto de dados de referência.
Testes em laboratório	Testes laboratoriais limitados ou inexistentes	Testes laboratoriais conforme apropriado	Testes laboratoriais extensivos e possivelmente especializados como apropriado
Documentação	Documentação do MGG em relatório simples, factual e interpretativo	Documentação do MGG em relatórios factuais e relatórios interpretativos	Documentação do MGG em relatórios factuais e relatórios interpretativos. Consideração de visualização digital 3D
Equipe	Possivelmente um único responsável pelos trabalhos	Pequena equipe de geólogos de engenharia e geotécnicos responsável pelos trabalhos	Grande grupo multidisciplinar responsável pelos trabalhos
Avaliação	Avaliação Interna*	Avaliação por pares interna e externa*	Avaliação Externa/Painel de Consultores*

* Podem existir requisitos de avaliação específicos da empresa.

1.2.3 DETALHES DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

1.2.3.1 *Montar equipe, definir escopo e objetivo*

A composição da equipe dependerá da complexidade do projeto e do terreno. Isso pode variar de um indivíduo com o conhecimento geológico e de engenharia necessário para um pequeno projeto a um grupo multidisciplinar e um painel de consultores para um grande projeto. As funções e responsabilidades da equipe, do(s) revisor(es) e do(s) aprovador(es) devem ser documentadas. A equipe deve começar definindo o escopo e o objetivo do MGG e deve levar em consideração quaisquer mudanças previstas na titularidade do MGG, como por exemplo, quando o MGG for desenvolvido por uma agência governamental e depois transferido para o concessionário. Quando a equipe se junta ao projeto em um estágio posterior, ou o projeto é transferido entre partes contratualmente separadas, a documentação existente do projeto deve ser examinada para identificar quaisquer lacunas ou inadequações.

1.2.3.2 *Reunir em escritório informações geológicas e de engenharia relevantes ao projeto*

Um estudo documental é um exercício de coleta de informações para reunir material relevante de modo a se obter o aproveitamento máximo extraído de fontes disponíveis antes de investir tempo e dinheiro coletando novas informações. As informações provavelmente serão mapas geológicos, mapas topográficos, quaisquer dados existentes de investigação do local, tais como furos de sondagem, dados de sensoriamento remoto, informações de perigo geológico, etc. Os dados históricos não devem ser desconsiderados caso tenham sido substituídos por bancos de dados mais recentes ou registrados em um estilo diferente dos padrões atuais.

Como parte do estudo documental, o mapeamento de reconhecimento deve ser realizado onde for prático. Isso permite a avaliação dos dados do estudo documental e auxilia na consolidação.



1.2.3.3 Conceituação do Modelo Geológico-Geotécnico

Conceituação⁵ é o processo pelo qual todas as informações disponíveis são consideradas e um entendimento é desenvolvido sobre as condições do terreno no local e como elas se desenvolveram ao longo do tempo. Isso deve ocorrer inicialmente após o estudo documental, mas deve ser realizado periodicamente à medida que informações adicionais forem coletadas. A conceituação permite uma avaliação de quais condições e quais variações podem estar presentes e os processos geológicos e geomorfológicos que as produziram e que podem ser importantes para a engenharia do projeto.

Durante a conceituação, os seguintes aspectos locais devem ser considerados:

1.2.3.3.1 Contextualização do Projeto

Isso deve ser baseado em uma apreciação de:

- A configuração tectônica geral e a geologia regional do local do projeto.
- As possíveis configurações climáticas atuais, passadas e futuras do local do projeto.
- A necessidade de olhar para além da área imediata do local do projeto, como por exemplo, a avaliação de perigos de escorregamentos ocorrendo fora da área do projeto.

1.2.3.3.2 Estratigrafia – tipos e relações entre rochas e solos

Isso requer uma compreensão dos processos de formação e modificação de rochas, bem como dos processos de origem, transporte e deposição que produziram os tipos de rocha e de solo na área do projeto. Isso permite uma compreensão sobre o maciço rochoso e das propriedades dos materiais rochosos e do solo, as prováveis características das unidades geológicas, incluindo suas condições de contorno, além de sua provável geometria, distribuição e relações - entre si e com o projeto.

Deve ser compreendida a idade estratigráfica dos materiais e a identificação da sequência de eventos geológicos a que os materiais estiveram sujeitos desde a sua formação. Isso fornece suporte à aplicação da abordagem do modelo geológico total, na qual todas as características de engenharia do terreno são interpretadas como resultantes de todo o

⁵ Nota do tradutor: É provável que o termo mais usado em português seja “consolidação”, mas optou-se por manter a referência direta ao termo original em inglês.



histórico geológico e geomorfológico da área.

1.2.3.3.3 Estrutura Geológica

Deve ser desenvolvida uma compreensão das estruturas geológicas, incluindo a presença de feições tectônicas em todas as escalas, a natureza dos contornos das unidades geológicas e as discontinuidades dentro delas, sua origem, geometria, espaçamento, extensão, feições características e sua significância para a engenharia. Essa compreensão também deve incluir a sequência de eventos de formação de rochas e solos, fases de deformação, desenvolvimento do relevo e efeitos de alívio de tensões.

1.2.3.3.4 Processos em superfície e subsuperfície

É necessária a identificação de possíveis perigos geológicos ativos ou potencialmente reativados, e uma avaliação inicial de suas prováveis variações em magnitude e frequência ao longo do tempo. As condições das águas superficiais e subterrâneas e como elas podem mudar ao longo do tempo também devem ser avaliadas.

1.2.3.3.5 Caracterização geológico-geotécnica inicial

Se possível, deve-se atribuir parâmetros geotécnicos a partir do modelo conceitual, com base em dados existentes ou experiência, desde que razoáveis, como por exemplo, resistência do solo e da rocha, deformabilidade, permeabilidade, taxas de processos geomorfológicos, etc. A avaliação de perigos geotécnicos potenciais (e possíveis oportunidades de projeto) pode ser usada para preencher um registro de risco inicial.

1.2.3.3.6 Modelo Geológico Inicial

A conceituação irá gerar um Modelo Geológico inicial que pode ser usado para planejar a investigação a ser conduzida no local. O Modelo Geológico é então refinado pela aquisição de dados observacionais das investigações no local do projeto.

1.2.3.4 *Obtenção de informações na área do projeto por meio de investigações*

As informações adquiridas durante o estudo documental são o ponto de partida para o desenvolvimento de modelos conceituais e observacionais. No entanto, a maioria das informações é adquirida durante a(s) etapa(s) de investigação no local do projeto. Outras

informações são adquiridas durante as etapas de construção e operação.

As investigações do local que consistem apenas em observações e interpretações sem o uso de uma estrutura conceitual, provavelmente são fundamentalmente falhas e não devem ser aceitas.

Após a conceituação, deve haver um amplo entendimento das possíveis características e distribuição das unidades geológicas no local, da natureza de quaisquer perigos geológicos e de qualquer suspeita de lacunas na estrutura cognitiva. Esse entendimento deve então ser focado nas características do terreno que são críticas para o projeto e deve ser usado para identificar alvos de investigação e planejar investigações que irão melhorar o entendimento e reduzir a incerteza nessas áreas críticas.

Enfatiza-se a importância do mapeamento que inclui observações e interpretações na investigação de qualquer projeto. Todos os projetos devem ter um mapa geológico-geotécnico compilado e de responsabilidade da equipe responsável pelas investigações. Essencialmente, esses mapas devem ser desenvolvidos no campo, embora cada vez mais o componente de campo envolva a verificação de mapas preparados no escritório, combinando observações advindas de vários bancos de dados em um ambiente digital 2D ou 3D, ou da interpretação de imagens de sensoriamento remoto.

Para projetos maiores, locais mais complexos ou estruturas críticas, a investigação acontece geralmente em várias etapas com os dados observacionais sendo comparados ao modelo conceitual para ver quais áreas de incerteza e quais riscos ainda precisam ser explorados em etapas sucessivas da investigação.

As investigações irão adquirir dados observacionais que normalmente incluem:

- Levantamento topográfico, e cada vez mais usando MDEs (Modelos Digitais de Elevação) gerados por LiDAR (*Light Detection and Ranging*).
- Mapeamento geológico-geotécnico em várias escalas, desde estudos regionais, estudos da área do projeto, estudos de componentes geotécnicos e estudos de

fundações individuais. Todo o mapeamento deve estar perfeitamente integrado a um único banco de dados que pode ser visualizado em várias escalas.

- Informações de técnicas de investigação diretas, como furos de sondagem, cavas experimentais, poços, galerias, etc.
- Perfilamento de furos, como perfilagem ótica, geofísica e outras ferramentas.
- Instrumentação instalada e os resultados do monitoramento.
- Resultados de testes de laboratório e de campo.
- Medições de águas subterrâneas e superficiais.
- Resultados do levantamento geofísico.
- Descrições e classificações (por exemplo, tipos de rochas, classes de resistência das rochas usando sistemas e terminologia reconhecidos).
- Medições como profundidades de contatos de unidades geológicas em um furo de sondagem, direções e mergulhos de unidades geológicas e de descontinuidades.
- Técnicas de sensoriamento remoto como InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).
- Outros dados observacionais, incluindo modelos observacionais temporais (por exemplo, séries históricas de sismicidade, precipitação, escorregamentos, etc.) que são críticos para prever a frequência de perigos geológicos futuros.

O mapeamento deve começar após o desenvolvimento do modelo conceitual e pode ser inicialmente baseado em sensoriamento remoto. Onde for prático, isso pode ser avaliado durante o reconhecimento de campo. O levantamento detalhado pode ser realizado usando uma variedade de técnicas, desde simples levantamentos com trena de pontos de controle, até a localização das observações em um MDE de alta resolução (quando disponível) ou ortofotos.

É essencial que qualquer mapeamento geológico-geotécnico também capture padrões geológicos (por exemplo, lineamentos, padrões estruturais, tipos de descontinuidade e traços de contato, etc.), bem como a geomorfologia.

1.2.3.4.1 Verificação dos dados de entrada

Antes de qualquer interpretação dos dados observacionais, deve haver uma etapa de



avaliação e compilação de dados, onde as principais questões de precisão, utilidade e representatividade devem ser testadas para cada conjunto de dados. Quaisquer preocupações sobre precisão e representatividade do banco de dados devem ser documentadas juntamente com possíveis explicações.

1.2.3.5 Combinação de conceitos e dados observacionais no MGG

A combinação de componentes conceituais e observacionais envolve interpretação. A interpretação envolve, tradicionalmente, a criação manual de mapas, seções, esboços e textos, mas agora é cada vez mais realizada em ambiente digital. Isso envolve “interpretação de superfície” durante o desenvolvimento de um modelo digital 3D no qual mapas geológicos, mapas geomorfológicos, LiDAR, topografia, mapeamento de campo e observações etc. são agrupados e usados para interpretar as condições do terreno. É essencial que tal interpretação em superfície seja fundamentada no campo.

Este processo iterativo de combinar os componentes conceituais e observacionais do MGG em uma interpretação deve ser rastreável, documentado e estruturado. Julgamentos subjetivos feitos pelos responsáveis pelo desenvolvimento do MGG devem ser evitados e substituídos por fontes objetivas e avaliáveis (por exemplo, modelos e estudos de casos da literatura, mapeamento, investigação geotécnica, monitoramento geotécnico, etc.) juntamente com o raciocínio por trás de sua adoção na interpretação.

O mapeamento geológico-geotécnico e geomorfológico em campo raramente é realizado como algo rotineiro em projetos, mas é uma técnica que requer observação baseada em campo e interpretação conceitual realizadas simultaneamente e que, ao fazê-lo, gera a visualização 2D do MGG na forma de mapa. Alguma forma de mapeamento geológico-geotécnico e geomorfológico deve ser uma parte essencial de todo projeto.

1.2.3.6 Definição e caracterização de unidades geológico-geotécnicas

Um produto importante de qualquer MGG é a definição de unidades geológico-geotécnicas baseada em uma compreensão de suas características geológicas e comportamento geotécnico e são apropriadas para a engenharia do projeto. A definição

das unidades geológico-geotécnicas fornece suporte ao desenvolvimento do modelo geológico.

Uma abordagem comum é adotar unidades geológico-geotécnicas com base em divisões litoestratigráficas distintas identificadas no local (ou seja, as unidades de solo e rocha que podem ser diferenciadas) que geralmente são subdivisões das unidades cronoestratigráficas (unidades baseadas em idade) identificadas no mapa geológico. No entanto, as unidades litoestratigráficas podem não corresponder diretamente às unidades geológico-geotécnicas, isto é, podem não levar em conta processos geomorfológicos distintos, comportamento geotécnico, características hidrogeológicas, etc. Além disso, a resolução de unidades estratigráficas pode não atender o objetivo do modelo.

No entanto, as unidades geológico-geotécnicas não devem cruzar limites litoestratigráficos, como os contatos mostrados em mapas geológicos. A unidade litoestratigráfica contém um histórico geológico distinto e diferentes históricos geológicos não devem ser combinados em uma única unidade geológico-geotécnica, mesmo que as características geotécnicas sejam semelhantes. As exceções a isso são zonas de falha que podem precisar ser consideradas separadamente e que, por definição, cruzam os contatos litoestratigráficos. Observe que esses contatos dependerão da escala – os contatos de um modelo regional podem ser diferentes dos contatos de um modelo de escala local.

As unidades geológico-geotécnicas escolhidas devem refletir as condições que são importantes para o projeto e podem incluir controles geológicos, como intemperismo, alteração e falhamento. A **Figura 1-4** descreve as operações envolvidas na definição de unidades geológico-geotécnicas e, conseqüentemente, no desenvolvimento do modelo geológico.

Assim como em outros aspectos do MGG, a resolução e a escala das unidades geológico-geotécnicas devem estar claramente ligadas ao escopo e objetivo do MGG. As unidades adotadas devem ser avaliadas à medida que dados adicionais estiverem disponíveis.



1.2.3.6.1 Complexidade geotécnica

Em áreas geotecnicamente complexas, as propriedades geotécnicas podem variar rapidamente em uma faixa ampla de valores no interior da área do projeto. A complexidade geotécnica deve, sempre que possível, ser refletida no Modelo Geológico na forma de unidades geológico-geotécnicas suficientes com distribuições e inter-relações apropriadas. Onde isso não for possível, a simplificação pode ser necessária e a documentação do MGG deve descrever os processos geológicos e a história geológica que produziram a complexidade geotécnica, a natureza de quaisquer suposições simplificadoras usadas na geração das unidades geológico-geotécnicas, e ilustrar a potencial complexidade por meio de uma ilustração do modelo conceitual.

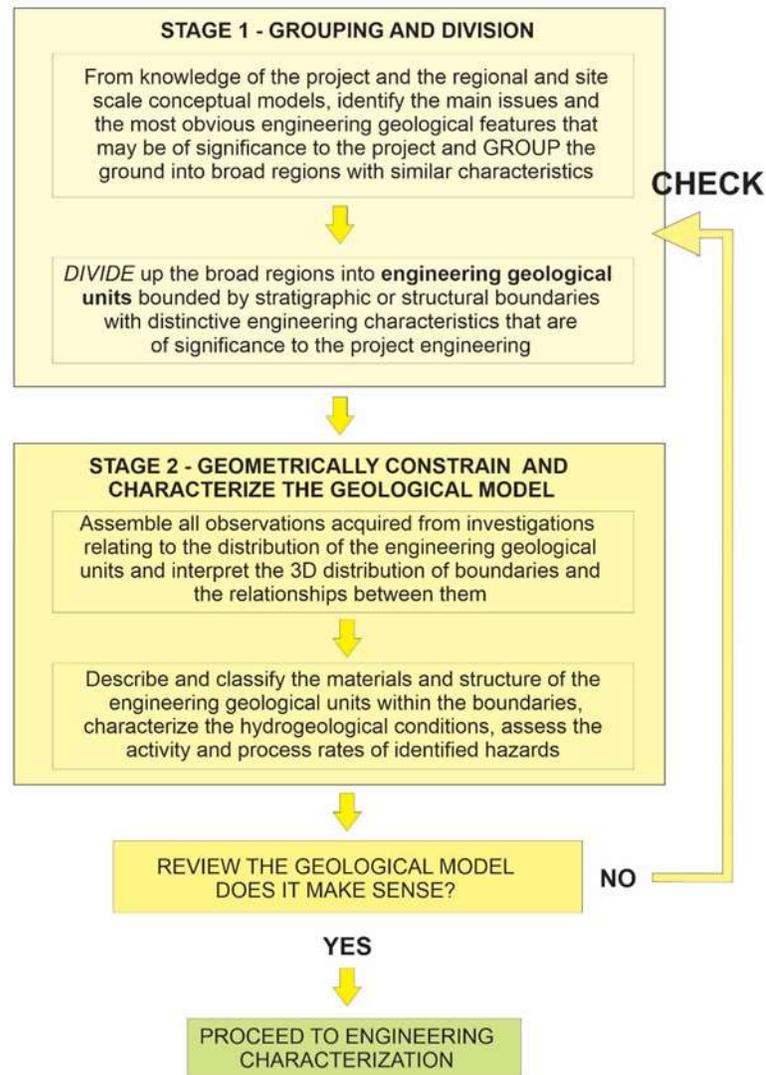


Figura 1-4: Estabelecendo unidades geológico-geotécnicas e a base do modelo geológico.

1.2.3.7 Caracterização de engenharia

A caracterização de engenharia envolve a avaliação e a atribuição de parâmetros geotécnicos relevantes para a engenharia de projeto a cada unidade geológico-geotécnica no Modelo Geológico, que então evolui para um Modelo Geotécnico.

O processo começa durante a conceituação, embora quaisquer parâmetros atribuídos nesta etapa provavelmente estejam associados a uma incerteza considerável. A



investigação da área do projeto envolve ensaios in situ e de laboratório para auxiliar na avaliação dos parâmetros geotécnicos relevantes que variam dependendo das condições do terreno e do tipo de projeto. Os resultados das investigações irão melhorar a caracterização das unidades geológico-geotécnicas e reduzir a incerteza, mas podem diferir do que foi previsto no modelo conceitual.

O Modelo Geotécnico pode envolver uma simplificação dos detalhes contidos no Modelo Geológico, por exemplo, com relação a uma zona de falha complexa, isso pode reduzir as superfícies delimitadoras e algumas hipóteses simplificadas sobre a resistência, rigidez e permeabilidade de toda a zona de falha. No entanto, qualquer simplificação não deve remover as principais unidades geológico-geotécnicas, pois essas precisam ser consideradas separadamente devido ao seu comportamento geotécnico.

A seguinte abordagem deve ser adotada:

- . O foco deve estar nas características de engenharia que são relevantes para o projeto.
- . Agrupar os resultados dos ensaios laboratoriais e in situ para cada unidade geológico-geotécnica identificada.
- . As propriedades dos materiais e os parâmetros geotécnicos devem ser atribuídos principalmente a partir das investigações específicas locais. No entanto, estas podem ser complementados com valores advindos da experiência, teoria, correlação ou empirismo, desde que o método de determinação seja explicado, justificado e referenciado.
- . Deve-se considerar a condicionante resultante das dificuldades de amostragem e testes, o número de ensaios para cada unidade, e selecionar a faixa de valores representativos para a unidade geológico-geotécnica. A média das propriedades do material que mascara a presença de zonas mais fracas significativas não deve ser adotada, e toda a gama de resultados deve ser avaliada para identificar a probabilidade de valores maiores e/ou menores do que os valores representativos.
- . Compare os valores representativos com a experiência e os valores publicados para unidades semelhantes.
- . Considere e explique quaisquer resultados anômalos ou extremos. Isso pode indicar que as unidades geológico-geotécnicas podem precisar de ajuste.



. Destaque quaisquer limitações nos dados ou na análise.

A escolha dos parâmetros de engenharia para uso na análise pelo projetista deve ser baseada nas informações acima, apresentadas de preferência graficamente, juntamente com considerações sobre objetivos de engenharia de projeto, risco e possivelmente requisitos normativos.

1.2.3.7.1 Zoneamento

Uma vez definidas as unidades geológico-geotécnicas e avaliadas as características geotécnicas, pode ser útil definir zonas ou domínios de mesmas características geotécnicas. As zonas podem ser definidas por comportamento geomecânico, velocidade sísmica, classificação do maciço rochoso, etc., mas também podem ser baseadas em qualquer atributo de importância de engenharia para o projeto, por exemplo, potencial de sulfato ácido, suscetibilidade a deslizamentos ou geoquímica das águas subterrâneas, para que o MGG possa ser usado para uma variedade de análises de engenharia, avaliação de risco, viabilidade construtiva, etc. A decisão sobre o zoneamento apropriado deve ser feita em conjunto com os projetistas e a equipe de engenharia mais ampla.

A escala na qual o zoneamento é realizado deve refletir a natureza dos dados e como os resultados devem ser usados. O zoneamento não deve ser nem mais e nem menos detalhado do que os dados permitirem.

Um erro comum é zonestar o terreno, por exemplo, na escala dos furos de sondagem e, em seguida, tentar "juntar os pontos" entre furos. É quase impossível levar em consideração o cenário geológico mais amplo e a história geológica total usando este método. Para que o MGG contribua efetivamente para a análise e para o projeto de engenharia, as análises de sensibilidade desenvolvidas para certas zonas críticas definidas pelo modelo devem informar a resolução e a escala do zoneamento.



1.2.3.8 Incertezas, lacunas e discrepâncias no MGG

Durante o desenvolvimento do MGG, devem ser feitas avaliações periódicas do grau de concordância entre as ideias conceituais e os dados observacionais progressivamente adquiridos. Essas avaliações normalmente ocorrem em etapas predefinidas de relatórios informativos do projeto.

Se houver uma desconexão entre o previsto e o que foi encontrado durante as investigações, as justificativas para isso precisam ser identificadas e o MGG aprimorado. Se, durante o desenvolvimento do projeto, o MGG não permitir uma previsão realista de como o terreno responderá ao projeto com o nível de certeza necessário, mais informações serão necessárias para melhorar o MGG. As melhorias no MGG para mitigar os riscos identificados podem assumir a forma de investigações adicionais ou estratégias de desenvolvimento de projeto, como maior conservadorismo ou a adoção do método observacional durante a construção.

À medida que um projeto avança para a fase de construção, as condições expostas do terreno devem ser avaliadas em relação às condições previstas pelo MGG. Em seguida, deve-se avaliar se essas variações podem impactar o desenvolvimento do projeto ou construção, se métodos precisam ser alterados, ou se o registro de riscos requer atualização.

Ao longo do desenvolvimento do MGG, incerteza, lacunas e discrepâncias podem se manifestar como riscos. Quando os riscos potenciais para o projeto forem considerados significativos, eles devem ser informados no registro de riscos. A gestão desses riscos deve se basear na compreensão do nível de risco aceitável para o cliente, para o público em geral e conforme determinado por legislação. O apetite ou tolerância ao risco do cliente deve se basear em uma compreensão das condições conhecidas do terreno, que devem ser comunicadas por meio do MGG.

1.2.4 MGG E EUROCODE

A abordagem descrita neste item é um abrangente processo para desenvolver a estrutura



cognitiva do Modelo Geológico-Geotécnico para a tomada de decisões de engenharia em qualquer tipo de projeto e em qualquer estágio do ciclo de vida do projeto. A abordagem do Eurocode tem uma aplicação mais restrita para selecionar etapas de certos tipos de projetos e existem diferenças terminológicas, notadamente no que diz respeito aos componentes de um “modelo de terreno”, enquanto o conceito de MGG desenvolvido ao longo do ciclo de vida do projeto não ser mencionado.

Consulte “2.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO” para mais informações.



1.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

1.3.1 INTRODUÇÃO

O MGG deve ser documentado em um formato que possa ser usado para comunicar seus vários componentes, principalmente para consultores e contratadas, além de ser acessível para públicos diversos.

A documentação deve incluir, no mínimo, texto, mapas e seções, porém, mais frequentemente, consistirá em texto detalhado e diagramas, tabelas, registros, fotografias, mapas, seções, bases de dados, dados digitais processados e modelos que devem ser essencialmente claros, autoexplicativos, completos e de fácil compreensão.

Todos os dados codificados do MGG devem ser processados e preservados em um sistema de gestão e apresentação de dados centralizado, padronizado e integrado. Os dados podem variar de mapas e seções desenhados a mão à modelos 3D, incluindo, às vezes, modelos sofisticados gerados por *softwares* e modelos 4D (espaciais e temporais) que descrevem as taxas de variações de processos.

1.3.2 RESUMO PARA DOCUMENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO MGG

A **Tabela 1-3** é um exemplo resumido a ser seguido para documentar os vários componentes de um MGG. Para pequenos projetos, muitos desses itens podem ser descritos em parágrafos únicos e toda a documentação apresentada em um breve relatório.

Em algumas circunstâncias, uma investigação do local será projetada usando um MGG, mas após a conclusão da investigação, o requisito contratual será apenas a entrega de um relatório final, com o qual o produto ficará incompleto, porque faltará um conteúdo interpretativo. Tais circunstâncias devem ser reconhecidas e documentadas por todas as partes do contrato. Para grandes projetos, pode haver vários volumes de diferentes relatórios nos quais os componentes do MGG estão documentados.



Ao licitar serviços geotécnicos para grandes projetos, o fornecimento de todos os componentes de um MGG deve, idealmente, ser um item de escopo separado e relacionado ao fornecimento de relatórios pontuais e interpretativos. Nessas circunstâncias, os documentos do edital de concorrência devem descrever especificamente as expectativas de desenvolvimento do MGG, enquanto o processo de avaliação da licitação deve considerar as capacidades do MGG do proponente, sendo que o orçamento deve ser feito no início do projeto.

1.3.3 IMPLICAÇÕES NA CONTRATAÇÃO DE PROJETO

A documentação dos componentes do MGG preparada de acordo com estas Diretrizes deve ser incluída ou referenciada na documentação do projeto. Dependendo da estratégia de desenvolvimento ou contratação, deve haver marcos identificáveis dentro do cronograma sobre quando a documentação dos componentes do MGG deve ser concluída e preservada como um registro do que era então conhecido. À medida que o projeto avança, a documentação dos componentes do MGG pode ser revisada para refletir a mudança de conhecimento. A seguir, são listados marcos principais:

- Para pequenos projetos, haverá um único marco, geralmente na conclusão da investigação do local.
- Para projetos maiores, alguns ou todos os seguintes marcos podem ser aplicados:
 - Na conclusão do estudo documental.
 - Ao término de cada etapa da investigação.
 - Ao término de cada etapa de projeto.
 - Na finalização do contrato das principais atividades.
 - No acordo das condições básicas contratuais, se aplicável.
 - Em pontos acordados durante a construção relacionados à conclusão de diferentes elementos do projeto, por exemplo, fundações de barragens, túneis, etc.

Ao solicitar propostas para projeto/construção, a documentação deve assegurar que o MGG seja transferido para os proponentes, quando as disposições editais/contratuais o permitirem.

Tabela 1-3: Resumo para documentação dos componentes do MGG.

- 1) A documentação dos componentes do MGG deve seguir as Diretrizes IAEG para o desenvolvimento e aplicação de modelos geológico-geotécnicos em projetos.
- 2) Deve ser indicado o nível de desenvolvimento do MGG acordado com o cliente (o escopo do estudo).
- 3) Deve ser apresentado um relatório final que forneça os resultados de todas as investigações, observações e testes laboratoriais, incluindo informações de todos os estudos anteriores.
- 4) Deve ser apresentado um relatório interpretativo (possivelmente em relatórios separados) que inclua:
 - (i) As constatações do estudo documental.
 - (ii) O modelo conceitual e os principais riscos iniciais identificados.
 - (iii) A justificativa para a campanha de investigação do local, levando em consideração o modelo conceitual e os principais riscos do terreno.
 - (iv) As unidades geológico-geotécnicas identificadas – corpos com uma história geológica semelhante e um comportamento geotécnico semelhante no contexto da engenharia do projeto.
 - (v) Um modelo geológico que apresenta a distribuição no espaço 3D das unidades geológicas de engenharia, condições hidrogeológicas e processos geológicos e como estes podem mudar ao longo do tempo.
 - (vi) Um modelo geotécnico que apresenta as características de engenharia e os parâmetros geotécnicos relevantes. Para cada unidade geológico-geotécnica identificada, deve ser feita uma descrição de engenharia e dos parâmetros geotécnicos.
 - (vii) Mapas, plantas e seções em escalas apropriadas devem ser fornecidos para ilustrar os modelos geológico e geotécnico interpretados e para informar a avaliação de engenharia de todos os elementos geotécnicos do projeto. A combinação de informações geológicas, geotécnicas e de engenharia de projeto em um único desenho ou conjunto de desenhos comumente útil.
 - (viii) Uma avaliação de perigos geológicos, se necessário
 - (ix) Se um modelo digital 3D fizer parte da documentação, um relatório de modelo digital 3D deve ser fornecido.



1.3.4 RELATÓRIOS INFORMATIVOS DO MGG

O relatório deve ser segmentado em:

- Informações e observações factuais.
- Interpretações, incluindo conceituações.
- Discussões.

Os requisitos recomendados para os tipos de relatório são descritos abaixo.

1.3.4.1 *Relatório Factual*

Um relatório factual deve incluir, sem se limitar à:

- Objetivos e escopo dos trabalhos.
- Localização e descrição do local do projeto.
- Descrição da geologia regional e geologia local e quaisquer modificações antropogênicas no local do projeto com base em dados pré-existentes.
- Detalhes de quaisquer investigações anteriores no local ou nas proximidades.
- Planta mostrando os locais de investigação já anteriores e atuais.
- Métodos de investigação empregados.
- Resultados de investigações e informações adquiridas.
- Testes laboratoriais e *in situ* realizados e um resumo dos resultados.

Qualquer interpretação realizada e incorporada no relatório factual, como por exemplo, a atribuição de unidades litológicas ou estratigráficas, ou interpretação geofísica, deve ser claramente registrada como dado de interpretação e documentar a incerteza associada a ela. Uma 'declaração de restrição' relacionada a quaisquer aspectos interpretativos do relatório factual podem ser incluída.

1.3.4.2 *Relatório Interpretativo*

O relatório interpretativo deve incluir, mas não se limitar à:

- Referência aos dados em que se baseia a interpretação (o relatório factual ou relatório de dados primários).



- Constatações do estudo documental.
- Modelo conceitual e os principais riscos iniciais identificados.
- Justificativa para o projeto de investigações do local levando em consideração o modelo conceitual e os principais riscos e incertezas.
- Com base nas constatações das investigações, são necessárias informações suficientemente detalhadas e documentadas relacionadas aos seguintes aspectos do projeto:
 - Estratigrafia, litologia, idade, intemperismo e alteração.
 - Compartimentação estrutural, características das descontinuidades.
 - Geomorfologia e processos relevantes em superfície e subsuperfície.
 - Condições das águas superficiais e subterrâneas.
 - História geológica total relevante para as condições do terreno.
 - Detalhes de qualquer modificação antropogênica no local do projeto.
- As unidades geológico-geotécnicas identificadas e as bases para a sua adoção.
- Um modelo geológico que apresente a distribuição espacial 3D das unidades geológicas, condições hidrogeológicas e processos geológicos e como estes podem mudar ao longo do tempo, além de representar seus controles e condições de contorno e águas subterrâneas, processos geomorfológicos e perigos e riscos geológicos que foram observados ou interpretados como existentes dentro e ao redor do local do projeto. O modelo geológico deve caracterizar as unidades do terreno e descrever os contatos onde podem ocorrer mudanças nas propriedades. O contexto regional do modelo geológico deve ser discutido e a sua incerteza deve ser caracterizada. Dependendo dos requisitos do projeto e do relatório, o modelo geológico pode ter um foco específico relacionado ao projeto, podendo ser melhor descrito como, por exemplo, um modelo hidrogeológico ou um modelo de maciço rochoso.
- Um modelo geotécnico que apresente as características de engenharia e parâmetros geotécnicos de todos os aspectos relevantes do modelo geológico, considerando o projeto a ser implantado. Para cada unidade geológica identificada, deve-se apresentar uma descrição de engenharia e os respectivos parâmetros geotécnicos. A faixa de variação das propriedades do material deve ser descrita

assim como a faixa típica de parâmetros. A incerteza no modelo geotécnico deve ser caracterizada. A escolha dos parâmetros de engenharia para uso em cálculos e análises deve ser baseada nas informações acima.

- Quaisquer zoneamentos que tenham sido utilizados ou domínios que tenham sido definidos e as bases para sua adoção.
- Uma avaliação de perigos geológicos quando necessário.
- Uma interpretação de engenharia das implicações das condições do terreno para o projeto.
- Mapas e seções em escalas apropriadas cobrindo o local e arredores devem ser fornecidos para ilustrar os modelos geológico e geotécnico estabelecidos e para alimentar a avaliação de engenharia de todos os elementos geotécnicos do projeto. Dependendo do projeto, a combinação de informações relativas ao modelo geológico e ao modelo geotécnico em um único desenho pode ser útil como base para apresentações a clientes, acionistas, seguradoras ou público em geral.
- Se um modelo digital 3D fizer parte da documentação, deve ser fornecido um relatório de modelo digital 3D que informe seu grau de incerteza e confiabilidade. Todos os arquivos de banco de dados relevantes, que incluem dados interpretados e os arquivos de dados 3D (por exemplo, os arquivos de malha para as superfícies de contorno geológico-geotécnico) devem ser incluídos.
- Recomendações para trabalhos futuros, se relevantes ou necessários.
- Incertezas remanescentes.
- Uma 'declaração de restrições' relacionada a quaisquer aspectos do relatório, quando isso for considerado necessário.

1.3.4.3 Relatório Geotécnico de Referência

Em alguns projetos maiores, particularmente obras subterrâneas, o proprietário e seus engenheiros podem optar por preparar um relatório geotécnico de referência (*GBR - Geotechnical Baseline Report*) para alocar os riscos associados ao terreno entre a contratante e a contratada.



1.3.4.4 Mapas e Seções Geológico-Geotécnicas

Os mapas e seções geológico-geotécnicas são uma parte fundamental da estrutura cognitiva do Modelo Geológico-Geotécnico (MGG) e devem ser preparados de acordo com estas Diretrizes.

1.3.5 CRIANDO E VISUALIZANDO UM MODELO DIGITAL 3D

Houve uma mudança recente, mas fundamental, no uso de *software* para criar modelos digitais 3D, comumente feitos para projetos de médio a grande porte ou onde é encontrada uma geologia complexa. Isso, por sua vez, levou a uma melhoria na interoperabilidade da estrutura cognitiva do MGG com outras disciplinas. Um processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D é mostrado na **Figura 1-5**.

1.3.5.1 Software de Modelagem

Existe uma ampla gama de pacotes de *software* que podem ser usados para produzir modelos digitais 3D e 2D.

1.3.5.2 Fontes e gestão de dados

Devem ser mantidos registros claros e recuperáveis de como os bancos de dados são criados, modificados, interpretados, armazenados, bem como de verificação e outras etapas do processo de desenvolvimento. Para auxiliar no processo de verificação/avaliação revisão/aprovação, é importante manter registros claros e recuperáveis (metadados) de como os bancos de dados são criados, modificados, interpretados e armazenados. A possibilidade de ligação entre os bancos de dados originais e os bancos de dados do modelo modificado é útil para manter a consistência, a responsabilidade e para fornecer informações sobre a incerteza do modelo.

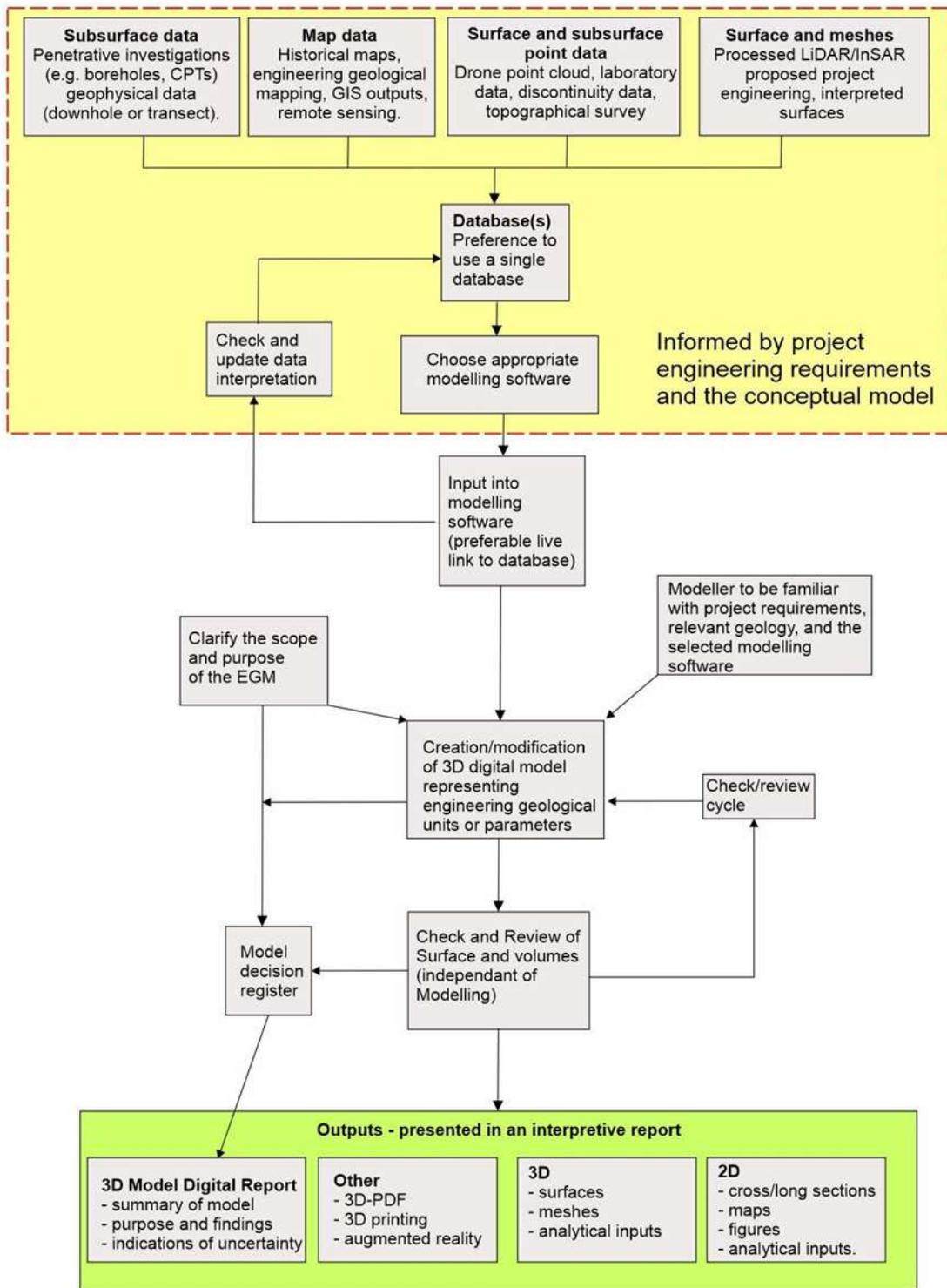


Figura 1-5: Processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D.



1.3.5.3 Documentação do modelo digital 3D

Cada versão/revisão significativa de um modelo digital 3D deve ser acompanhada por um relatório de modelo digital 3D, o qual deve documentar:

- O projeto, a finalidade e o escopo do modelo.
- Um resumo da condição geológico-geotécnica do local.
- A extensão geográfica, escala e aplicabilidade do modelo e sistema de coordenadas utilizado.
- Os componentes de entrada do modelo, incluindo dados de subsuperfície, dados de mapas, dados de pontos em superfície e subsuperfície e malhas utilizadas para formular o modelo digital, uma avaliação da qualidade e confiabilidade dos diferentes bancos de dados e qual manipulação/transformação foi realizada para incorporação dos mesmos ao modelo.
- As unidades e superfícies delimitadoras apresentadas no modelo digital, que podem ser geológicas, geotécnicas, geomorfológicas, hidrogeológicas ou geoquímicas, dependendo da finalidade do modelo.
- Os dados que não foram utilizados e justificativas de sua omissão.
- A confiabilidade e o status do modelo e uma descrição de quaisquer outras suposições e incertezas no modelo, incluindo a confiabilidade do modelo e os riscos relacionados.
- Evidência de verificação.
- Um resumo dos resultados produzidos a partir do modelo, incluindo quaisquer limitações.
- Registro de decisões (*Model Decision Register*) e uma listagem da gestão de dados/desenvolvimento da versão/revisão do modelo digital 3D, incluindo:
 - Data da decisão.
 - Detalhe da decisão/alteração.
 - Justificativa da decisão/alteração.
 - Comentários de verificação/avaliação.

O relatório do modelo digital 3D deve ser atualizado sempre que o modelo digital 3D for

reemitido. Em projetos maiores, onde as investigações estiverem ocorrendo em várias frentes, o modelo pode ser atualizado diariamente, pois pode ser vinculado diretamente a bancos de dados, quando novos dados são incorporados automaticamente. Um geólogo de engenharia competente deve verificar novos dados quando eles são importados, para confirmar a adequação da interpretação existente e para realizar qualquer edição manual necessária para incorporar o novo banco de dados.

1.3.5.4 Avaliação de modelos digitais 3D

A avaliação de modelos digitais 3D deve demonstrar sua confiabilidade com ênfase na qualidade do processo envolvido em sua construção, clareza de entendimento e transparência com relação às incertezas. Acima de tudo, a avaliação deve demonstrar a concordância entre os resultados do modelo digital e a realidade das condições geológico-geotécnicas observadas e interpretadas.

Sempre que modelos digitais 3D forem desenvolvidos, recomenda-se que plantas e seções 2D ilustrativas também sejam geradas para garantir que a ligação com o MGG seja transparente e possa ser visualizada por indivíduos não técnicos sem o uso de *softwares*. Plantas e seções ilustrativas são úteis para detectar "irregularidades" geológico-geotécnicas no modelo.

O checklist na **Tabela 1-4** fornece itens específicos para consideração durante a avaliação e verificação de um modelo digital 3D.

Tabela 1-4: Checklist para avaliação de modelos digitais 3D.

Atividade principal	Status
O objetivo do modelo foi claramente definido?	
A extensão do modelo cobre a área de interesse do projeto e a extensão dos possíveis efeitos do projeto sobre o meio natural, se for usado para avaliações de efeitos?	
As fontes de dados usadas para formular o modelo foram claramente identificadas?	
A qualidade dos dados disponíveis é suficiente para o propósito do modelo?	
Alguma outra fonte de dados potencialmente útil precisa ser incorporada ao modelo?	
Os dados que foram omitidos do modelo são aceitáveis para serem desconsiderados e foram dadas razões pelas quais essas fontes não foram consideradas aplicáveis?	



Existe um número adequado de pontos de dados e uma distribuição razoável de pontos na área do modelo para fazer uma interpretação representativa aceitável?	
A manipulação dos dados utilizados é aplicável e geologicamente aceitável?	
O modelo foi avaliado de acordo com o nível de desenvolvimento do MGG?	
O Avaliador verificou o modelo orientado pelo Modelador?	
Foram fornecidos mapas ilustrativos e seções transversais?	
Foi elaborado um relatório de modelo digital 3D incluindo um registro de decisões, com incertezas identificadas e riscos associados e recomendações para melhorar a confiabilidade?	

1.3.5.5 Dados de saída de modelos digitais 3D

Uma vez que o modelo digital 3D e os dados de saída tenham sido verificados e estejam prontos para emissão, os mesmos podem ser entregues/divulgados. A natureza dos resultados influenciará a forma como a informação é apresentada. Eles podem ser dados de saída 3D ou 2D (ou ambos) dependendo dos requisitos do projeto, mas pode não haver necessidade de *software* de visualização se este não for o método de comunicação mais eficaz – mapas, gráficos, desenhos, apresentações etc. podem ser mais adequados. A forma como os resultados são apresentados e o nível de detalhe devem ser de fácil compreensão para todos.

Consulte “2.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO” para mais informações.



1.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

1.1.1 INTRODUÇÃO

A incerteza dentro do MGG tem o potencial de reduzir sua representatividade para a engenharia do projeto e aumentar o potencial de riscos. A incerteza deve ser avaliada e estratégias devem ser desenvolvidas para reduzir a incerteza e os riscos associados ao projeto para níveis acordados.

1.1.2 FONTES DE INCERTEZA

A forma como o conhecimento é acumulado no MGG reflete a relação dinâmica entre o componente conceitual e o componente observacional. Esses dois componentes fundamentais do MGG são caracterizados por diferentes fontes de incerteza: incerteza conceitual e incerteza observacional.

- A incerteza que ocorre no processo de conceituação é devido à falta de conhecimento ou a conceitos aplicados incorretamente. Isso também é conhecido como incerteza epistêmica, mas para facilitar a referência, essas Diretrizes adotaram o termo incerteza conceitual. A incerteza conceitual reflete principalmente a representatividade dos conceitos básicos no MGG que, por sua vez, dependem fortemente do conhecimento e experiência dos envolvidos.
- A incerteza nos dados dentro do modelo observacional se deve à variabilidade e aleatoriedade das propriedades intrínsecas do terreno e à precisão da medição dos dispositivos de ensaio. Isso é conhecido como incerteza aleatória, mas para facilitar a referência, essas Diretrizes adotaram o termo incerteza observacional. Áreas com menos observações diretas provavelmente possuirão mais incertezas do que áreas com observações diretas frequentes. Observe que qualquer interpretação dos dados dentro do modelo observacional estará associada à incerteza conceitual.

1.1.3 AVALIAÇÃO HOLÍSTICA DA CONFIABILIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A análise do projeto deve avaliar de forma holística a confiabilidade dos componentes observacionais e conceituais do MGG, ao invés de separá-los. O nível de desenvolvimento

do projeto fornece orientação quanto ao tipo de análise (Item 1.2.2. – **Tabela 1-1** e **Tabela 1-2**).

- Para projetos de Nível 1, as análises internas fornecerão uma verificação básica da confiabilidade do MGG. Outro geólogo de engenharia da equipe de projeto responsável pelo MGG deve verificar o desenvolvimento e refinamento do modelo. A confiabilidade do componente conceitual deve ser comparada com situações conceituais análogas advindas da formação profissional, experiência e literatura, e a compatibilidade do componente observacional com o componente conceitual avaliado.
- Para projetos de Nível 2, a análise será como para o Nível 1, mas realizada por analistas externos. Estes podem ser externos à equipe do projeto ou externos à própria organização.
- Para projetos de Nível 3, um painel de análise composto por especialistas reconhecidos deve ser idealmente usado para avaliar a confiabilidade do MGG, avaliando e comentando independentemente o conteúdo, a completude e a confiabilidade da documentação do projeto. Estes devem ser nomeados pelo cliente como especialistas independentes.

1.1.4 OUTROS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA E CONFIABILIDADE DO MGG

Todas as informações que contribuem para o MGG precisam ser verificadas para avaliar a incerteza e a confiabilidade. Para o componente observacional do MGG, tais verificações são relativamente diretas e podem ser realizadas quantitativa ou qualitativamente. No entanto, métodos quantitativos não podem ajudar de forma realista na redução de erros de confiabilidade decorrentes de imprecisões na compreensão conceitual. Somente verificando a aplicabilidade dos conceitos por meio de abordagens qualitativas é possível avaliar esse componente do MGG e, assim, confirmar seu nível de confiabilidade.

1.4.4.1 Avaliação da confiabilidade do componente conceitual

Uma abordagem para a avaliação do componente conceitual do MGG é ilustrada na **Figura 1-6**. Esta abordagem deve ser adotada em todas as fases do projeto pelos

desenvolvedores do MGG, por revisores e por painéis de especialistas.

O melhor meio para avaliar a confiabilidade do componente conceitual é por meio de um painel de especialistas ou avaliação por pares. No entanto, verificações qualitativas básicas da confiabilidade conceitual de um MGG também devem ser feitas à medida que ele for desenvolvido. A autoverificação, bem como a verificação interna, devem ser sempre realizadas, e os resultados devem ser documentados.

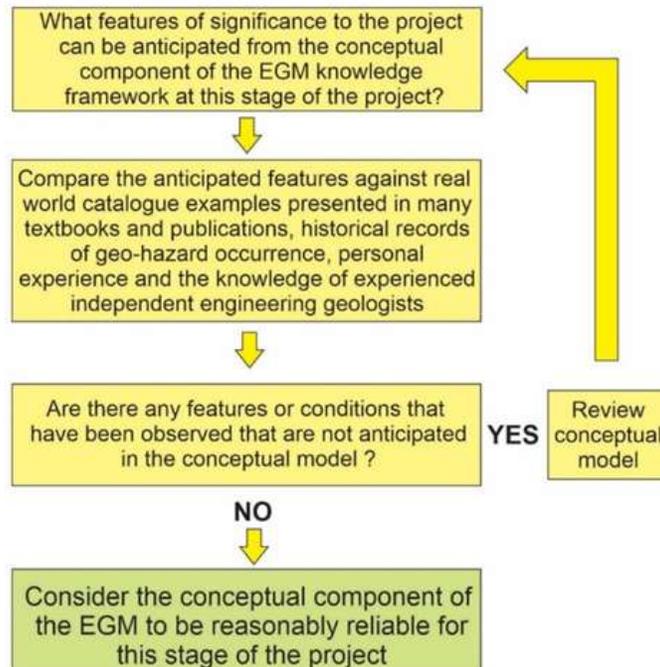


Figura 1-6: Abordagem para avaliar a confiabilidade do componente conceitual do MGG.

1.4.4.2 Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens qualitativas

A confiabilidade do componente observacional do MGG pode ser comunicada qualitativamente usando métodos como mapas temáticos e a classificação da confiabilidade da base de dados.



1.4.4.3 Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens semi-quantitativas

Vários métodos foram desenvolvidos nos quais os componentes do MGG são classificados e as várias pontuações são combinadas para fornecer uma avaliação numérica para classificação da confiabilidade.

1.4.4.4 Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens quantitativas

As avaliações quantitativas limitam-se a avaliar os componentes observacionais do MGG, e três tipos de ferramentas podem ser empregadas:

- Simulações de Campos Aleatórios e Método dos Elementos Finitos Aleatórios (este método envolve o uso de terreno virtual aleatório combinado com análise de elementos finitos dentro de uma simulação de Monte Carlo).
- Métodos geoestatísticos (estacionários e não estacionários, como métodos de krigagem).
- Simulações estocásticas.

Consulte “2.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO” para mais informações.

1.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

1.1.1 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MGG

É possível obter um MGG de qualidade se algumas diretrizes forem aplicadas. A **Tabela 1-5** apresenta um checklist de verificação de QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*) para adesão a estas orientações.

Tabela 1-5: Checklist de QA/QC do MGG

Atividade principal	Status
Uma equipe eficaz e competente, incluindo um avaliador, foi montada?	
O escopo e o objetivo do MGG foram claramente definidos?	
O MGG está em conformidade com os documentos e especificações da licitação/contrato?	
As informações geológicas e de engenharia de importância para o projeto foram reunidas num estudo documental?	
Foram definidas a extensão geográfica e a escala apropriadas para apresentar o MGG?	
As observações foram obtidas através de investigações e foram documentadas como fatos?	
As fontes de dados usadas para formular o MGG estão claramente identificadas?	
A qualidade dos dados disponíveis é suficiente para atender aos propósitos do MGG?	
Existem outras fontes de dados potencialmente úteis?	
Algum dado foi especificamente omitido do MGG e isso é razoável?	
As observações foram relacionadas com os conceitos e um conjunto de condições geológico-geotécnicas foram conceituadas e interpretadas?	
As unidades geológico-geotécnicas e suas características de engenharia foram definidas?	
Foi apresentado um modelo geológico?	
Foi apresentado um modelo geotécnico?	
Foi apresentada uma avaliação de perigo geológico?	
Foram identificados riscos significativos, lacunas e discrepâncias significativas na estrutura cognitiva do MGG?	
Foram fornecidas as informações para uso na análise e estudos de engenharia?	
Toda a estrutura cognitiva do MGG foi documentada?	
Foram fornecidos mapas e seções para ilustrar as condições geológico-geotécnicas que são importantes para o projeto?	
Foi indicado conhecimento adicional necessário para melhorar o MGG, reduzir os riscos, facilitar a atualização do projeto ou lidar com reivindicações (claims)?	
Se um modelo digital 3D foi desenvolvido, o checklist na Tabela 1-4 foi realizado?	
O MGG foi analisado por um geólogo de engenharia devidamente qualificado e experiente, adequado ao nível de complexidade da geologia e do projeto?	

Consulte “2.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO” para mais informações.



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

2 COMENTÁRIOS



2.1 *PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO*

2.1.1 DEFINIÇÕES

Nenhum comentário.

2.1.2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Nenhum comentário.



2.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MGG

2.1.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

Nenhum comentário.

2.2.1.1 Etapas iniciais

Nenhum comentário.

2.2.1.2 Processo de desenvolvimento

Nenhum comentário.

2.2.1.3 Técnicas úteis para o desenvolvimento do MGG

As técnicas úteis a serem consideradas ao desenvolver um MGG incluem:

- Questionar continuamente os conceitos, observações e interpretações à medida que os modelos vão sendo desenvolvidos. Seja flexível e esteja preparado para mudar de ideia.
- Uma visão ampla do quadro geral é essencial ao desenvolver o MGG, da escala regional para a escala local, ou seja, considere os conceitos de macro escala, como cenário tectônico passado e presente e a história geológica e geomorfológica de longo prazo e, em seguida, use esse conhecimento para considerar as condições na escala local, bem como a área vizinha ao local do projeto. Pode ser necessário desenvolver modelos de grande escala a partir de conjuntos de informações iniciais de pequena escala.
- Desenvolvimentos em escala muito grande ou modelos muito complexos com grandes quantidades de informações podem ser desafiadores. O MGG deve capturar a essência das questões do projeto, mas também deve ser robusto o suficiente para avaliar a variabilidade geológica pertinente à engenharia, bem como quaisquer alterações que possam surgir no projeto.
- Modelo Geológico-Geotécnico também deve levar em consideração a dimensão tempo, por exemplo, a taxa/velocidade na qual os processos geomorfológicos estão ocorrendo e qualquer potencial impacto disso na estrutura durante a vida útil do



projeto.

- Quando conhecido, o desenvolvimento proposto (produzido em escala) deve ser sobreposto a todas as plantas, seções e visualizações 3D. Isso deve incluir quaisquer revisões no desenvolvimento do projeto, como acréscimos, reposicionamentos ou exclusões de estruturas ou instalações, à medida que o projeto avança.

Erros comuns cometidos ao desenvolver um Modelo Geológico-Geotécnico incluem:

- Omitir dados ou fatos que não se encaixam ou contradizem um modelo preconcebido. Os dados não devem ser deixados de fora, a menos que se possa demonstrar que são fundamentalmente errôneos, caso em que a reinterpretação deve ser tentada antes de omiti-los. Observe que informações contraditórias podem frequentemente indicar complexidade geológico-geotécnica não considerada durante o desenvolvimento do modelo conceitual.
- Desenvolver ideias conceituais incorretas e inadequadas e/ou ideias conceituais que não sejam relevantes para o projeto.
- Desconsiderar dados ou informações históricas relevantes simplesmente porque não estão registrados nos padrões atuais ou foram adquiridos durante os estágios iniciais do projeto.
- Usar apenas dados de subsuperfície, ignorando o mapeamento geológico e geomorfológico em superfície.
- Não realizar o mapeamento geológico sistemático do local e seus arredores ou apenas realizar o mapeamento em áreas selecionadas de fácil acesso.
- Trabalhar de trás para frente a partir da causa, resultado ou solução de projeto.
- Usar escalas distorcidas ou inadequadas. Coletar dados na escala errada para o projeto. Usar exagero horizontal ou vertical em seções geológicas transversais e longitudinais (se seu uso for necessário, forneça também uma seção em escala natural).
- Tentar incluir cada detalhe sem discriminar seu significado.
- Deixar de olhar além do local do projeto ou problema que está sendo considerado. Por exemplo, em termos geomorfológicos, um projeto precisa ser inserido no



contexto geomorfológico regional.

- Incluir dados ou informações sem referência ao grau de confiabilidade.
- Interpretar mais detalhes do que os dados permitem.
- Deixar de considerar e comunicar interpretações alternativas.

2.2.1.4 *Habilidades necessárias para desenvolvimento de MGG*

O conhecimento e as habilidades necessárias para construir bons Modelos Geológico-Geotécnicos incluem:

- Conhecimento de processos geológicos, ambientes formadores de rocha/solo e ambientes modificadores de rocha/solo, como intemperismo, formação de encostas e alívio de tensões (ou seja, conhecimento geológico).
- Pensar em 4D (ou seja, 3 dimensões espaciais mais o tempo).
- Compreensão da geomorfologia, em particular dos processos geomorfológicos com as suas frequências (ao longo do tempo) e magnitudes (volume, extensão espacial, velocidade de início e propagação).
- Compreensão da resposta do terreno à modificação natural ou antropogênica (ou seja, conhecimento de engenharia) em termos de mecânica dos solos, mecânica das rochas e hidrogeologia,
- Capacidade de avaliar os detalhes e colocá-los dentro do cenário geral, avaliar criticamente as informações e anular pré-conceitos inerentes e inconscientes.
- Compreensão do raciocínio geológico e do método científico. O uso de raciocínio indutivo (o processo de fazer observações simples de um certo tipo e aplicar essas observações por meio de generalização a um problema diferente para tomar uma decisão) e do raciocínio dedutivo (chegar a conclusões com base em regras lógicas aplicadas a um conjunto de premissas).
- Experiência na criação de Modelos Geológico-Geotécnicos realistas e bem-sucedidos.
- Compreender quando é necessário suporte técnico adicional, muitas vezes especializado. Esse apoio pode incluir a busca de contribuições de outros profissionais especializados em disciplinas como hidrogeologia, ciências geoambientais, geomorfologia, geofísica, geologia estrutural, perigos e riscos



geológicos, pedologia, além de disciplinas de engenharia relevantes, como engenharia geotécnica ou de barragens.

2.2.2 ESCOLHA DO NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Nenhum comentário.

2.2.3 DETALHES DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

2.2.3.1 *Montar equipe, definir escopo e objetivo*

Diferentes projetos no mesmo local requerem o desenvolvimento de diferentes modelos devido às diferentes interações entre a geologia e o projeto.

A **Figura 2-1** ilustra como diferentes aspectos do mesmo contexto geológico serão significativos dependendo da natureza do projeto (A - edifício de um andar, B - ponte rodoviária, C - túnel). O edifício transmite uma pequena tensão vertical à superfície do solo. As estacas da ponte aplicam tensões verticais e laterais mais altas no terreno em profundidade e o túnel altera o regime de fluxo das águas subterrâneas em profundidade (Parry *et al.* 2014).

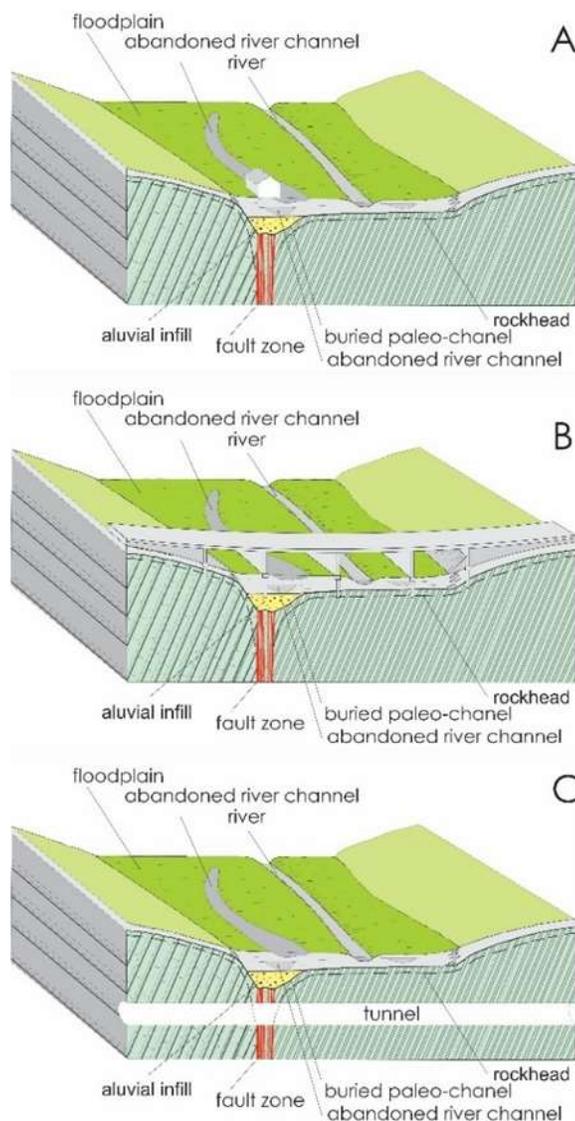


Figura 2-1: Influência do tipo de projeto no Modelo Geológico-Geotécnico. Reimpresso com permissão da *Springer Nature*. Boletim de Geologia de Engenharia e Ambiental. Parry *et al.* 2014, Modelos Geológico-Geotécnicos – uma introdução: Comissão 25 da IAEG.

2.2.3.2 Reunir informações geológicas e de engenharia relevantes em um estudo documental

Fontes típicas de informação que devem (quando disponíveis) ser acessadas durante um estudo documental são apresentadas na **Tabela 2-1**.

Tabela 2-1: Fontes para um estudo documental (Shilston et al. 2012).

<i>Tópico</i>	<i>Exemplos de fontes de informação</i>
Topografia	Mapas, fotografias aéreas, imagens aéreas e de satélite, DEM ou DTM de levantamentos LiDAR, dados InSAR
Geomorfologia, geologia, hidrogeologia e geologia de engenharia	Mapas, memórias e relatórios, fotografias aéreas, imagens aéreas e de satélite (incluindo sombreado ou relevo sombreado de LiDAR), artigos e livros publicados, registros de minas e pedreiras, bancos de dados temáticos, investigações anteriores do terreno no local do projeto, registros de uso de água subterrânea, perigos geológicos regionais, por exemplo, perigos sísmicos.
Planejamento ambiental e de uso do solo	Mapas de planejamento, fotografias aéreas, imagens aéreas e de satélite, Google Earth, relatórios e mapas de geologia urbana, sítios arqueológicos e registros de construções históricas, análises de solos, registros de solos contaminados, estudos ou levantamentos de Impacto ambiental (EIA), registros climáticos, informações fluviais e costeiras
Condição do local, uso do solo e histórico	Mapas históricos, documentos históricos, fotografias aéreas, imagens digitais aéreas e de satélite (incluindo fontes LiDAR), mapas de planejamento e uso do solo, relatórios de investigação do local do projeto, propriedades geotécnicas e perigo geológicos, bancos de dados, dados InSAR, mapeamento de construções anteriores
Visita inicial e reconhecimento	- Reconhecimento do terreno - Inspeção detalhada do local e adjacências - Visitas a locais específicos
Conhecimento local	História local e entidades técnico-científica, uso anterior da área, registros de construção, órgãos públicos, jornais, pesquisas geológicas regionais e nacionais, investigações em locais adjacentes
Precedente	Estudos de casos, registros de construções
Códigos, normas, regulamentos e orientações	Órgãos e institutos profissionais, departamentos governamentais, organizações de pesquisa e universidade

Qualquer pesquisa de literatura precisa diferenciar entre fato e ficção. Existe uma infinidade de sites que contêm informações potencialmente relevantes. No entanto, nem todos fornecem dados confiáveis. Acessar sites confiáveis é vital e os mais adequados são os departamentos e agências governamentais nacionais, regionais e locais, museus, universidades, órgãos acadêmicos e profissionais, organizações de entidades técnico-científicas, etc. (Griffiths 2019). Sites de empresas, arquivos de jornais nacionais e regionais e evidências anedóticas devem ser tratados com certo ceticismo.

Muitos projetos de grande porte precisarão incorporar mapas e seções existentes e impressos em papel no estudo documental. Portanto, algumas regras básicas se aplicam:

- Certifique-se de que, na medida do possível, todas as fontes físicas de dados e materiais arquivados sejam localizados; isso pode exigir um esforço considerável,

pois os registros arquivados geralmente são incompletos e desorganizados. Pode haver questões sobre confidencialidade e direitos autorais a serem consideradas.

- Certifique-se de que a projeção e datum topográficos de quaisquer registros antigos sejam compreendidos e relacionados a projeção e datum que estão sendo usados no MGG. O sistema SIG é de enorme valia por permitir a avaliação espacial de todos os registros do estudo documental, e para promover padronização nos dados.

2.2.3.3 *Conceituação do Modelo Geológico-Geotécnico*

Uma estratégia fundamental no desenvolvimento da estrutura conceitual é que deve haver uma compreensão da “história geológica total” do local (Fookes et al., 2000). Esta estratégia baseia-se na premissa de que as características de engenharia do terreno são o resultado da história geológica total da área do projeto, incluindo a modificação antropogênica posterior.

A conceituação também oferece a oportunidade de articular uma compreensão mais profunda das possíveis influências geológicas em um projeto, com base no conhecimento e experiência de contextos geológicos semelhantes, materiais ou processos e tipos de projetos similares ou níveis de complexidade do projeto. Este processo é central para o desenvolvimento do MGG e ocorre durante toda a vida do projeto. A abordagem conceitual gera modelos hipotéticos e tais modelos potencialmente envolvem um grau relativamente alto de incerteza que está diretamente relacionado ao tipo e quantidade de dados existentes e ao conhecimento e experiência dos envolvidos.

Os modelos conceituais podem ser:

- Específicos do local, fornecendo um contexto para a interpretação dos dados observacionais e permitindo uma previsão das condições do terreno que podem estar presentes no local que está sendo investigado.
- Modelos conceituais genéricos que são independentes de um local específico e fornecem, por exemplo, informações gerais sobre clima ou contextos geológicos estruturais.

- Modelo conceitual temporal (às vezes chamado de modelo evolutivo) que ilustra como as condições do terreno evoluíram ao longo do tempo geológico.

Os bancos de dados listados na **Tabela 2-1** podem ser usados para interpretar as informações relevantes para o MGG da seguinte forma:

Mapas topográficos

- Localização geográfica, portanto, clima e uso do solo atuais.
- Mapeamento geomorfológico inicial.
- Identificação de lineamentos estruturais.
- Identificação dos principais cursos d'água e outros corpos hídricos.
- Modificação antropogênica – pedreiras mapeadas, aterros, galerias de minas, cortes, etc.
- Possíveis depósitos superficiais com formas de relevo distintas, como planícies de inundação, depósitos glaciais, loess, deslizamentos, etc.

Mapas geológicos, relatórios, memórias, publicações

- Os mapas geológicos geralmente apresentam a distribuição de unidades crono e litoestratigráficas, razão pela qual os mapas geológicos padrão precisam de uma interpretação considerável antes de formar a base de um mapa geológico-geotécnico.
- Litologia. Essas unidades oferecem o bloco básico de construção do MGG e a consideração do ambiente/contexto genético pode fornecer informações sobre possíveis variações na litologia que podem estar presentes, mas não mapeadas. O conhecimento da litologia também indicará o tipo, orientação e espaçamento das possíveis discontinuidades e o tipo e geometria dos contornos externos (contatos geológicos) tanto da unidade geológica quanto das subunidades internas.
- Estratigrafia (Idade) – permite avaliar a relação entre as unidades geológicas e o subsequente processo de modificação da rocha/solo, por exemplo, mudanças diagenéticas, modificação tectônica, intemperismo, desenvolvimento de crostas lateríticas etc.



- Estruturas geológicas mapeadas, por exemplo, dobramento e falhamento que permitem avaliar os seus possíveis efeitos no maciço rochoso como o desenvolvimento de diáclases associado ao dobramento, a zona de influência das falhas que, por sua vez, influencia a profundidade do perfil de intemperismo.
- Depósitos quaternários. Observe que estes podem não ser mapeados ou apenas mapeados ao exceder uma espessura fixa. Por exemplo, no Reino Unido, depósitos superficiais com menos de 1 m de espessura normalmente não são mapeados. Onde são mapeados, muitas vezes são consideravelmente simplificados.
- Contatos geológicos, muitas vezes com indicação de graus de incerteza, por exemplo, observados, inferidos, interpretados.
- Modificação antropogênica – trabalhos associados à mineração, aterros, poços ou galerias.
- Embora os mapas geológicos mais recentes na escala apropriada devam ser usados, pode ser necessário consultar mapas mais antigos porque eles podem mostrar características importantes, como por exemplo, minas abandonadas ou estruturas não mostradas em mapas mais recentes. A geologia mapeada pode mudar a cada geração de mapa à medida que os paradigmas geológicos são revisados, portanto é útil entender essas mudanças.

Fotografias aéreas, imagens de sensoriamento remoto

O mapeamento usando fotografias aéreas, sensores multiespectrais aerotransportados ou imagens de satélite auxilia muito no desenvolvimento de ideias conceituais. Embora imagens específicas possam ser limitadas, as imagens do Google Earth estão disponíveis para praticamente todo o globo. O mapeamento deve incluir, mas não se limitar a:

- Contexto geomorfológico.
- Processos geomorfológicos passados e presentes (e prováveis taxas de mudança). Por exemplo, processos periglaciais reliquiais e incisões fluviais atuais.
- Estruturas geológicas específicas e compartimentação estrutural geral.
- Perfil de intemperismo, quando se utiliza a interpretação de dados multiespectrais da litologia e mineralogia de argilominerais.
- Afloramento e, em alguns casos, ao usar dados multiespectrais, uma interpretação

provisória da litologia em superfície.

- Modificação antropogênica.

LiDAR

Em alguns países, o sistema LiDAR está amplamente disponível, mas para muitos projetos, um LiDAR específico do local é utilizado. Por meio de modelos digitais de terreno (MDT), podem ser geradas imagens de sombreamento/relevo sombreado que podem ser interpretadas para fornecer informações sobre:

- Geomorfologia – por exemplo, deslizamentos, canais fluviais abandonados, etc.
- Definição de afloramentos.
- Mapeamento superficial.
- Principais feições geológicas e estruturais.
- Atividades antropogênicas e/ou investigações arqueológicas.

Dados de investigação existentes do terreno

Muitos projetos terão dados de investigação anteriores. Dependendo da idade dos registros existentes, vários graus de incerteza podem estar associados. Consequentemente, os dados podem ter que ser avaliados antes.

Durante a coleta de todas as informações relevantes, o processo de conceituação deve ser desenvolvido de forma sistemática conforme os itens abaixo:

2.2.3.3.1 Contexto do projeto

Resumos globais/regionais de condições geológicas e geomorfológicas, contexto tectônico, condições climáticas presentes e passadas e processos de formação de relevo associados, tensões in situ etc. fornecem um contexto geral para a conceituação.

2.2.3.3.2 Estratigrafia – tipos e relações entre rocha e solo

Os tipos de rocha e solo que estão presentes e as relações estratigráficas entre as unidades podem ser deduzidos de mapas geológicos e muitas vezes são expressos como

uma coluna estratigráfica. O conhecimento derivado de mapas geológicos dá suporte ao desenvolvimento de um modelo conceitual que antecipa a presença de certas unidades e feições geológicas, a natureza de seus contatos e as relações espaciais entre as unidades, etc. Ou seja, o mapa geológico e quaisquer memórias ou relatórios que o acompanham podem ser usados para deduzir toda a história geológica. Esta parte da conceituação é baseada no conhecimento geológico fundamental de diferentes tipos de rochas e na significância em engenharia de suas características. Do ponto de vista geológico, existem muitos tipos diferentes de rochas, mas para fins de engenharia, as classificações simplificadas contidas na maioria dos padrões descritivos são normalmente suficientes. Inicialmente, este tipo de avaliação será baseado na experiência e na referência à literatura relevante, particularmente modelos genéricos e compilações de características de engenharia. Para visualizações de diferentes modelos conceituais genéricos, consulte Fookes *et al* (2015) e Fell *et al* (2015). Por exemplo, a **Figura 2-2** mostra as condições que podem ser previstas em terrenos graníticos que foram submetidos a intemperismo químico profundo.

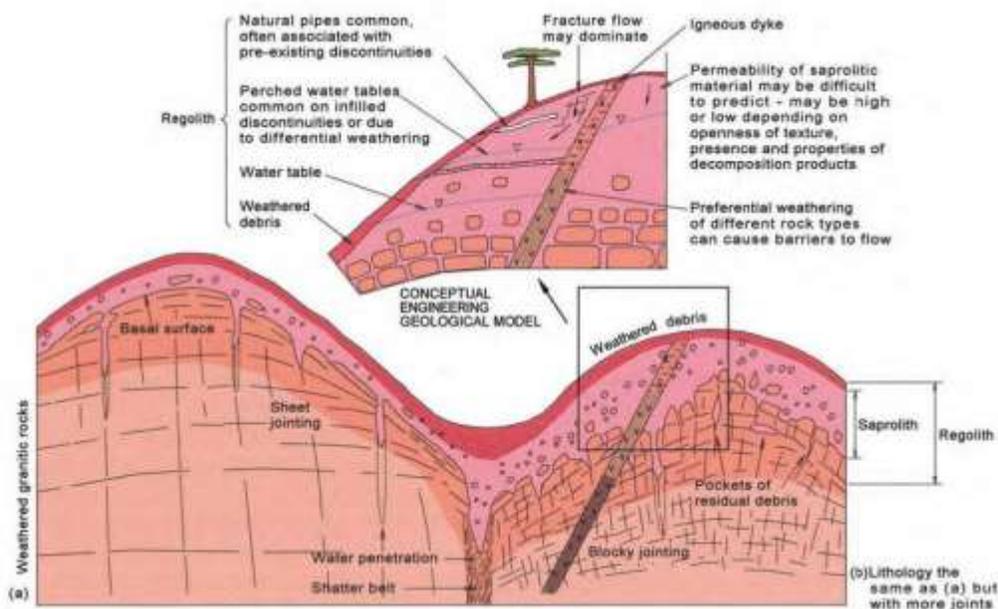


Figura 2-2: Características típicas do granito. Reproduzido de Fookes *et al*. 2015.

Geomodelos em geologia de engenharia – uma introdução. © Whittles Publishing 2015.

2.2.3.3.3 Estrutura geológica

A compartimentação estrutural pode ser extrapolada a partir do mapa geológico ou do conhecimento e experiência de contextos geológicos semelhantes. Novamente, o que pode ser antecipado é melhor apreciado considerando-se modelos conceituais genéricos relevantes, como mostrado na **Figura 2-3**.

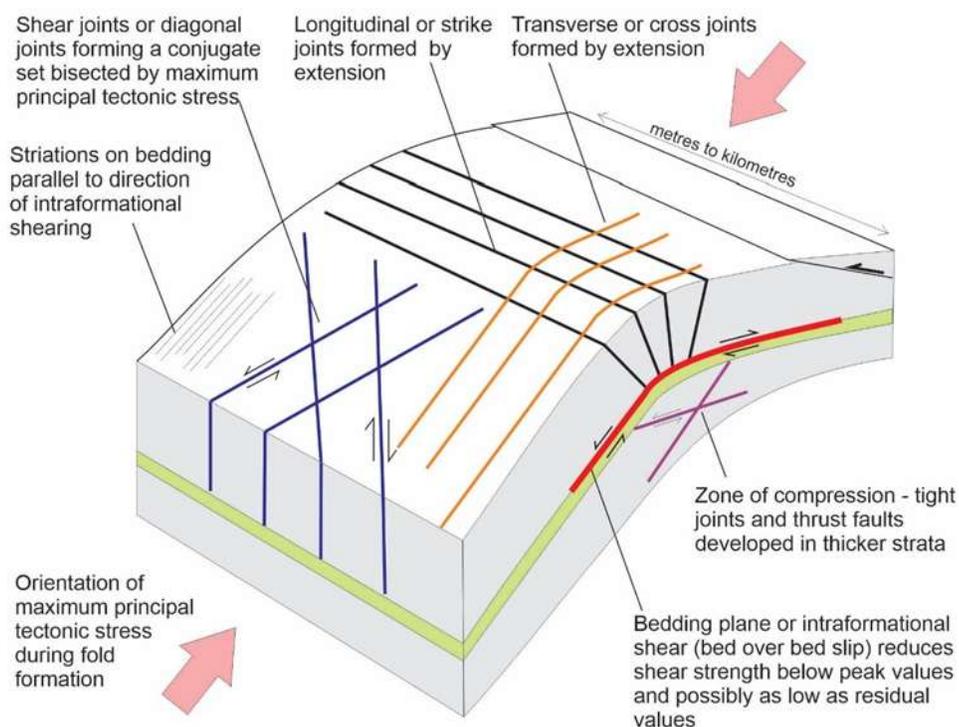


Figura 2-3: Estruturas associadas com dobras abertas (baseado em Price & Cosgrove, 1990).

2.2.3.3.4 Processos em superfície e subsuperfície

Isso requer conhecimento e experiência de geologia e geomorfologia para avaliar quais processos podem ter ocorrido no passado, bem como quais processos estão ativos, ou poderiam ser reativados pelo projeto. Por exemplo, a possível presença de efeitos de alívio de tensão que podem afetar a estabilidade do talude, a permeabilidade do maciço rochoso, os controles das águas subterrâneas e os fluxos hidrogeológicos afluentes em túneis.

Geralmente, envolve a classificação do processo e o desenvolvimento de informações



sobre a taxa de evolução do processo relevante. Um exemplo de como a estrutura cognitiva desenvolvida para escorregamentos que afetam o local do projeto pode ser apresentada de forma adequada para dar suporte a uma avaliação de perigo é mostrado na **Figura 2-4**.

O conceito de palimpsesto⁶ deve ser considerado em qualquer investigação da paisagem. A maioria das paisagens é uma combinação de componentes reliquiárias, componentes ativos e processos produzidos sob diversas condições ambientais.

Como resultado, a paisagem pode conter uma combinação de:

- Formas de relevo remanescentes que os processos contemporâneos não afetam
- Formas de relevo remanescentes que são afetadas por processos contemporâneos ou podem ser reativadas se ocorrerem mudanças nas condições.
- Formas de relevo ativas.

⁶ Palimpsesto: pergaminho que após ser raspado e limpo, era novamente aproveitado para a escrita

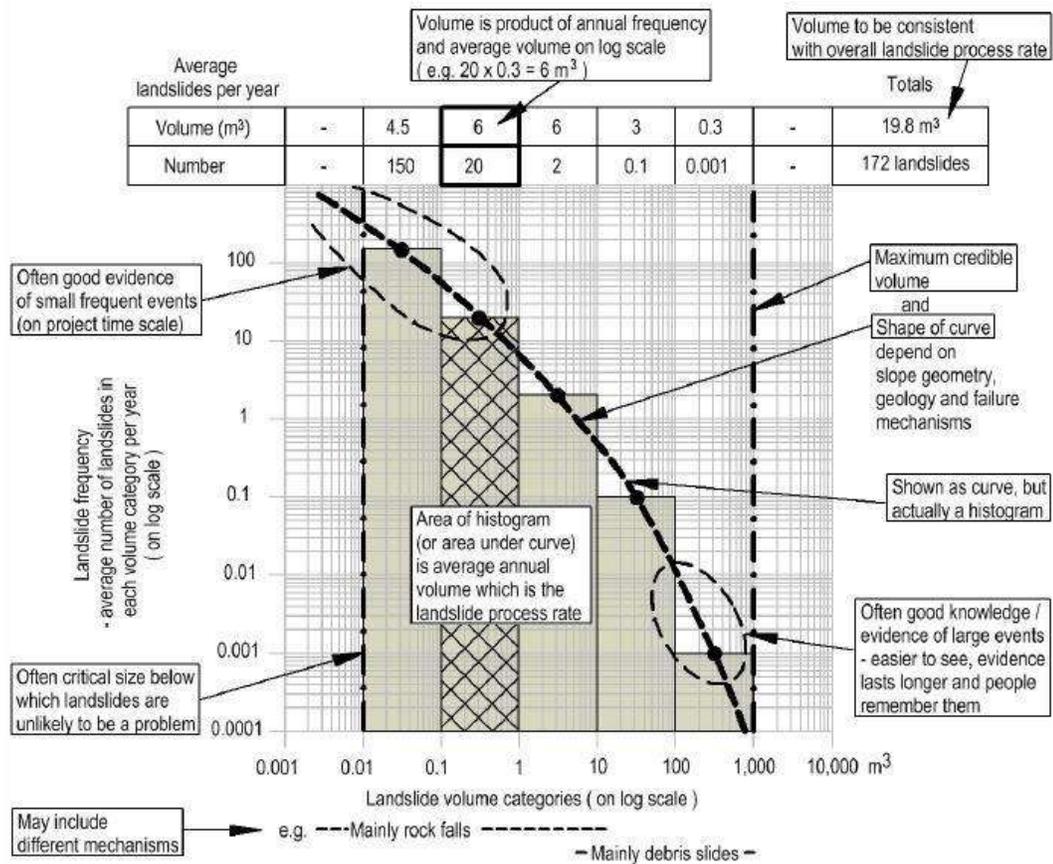


Figura 2-4: Modelo genérico de frequência de magnitude de deslizamento (Moon *et al*, 2005).

Reproduzido com permissão dos autores.

O modelo conceitual deve explicar a evolução da paisagem atual e antecipar como a paisagem pode afetar o projeto ou ser afetada por ele. Para entender os possíveis processos geomorfológicos, é útil desenvolver um modelo conceitual genérico das formas de relevo morfogenéticas que caracterizam a área. Estas são conjuntos identificáveis de formas de relevo resultantes de tipos distintos de clima agindo ao longo de um período de tempo. Os modelos conceituais genéricos podem ajudar na criação de modelos conceituais específicos do local. Eles também fornecem um checklist do tipo de feições e perigos geológicos que podem ser encontrados nessas áreas. Para visualização de diferentes modelos conceituais genéricos de relevo, consulte Fookes *et al* (2015).



2.2.3.3.5 Caracterização inicial de engenharia

Com base no conhecimento e na experiência, é possível documentar as possíveis características de engenharia dos vários componentes do modelo conceitual. Diversas publicações resumem as características geotécnicas típicas de diferentes materiais geológicos. Por exemplo, as propriedades do maciço rochoso de composição granítica (granitos e gnaisses) de diferentes graus de intemperismo foram resumidas por Dearman et al. (1978). Onde houver conhecimento e experiência consideráveis, pode ser possível desenvolver estimativas iniciais de características como resistência e de deformabilidade a partir de descrições de maciços rochosos usando uma variedade de métodos, por exemplo, a abordagem GSI (Hoek e Brown 2019). No entanto, as incertezas associadas a tal abordagem devem ser plenamente documentadas.

Além dos registros de risco iniciais, o modelo conceitual pode ser usado para estabelecer as Condições de Referência iniciais que definem contratualmente as condições a serem esperadas para projetos (Baynes et al. 2005).

2.2.3.3.6 Modelo Geológico Inicial

Dependendo do projeto, o modelo geológico inicial pode incluir uma quantidade significativa de dados observacionais existentes ou pode ser baseado quase inteiramente na conceituação e, portanto, a incerteza dentro do modelo pode variar significativamente. No entanto, à medida que o modelo geológico é desenvolvido, ele fornece uma estrutura lógica para a investigação do local que deve ter como objetivo reduzir a incerteza do modelo.

2.2.3.3.7 Exemplo de conceituação

Um exemplo de visualização de um modelo conceitual é mostrado na **Figura 2-5**.

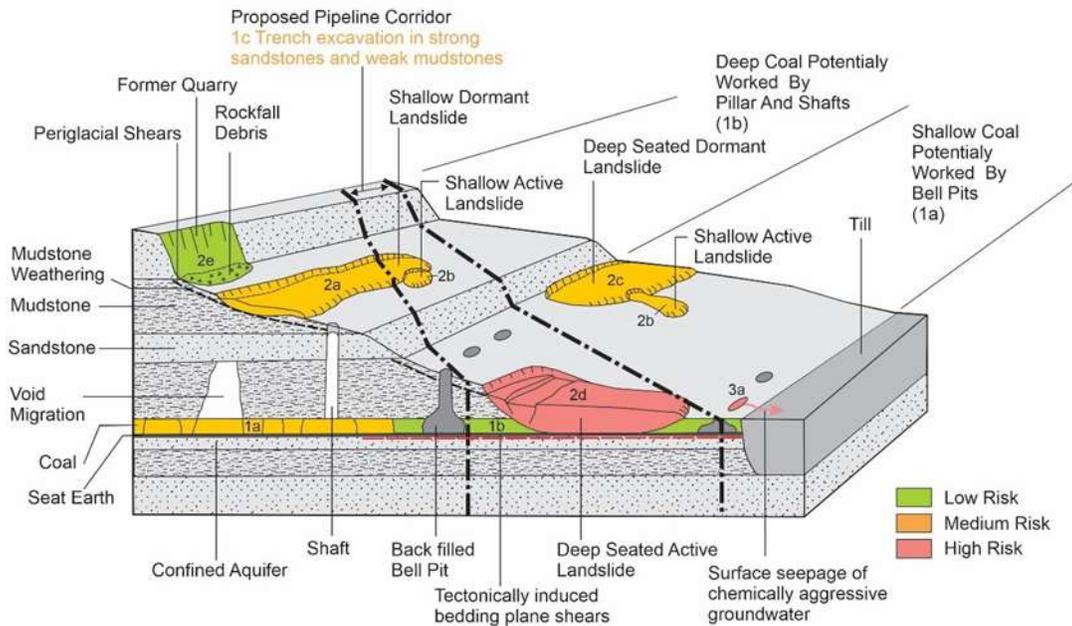


Figura 2-5: Visualização após um estudo de revisão bibliográfica do item conceitual de um MGG para um duto que cruza terreno instável afetado por atividades de mineração e escorregamentos (Baynes *et al*, 2021).

2.2.3.4 Aquisição de observações da área do projeto durante as investigações

Registros factuais de investigação do terreno são produzidos por sondagens e ensaios de acordo com os padrões nacionais ou diretrizes internacionais. No entanto, tais registros podem induzir limitações e perda de dados observacionais em função de eventual falta de padronização. Há uma necessidade de flexibilidade nos sistemas de registro para focar a coleta de dados dos condicionantes que os modelos conceitual/observacional inicial indicam que provavelmente controlarão o projeto.

Geralmente, é útil fornecer uma interpretação geológica no log de sondagem (conforme exigido nas Normas Australianas, AS1726 2017⁷), pois isso ajuda na interpretação das condições gerais do local e, portanto, agrega valor aos logs. No entanto, isso requer que o profissional tenha conhecimento do MGG. Interpretações incorretas são possíveis, por isso, é essencial ter a indicação da confiabilidade da interpretação.

⁷ Nota do tradutor: Ver também Diretrizes Normativas da ABGE



Os responsáveis precisam interpretar o que estão observando e precisam decidir onde mais ou o que mais investigar, observar, medir, com base em suas investigações, observações e medições já realizadas. Claramente, profissionais mais experientes levam vantagem. Se o MGG for fornecido, a probabilidade de ser feita uma interpretação correta aumenta significativamente. Além disso, valores atípicos ou anomalias são mais fáceis de reconhecer, documentar e avaliar.

Observe que a interpretação de campo pode mudar com dados adicionais ou acúmulo de conhecimento/experiência e, à medida que o MGG se desenvolve, pode ser necessário reavaliar os registros anteriores. Deve ser documentado sempre que forem feitas alterações na interpretação.

Apesar da mudança para a entrada de dados digitais, alguns dados não são facilmente digitalizados. Por exemplo, logs de descrição de sondagem em terreno complexo e as relações complexas ilustradas por tais registros (logs) não são necessariamente favoráveis à entrada de dados digitais. Nessas circunstâncias, os registros originais com esboços em papel e lápis também devem ser fornecidos.

2.2.3.5 Combinando modelos conceituais e modelos observacionais no MGG

Nenhum comentário.

2.2.3.6 Definindo e caracterizando unidades geológico-geotécnicas

Nenhum comentário.

2.2.3.6.1 Complexidade geotécnica

Nenhum comentário.

2.2.3.6.2 Caracterização de engenharia

Nenhum comentário.



2.2.3.6.3 Zoneamento

Nenhum comentário.

2.2.3.7 Incerteza, lacunas e discrepâncias no MGG

Nenhum comentário.

2.2.4 MGG E EUROCODE

A versão mais recente do Eurocode 7, Parte 2 (em preparação para implementação em abril de 2023) descreve uma abordagem para a investigação e dimensionamento dos componentes geotécnicos de um projeto. Norbury (2020) observou que havia dois tipos distintos de modelos no Eurocode 7.

- i. O Modelo de Terreno (na EN 1997-2:2004) inclui geologia e apresentação e avaliação dos resultados dos ensaios.
- ii. O Modelo Geotécnico (na EN 1997-1:2004) abrange o dimensionamento da estrutura e, portanto, inclui a seleção dos parâmetros geotécnicos para o dimensionamento.

Embora a terminologia seja diferente, a abordagem do Eurocode se encaixa na abordagem abrangente de MGG para projetos de engenharia civil. No entanto, a abordagem do Eurocode não é tão adequada para a ampla gama de tomada de decisões de engenharia geotécnica que geralmente ocorre fora do projeto de engenharia civil, como por exemplo, estudos de perigos geológicos offshore, avaliação de recursos de pedreiras, preparação de relatórios de geotécnicos de referência (*Geotechnical Baseline Report - GBR*), etc., onde a abordagem abrangente de MGG é mais eficaz.

Consulte “1.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MGG” para mais informações.



2.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

2.3.1 INTRODUÇÃO

Nenhum comentário.

2.3.2 RESUMO PARA DOCUMENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO MGG

Nenhum comentário.

2.3.3 IMPLICAÇÕES DE APROVISIONAMENTO DO PROJETO

Nenhum comentário.

2.3.4 RELATÓRIOS INFORMATIVOS DE MGG

O MGG é documentado principalmente por meio de relatórios de projeto. Em regiões do mundo onde as disputas legais têm sido frequentemente associadas aos contratos de grandes projetos, normalmente, e muitas vezes como uma obrigação contratual, dois tipos principais de relatórios são produzidos após as investigações do local - um relatório factual e um interpretativo. Os 'Relatórios Factuais' são geralmente considerados como 'dados confiáveis', enquanto os 'Relatórios Interpretativos' geralmente têm um conteúdo interpretativo limitado, e são geralmente 'apenas para informação' e têm uma importância contratual menor. Nessas circunstâncias, a estrutura cognitiva do MGG pode não ser apresentada e pode não ser totalmente utilizada no ciclo de vida do projeto.

2.3.4.1 *Relatório Factual*

Em alguns casos, os contratantes optam por emitir apenas informações 'factuais' (isto é, logs de furos de sondagem, resultados de ensaios em laboratório, etc.) acreditando que o fato de fornecer quaisquer 'interpretações' aumentaria de alguma forma sua exposição ao risco geológico. Aceita-se que esta é uma prática comum, mas reter interpretações de empresas projetistas ou contratadas só pode reduzir sua capacidade de prever razoavelmente as condições do terreno que poderiam ser encontradas e, portanto, influenciar a precificação de suas propostas.

2.3.4.2 *Relatório Interpretativo*

Os relatórios interpretativos raramente documentam os componentes conceituais do MGG e geralmente apresentam um único 'modelo de terreno' sem nenhuma explicação de como isso foi obtido e se há alguma incerteza associada. Esses problemas são ainda agravados por contratadas que fazem as observações no local durante as investigações, muitas vezes sendo responsáveis pelos relatórios factuais, e consultores responsáveis pelo componente interpretativo que podem nunca ter estado no local. Esta divisão da investigação pode levar a uma interpretação incorreta e enganosa das condições do terreno.

2.3.4.3 *Relatórios Geotécnicos de Referência*

Os relatórios interpretativos estão sendo cada vez mais usados para gerar relatórios geotécnicos de referência (*Geotechnical Baseline Report - GBR*) para estabelecer com mais clareza o compartilhamento de riscos acordado, fornecendo uma interpretação contratual para as condições do terreno (Davis 2017). A Federação Internacional de Engenheiros Consultores (FIDIC) possui um livro de contratos (Livro Esmeralda) especialmente desenvolvido para uso de relatórios geotécnicos de referência (FIDIC 2019).

Um relatório geotécnico de referência (GBR⁸) define os limites de risco entre a contratante e a contratada, incluindo cláusulas de referência que definem as condições geológicas e geotécnicas relevantes que podem eventualmente ocorrer durante a construção e as condições consideradas como previstas na licitação. Os GRBs também podem fornecer uma interpretação equilibrada das condições do terreno a partir dos dados disponíveis ou ser ajustados em condições melhores ou piores, dependendo do perfil de risco do cliente e sua disposição ao risco. As diferenças nas condições reais do terreno encontradas no local e seus impactos nos contratos são normalmente arbitrados por uma parte independente durante as obras. O GBR pode incluir vários relatórios.

⁸ Nota do tradutor: Decidiu-se manter a referência da sigla em inglês

Em sua forma mais simples, o GBR é usado por todos os licitantes como uma base comum para a valoração do risco geotécnico juntamente com a valoração das obras definidas nos desenhos e especificações da licitação. Na formalização do contrato, considera-se que a empresa vencedora tenha previsto as diversas condições do terreno definidas no GBR. As cláusulas de referência estabelecem o que é "previsto" e fornecem uma base contratual para o que pode ser considerado "imprevisto" em relação às condições do terreno encontradas durante a construção. Após a consolidação do contrato, o GBR é então usado para julgar a validade de quaisquer reivindicações de compensação associadas às condições do terreno para as questões por ele cobertas. A estrutura cognitiva do MGG dá suporte ao desenvolvimento de 'referências numéricas', 'valores característicos' e 'condições de referência de terreno' que são todos componentes de GBRs vinculados a cláusulas contratuais.

2.3.4.4 Mapas e seções geológico-geotécnicas

Mapas e seções geológico-geotécnicas são uma parte fundamental da estrutura cognitiva do MGG. Todos os mapas e seções devem conter uma escala, uma legenda e uma indicação de norte, e devem diferenciar entre observações e interpretações usando convenções de traçado como na **Figura 2-6**. Ao desenvolver mapas digitais, os contatos observados, projetados e interpretados devem ser diferenciados de maneira semelhante

	Observed geological boundary, position known
	Observed geological boundary, position approximate
	Geological boundary, interpreted or inferred

Figura 2-6: Convenções de traçado de contatos geológicos.

Uma grande proporção do conhecimento geológico-geotécnico é anterior ao desenvolvimento de técnicas computacionais e visualização geológica digital. Estes são os produtos 'estáticos' tradicionais que incluem desenhos, diagramas e gráficos, fotografias, mapas, seções transversais e modelos físicos. No entanto, em muitos

projetos, esses dados tradicionais ainda contribuem para a conceituação e representatividade do modelo digital 3D e, particularmente no caso de projetos menores, podem ser os principais componentes de saída do MGG.

Na maioria dos grandes projetos, as grandes quantidades de dados envolvidas e os métodos modernos de aquisição eletrônica desses dados mostram que o processamento dos dados em computadores será a forma mais eficiente e provavelmente a única forma prática de agrupá-los.

Parece possível que o *machine learning* possa se tornar cada vez mais importante/necessário para interpretar/processar a grande quantidade de dados adquiridos em investigações de campo usando sensoriamento remoto multiespectral (LiDAR, fotogrametria, termal, hiperespectral), instrumentação e monitoramento de furos de sondagem (por exemplo, RADAR, InSAR, MS/AE). Essa perspectiva levanta preocupações em relação à capacidade do *machine learning* de conseguir conceituar e interpretar de maneira geologicamente razoável.

2.3.4.4.1 Dados de mapeamento 2D

A visualização 2D de dados geológicos normalmente será processada em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) que é ideal para agrupar os diferentes tipos de dados geoespaciais, com os dados sendo apresentados em camadas distintas. É possível produzir mapas e seções geológicas simples usando programas de projeto (*CAD - computer aided drafting*), mas estes são mais adequados para projetos de engenharia e geralmente não possuem a funcionalidade necessária para produzir bons desenhos geológicos.

A arquitetura das camadas do SIG deve refletir as diferentes fontes de dados e, sempre que possível, as camadas que consistem em observações devem ser diferenciadas nas interpretações. Camadas típicas para o SIG dentro de um MGG são ilustradas na **Figura 2-7**.

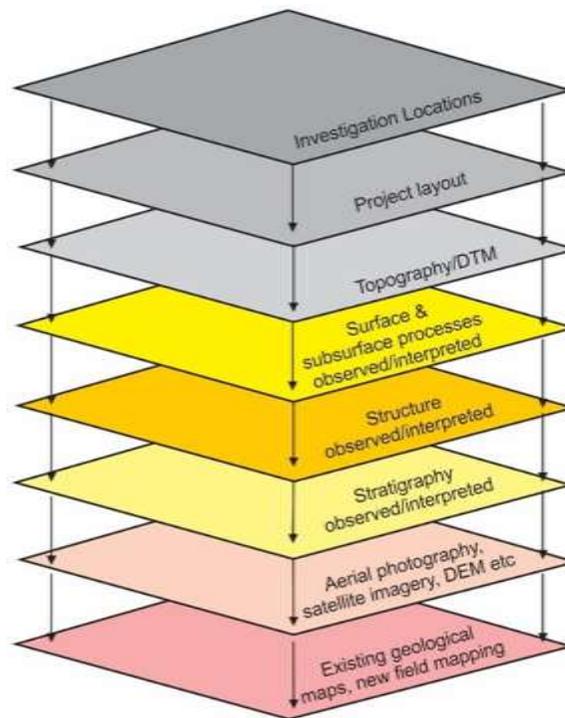


Figura 2-7: Arquitetura SIG para um Modelo Geológico-Geotécnico.

2.3.4.4.2 Seções 2D

Além disso, as seções 2D precisarão ser desenvolvidas com base na interpretação dos dados no MGG. Essas seções devem ser usadas para embasar análises adicionais, projeto, construção ou como ferramentas de visualização. As seções transversais e longitudinais podem ser desenhadas à mão ou desenvolvidas usando programas de software 2D ou 3D. No software 2D, as seções podem ser desenhadas digitalmente pelo usuário, enquanto as seções 2D exportadas de modelos digitais 3D podem ser geradas automaticamente ao longo de uma linha da seção determinada pelo usuário. Independentemente de como as seções são criadas, elas devem seguir os mesmos princípios básicos:

- As seções devem estar localizadas onde possam melhor ilustrar a relação entre o componente do projeto, as cargas ou mudanças impostas pelo componente no terreno e as informações locais disponíveis para dar suporte à interpretação das unidades geológicas. Os locais das seções podem ser escolhidos pelos projetistas



para explorar casos de carregamentos específicos.

- Quando os dados são projetados em uma seção, as suposições feitas e o método de projeção devem ser informados.
- As seções devem ser desenhadas perpendicularmente aos contornos ou à feição/estrutura geológica de interesse, a menos que outra forma seja desejada (por exemplo, para uma seção longitudinal ao longo de um lineamento ou ao longo da direção do deslocamento).
- As seções devem ser desenhadas através da linha de centro dos condicionantes críticos do projeto onde deve haver o melhor controle (isto é, dados) e os dados nos quais a seção se baseia devem ser documentados na seção. Onde os melhores dados não estiverem ao longo da linha de centro, deve-se colocar uma seção em um local apropriado e isso pode envolver linhas adicionais de seção.
- A escala vertical de uma seção deve (a menos que a escala não permita a visualização) ser igual à escala horizontal, ou seja, sem exagero vertical. Quando uma escala exagerada é usada, uma seção sem exagero também deve ser disponibilizada.
- A simbologia das unidades geológico-geotécnicas deve corresponder àquelas utilizadas no modelo e/ou mapa.

Os modelos digitais 3D geralmente não são capazes de mostrar contatos tracejados ou incluir pontos de interrogação, portanto, muitas vezes é difícil identificar onde os contatos são inferidos ou aproximados. Um método para ajudar a identificar tais condições é incluir mapas dentro do espaço do modelo 3D, pois estas podem incluir as convenções de traçado mencionadas acima.

2.3.4.4.3 Considerações de extensão e escala

A extensão espacial dos mapas e plantas que documentam a rede de cognitiva do MGG deve considerar a área do terreno que pode ser afetada pelo projeto, (por exemplo, em resposta ao carregamento de uma fundação), assim como a área do terreno que pode afetar o projeto (por exemplo, um escorregamento fora da área impactando o projeto).



Estes vão desde mapas regionais até plantas individuais de afloramentos ou fundações. A escala de apresentação dos mapas e plantas deve estar relacionada à escala em que os dados foram coletados. Se seções e mapas convencionais estiverem sendo preparados, o nível de detalhe de qualquer desenho específico deve estar relacionado ao que é perceptível na escala do desenho quando visto em tamanho real. Nos modelos digitais 3D, a escala pode ser dinâmica, portanto, é mandatório que as implicações da escala escolhida para apresentar os dados sejam levadas em conta ao se decidir sobre o nível de detalhe a ser apresentado.

Deve-se ter cautela e documentar as limitações quando os bancos de dados usados para a compilação do modelo forem apresentados em escalas com resolução mais alta. Por exemplo, dimensionar contatos em um mapa de escala 1:100.000 para 1:5.000 na planta de geologia do projeto pode levar a modelos não confiáveis, especialmente sem qualquer verificação de campo e correção.

Observe que a escala dos dados exportados necessários pode mudar em vários estágios de um projeto, mas a escala dos dados de entrada permanecerá a mesma e pode restringir a forma como o MGG é desenvolvido.

2.3.4.4 Representação estereográfica

Essa técnica pode ser usada para ajudar a avaliar padrões estruturais e como/onde eles mudam no espaço. Portanto, é uma ferramenta importante para avaliar e apresentar dados estruturais, e essencial para qualquer MGG, sendo usado onde a geometria das descontinuidades é significativa (por exemplo, juntas, falhas, clivagem). Isso é particularmente importante para a engenharia de rochas, mas também se aplica a projetos que envolvam solos que contenham estruturas reliquias. Observe que os dados estereográficos são uma representação da geometria de conjuntos de estruturas de parte de uma unidade, zona ou domínio geológico-geotécnico, mas não representam a geometria ou as coordenadas espaciais reais específicas dessas descontinuidades. Tal representação é melhor obtida através do uso de contornos de estruturas.

2.3.5 CRIANDO E VISUALIZANDO UM MODELO DIGITAL 3D

Os modelos digitais 3D permitem uma compreensão e comunicação das condições do subsolo de uma forma que não era possível anteriormente com a abordagem de 'lápiz e papel'. Para grandes bancos de dados, os modelos digitais 3D permitem uma detalhada verificação e interpretação dos dados e suportam uma maior integração dos componentes de exportação do MGG com outras disciplinas. O software de modelagem digital 3D permite a visualização de uma ampla gama de observações (furos, CPT, LiDAR, geofísica, níveis de água subterrânea, contatos mapeados etc.) juntamente com interpretações de limites de unidades geológico-geotécnicas como superfícies, tudo sendo criado em um único ambiente de modelagem digital. A partir dessas superfícies, é possível calcular volumes 3D que representam unidades geológico-geotécnicas no espaço 3D.

No entanto, existem perigos associados ao desenvolvimento de um modelo digital 3D se as limitações do modelo e dos métodos numéricos, particularmente as suposições usadas em ambos, não forem compreendidas e comunicadas. Modelos digitais 3D podem ser apresentados com precisão e certeza aparentes muito maiores do que realmente é, e é importante comunicar essa incerteza. Um modelo digital 3D isoladamente não é um MGG, pois não fornece uma estrutura cognitiva. O desenvolvimento dos modelos digitais 3D deve ser conduzido, ou supervisionado e verificado, por geólogos de engenharia devidamente qualificados e experientes, em linha com o desenvolvimento de outros componentes do MGG. Caso contrário, existe o risco de serem criados modelos imprecisos, falhos e geologicamente irracionais (ou seja, não confiáveis).

Um extenso tratado sobre modelagem geológica digital foi desenvolvido por Turner et al. (2021).

2.3.5.1 *Software de modelagem*

2.3.5.1.1 Seleção de softwares apropriados

A seleção de pacotes de software deve levar em consideração:



- a finalidade do modelo - isso pode exigir que o software permita a visualização de estruturas de engenharia e feições geológico-geotécnicas.
- a fase de concepção do projeto - diferentes fases de desenvolvimento podem exigir diferentes ferramentas ou níveis de detalhamento.
- provável extensão e complexidade do modelo – o cenário geológico é uma simples estratigrafia de camadas ou um sistema complexo de dobras/falhas?
- tamanho dos bancos de dados - ferramentas automatizadas podem ser adequadas para grandes bancos de dados em contraste com a demorada manipulação e interpretação manual dos dados, que é viável para pequenos bancos de dados.
- flexibilidade de modelagem - a modificação manual e o controle de dados e superfícies permitem ao modelador, tanto quanto possível, criar recursos geologicamente viáveis e realistas.
- requisitos de atualização do modelo digital – o modelo exigirá atualizações frequentes? Caso positivo, quais ferramentas o software possui para limitar o retrabalho/reinterpretação?
- incerteza espacial – o software pode ser usado para análises estatísticas e/ou probabilísticas de variabilidade e incerteza no banco de dados e no modelo mais amplo?
- funcionalidade e facilidade de uso – quais métodos de análise estão disponíveis? Qual é a interface do usuário? Quais habilidades são necessárias? Qual é a complexidade operacional? Qual é a compatibilidade com os modelos de software existentes?
- software pode produzir dados exportados 2D e 3D para embasar análises, auxiliar na integração com outras disciplinas, bem como fornecer uma ferramenta de comunicação para auxiliar na engenharia e nas decisões relacionadas?
- pacote de software será adequado às habilidades disponíveis na organização? Quem desenvolverá, verificará e revisará o modelo digital 3D? Eles têm uma compreensão adequada do software e sua funcionalidade, bem como conhecimento geológico-geotécnico e experiência relacionados ao tipo de projeto e às condições do terreno?
- modelos 3D especializados podem ser desenvolvidos com um resultado analítico

específico em mente. Esses tipos de modelos podem exigir técnicas de modelagem específicas de software que provavelmente se restringem a fornecer resultados para um conjunto muito limitado de métodos analíticos.

- haverá um requisito para compartilhar modelos digitais – quem pode editar ou visualizar? Como isso é controlado? Com quais outros modelos ele precisará interagir?

2.3.5.1.2 Modelando em CAD

Métodos de desenho assistido por computador (*Computer Assisted Design - CAD*) podem ser usados para gerar visualizações 3D de condições geológico-geotécnica. No entanto, os sistemas CAD não possuem recursos de topologia, portanto, a interseção inadvertida dos limites das camadas pode ocorrer, especialmente quando camadas finas ou descontínuas estão envolvidas, e corrigir a representação do modelo no software pode se tornar uma tarefa importante. Além disso, os sistemas CAD não são projetados para inserir e processar a ampla gama de informações geológico-geotécnicas que podem estar disponíveis para um projeto, e tendem a usar contatos retos e geologicamente irrealistas que podem não ter simbologia adequada.

A modelagem de geologia em CAD não é recomendada, embora possa ser usada para modelar geologia simples, geralmente limitada a mapas e seções 2D. No entanto, o CAD é uma das principais formas pelas quais o modelo é exibido porque é onde o Modelo Geológico se integra aos elementos do projeto. Assim, embora a modelagem usando CAD não seja recomendada, o CAD é uma plataforma útil para exibir o modelo.

2.3.5.1.3 Software de modelagem explícita

Na modelagem explícita, o modelador define manualmente a natureza e a distribuição das superfícies que condicionam as unidades geológico-geotécnicas, e os dados de investigação nos quais se baseia a interpretação são representados em 3D. A modelagem explícita é considerada o método manual 'tradicional' de diagramação e digitalização. O modelador interpreta os dados de investigação e define as superfícies que condicionam

as unidades geológico-geotécnicas. Um exemplo de produto de um pacote de modelagem explícita é fornecido na **Figura 2-8**.

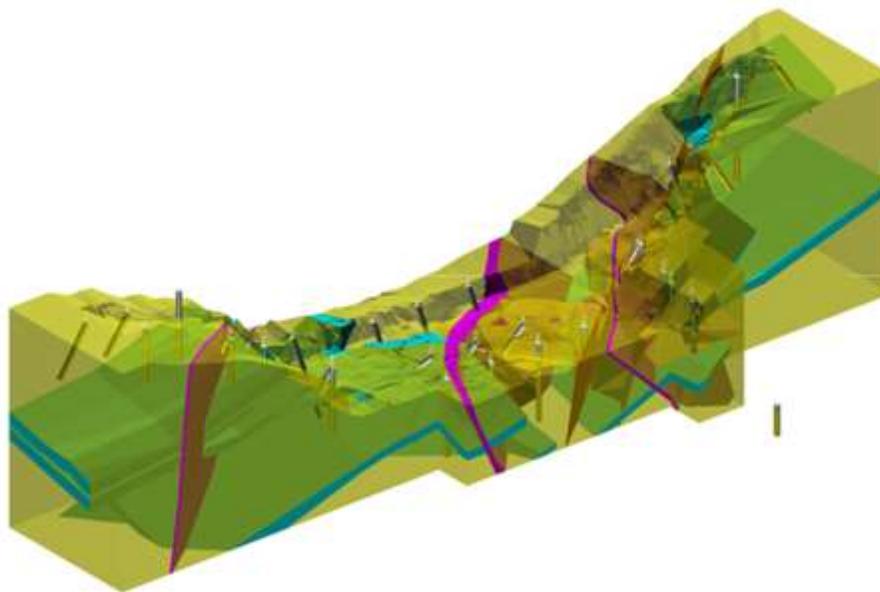


Figura 2-8: Visualização explícita da geologia da fundação de uma barragem em concreto gravidade, incluindo andesitos de mergulho suave e zonas de falha atravessadas por diques de félsicos tardios (imagem fornecida por Richard Brehauss e reproduzida com sua permissão).

2.3.5.1.4 Modelagem implícita por software

Na modelagem implícita, o software utiliza algoritmos definidos pelo usuário para interpolar e extrapolar os dados pontuais. As informações resultantes definem a distribuição dos atributos que caracterizam as unidades geológico-geotécnicas. Essa distribuição pode ser contínua ou definida por limites. Isso permite a criação de formas de superfície mais complexas do que as normalmente observadas em modelos explícitos. No entanto, os resultados devem ser avaliados para garantir que a modelagem produza formas geologicamente realistas com base no cenário geológico e respeite os princípios geológicos. Um exemplo de produto de um pacote de modelagem implícita é mostrado na **Figura 2-9**.

Onde a heterogeneidade sub-estratigráfica é relevante, a estrutura do modelo pode ser



'discretizada' para formar uma rede celular 3D (ou 'voxels'). As propriedades do material podem ser atribuídas aos voxels, tais como resistividade elétrica, permeabilidade, porosidade, resistência ao cisalhamento, etc. com base em algoritmos geoestatísticos. Essas representações de voxels podem ser usadas para gerar diferenças finitas ou malhas de elementos finitos para cálculos e modelamentos.

2.3.5.1.5 Comparando modelos digitais explícitos e implícitos

Métodos explícitos ou implícitos podem ser usados para desenvolver modelos digitais 3D que podem frequentemente ser integrados. Pacotes modernos de software baseados em modelagem implícita geralmente incluem funcionalidades de modelagem explícita para facilitar o refinamento de superfícies. Independentemente do método de modelagem, são necessários conhecimentos geológico-geotécnicos e o uso de princípios geológicos apropriados. Se modelados adequadamente, ambos os métodos resultarão em modelos robustos com interpretações semelhantes. A **Tabela 2-2** abaixo resume as vantagens e limitações de cada abordagem.

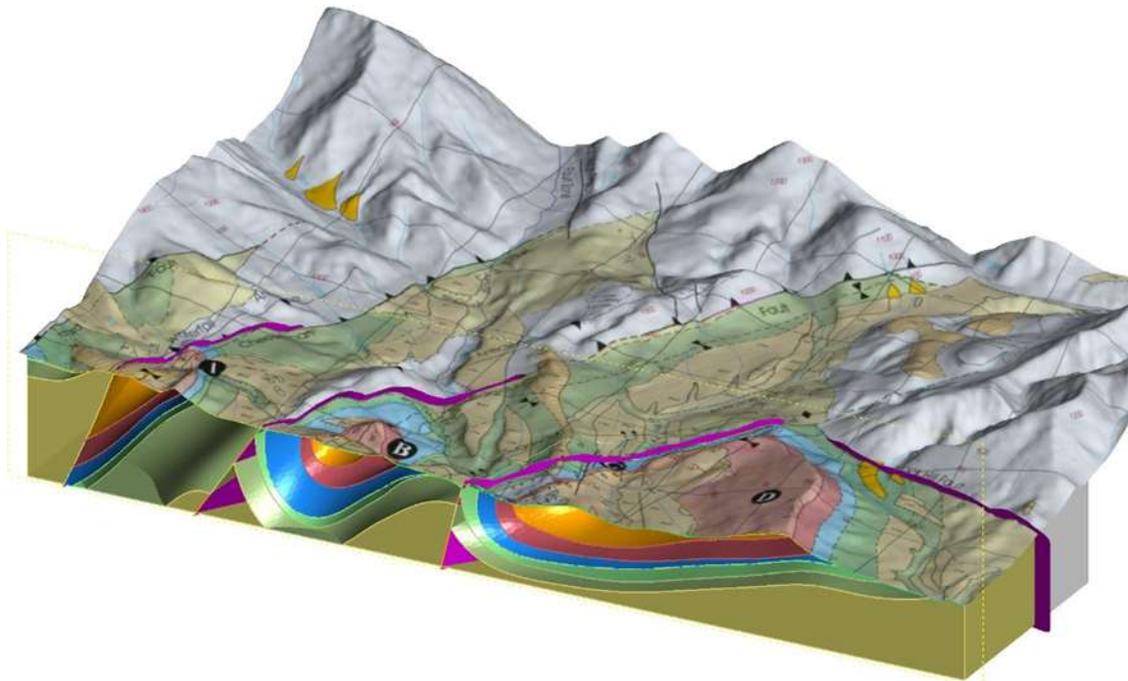


Figura 2-9: Modelo implícito desenvolvido a partir de observações de superfície usando algoritmos para definir limites em subsuperfície (imagem fornecida por Pat McLarin e reproduzida com sua permissão).

2.3.5.1.6 Modelando de geologia estratificada usando SIG

Ambientes geológicos estratificados até profundidades de 100-200m são comumente encontrados em projetos ambientais e de engenharia, e um modelo digital pode ser criado pela sobreposição de camadas. Este método permite a incorporação de superfícies quadriculadas desenvolvidas por procedimentos SIG ou de registros digitais de furos e seções transversais geológico-geotécnicas interpretadas, e é um procedimento de geração de modelos atraente e eficiente por modelar áreas de estratos sedimentares relativamente indeformados. No entanto, representar falhas que interrompam superfícies estratificadas simples pode ser uma tarefa difícil.



2.3.5.1.7 Redes de fraturas discretas

Uma 'rede de fraturas discretas' (DFN⁹) é um modelo que representa explicitamente as propriedades geométricas de cada fratura (por exemplo, orientação, dimensão, posição, forma e abertura) e as relações topológicas entre fraturas individuais e sistemas de fraturas. Uma DFN pode ser gerada a partir de mapeamento geológico-geotécnico, fotogrametria apropriadamente interpretada ou por simulação estocástica. Todos visam representar diferentes tipos de fraturas de rocha, incluindo juntas, falhas, veios e planos de estratificação. As DFN s podem ser uma interpretação baseada nos dados disponíveis ou em um modelo computacional do maciço rochoso porque muitas vezes nem todas as descontinuidades no maciço rochoso podem ser observadas em 3D com resolução suficiente em todas as escalas. Modelos computacionais 3D de um maciço rochoso fraturado são gerados a partir de uma população de conjuntos de descontinuidades cujos parâmetros são extraídos de distribuições de probabilidade estatística derivadas de observações de mapeamento e perfilagem de furos. O modelo computacional resultante pode ser usado em análises probabilísticas de estabilidade de taludes, estabilidade de túneis, etc.

⁹ Nota do tradutor: DFN: discrete fracture network

Tabela 2-2: Comparação entre modelos explícitos e implícitos.

	Modelos Explícitos	Modelos Implícitos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Podem ser tão simples ou tão complexos quanto o modelador escolher • Não requerem necessariamente aplicativos de software especializados • O modelador pode definir feições transversais e estruturas geológicas, como falhas, desenhando-as explicitamente em seções regularmente espaçadas e unindo-as • Podem ser digitalizados manualmente, como interpretações individuais de seções transversais, em toda a extensão da área e, posteriormente, unidos para criar pseudo-seções transversais • Como alternativa, o modelador pode usar um software especializado para processar e manipular os dados espaciais que condicionam as unidades, e conectar limites para formar uma estrutura (wireframing) de superfícies • O modelo resultante é, portanto, uma função de superfícies construídas manualmente. • Pontos adicionais (arbitrários) entre os locais de contatos observados podem ser usados para suavizar as superfícies e torná-las mais realistas 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de construir e analisar rapidamente modelos 3D para visualizar e testar vários cenários • A modelagem dinâmica pode ocorrer com atualizações rápidas do modelo assim que novos dados são adquiridos e inseridos • Capacidade de processar bancos de dados grandes e variados em um computador pessoal • Diferentes pontos no processo de modelagem podem ser capturados como revisões (em pontos específicos no tempo), explorando assim hipóteses alternativas • Capacidade de modelar iso-valores/parâmetros diretamente a partir de dados de furos de sondagem sem domínio e variografia • Capacidade de criar modelos múltiplos e reproduzíveis que são condicionados aos dados em si, não à intuição da modelagem. Observe que isso significa que o julgamento geológico também deve ser usado para avaliar a razoabilidade dos modelos resultantes. • Muitos pacotes de software de modelagem implícita permitem a edição explícita de superfícies
Desvantagens e limitações	<ul style="list-style-type: none"> • A digitalização manual pode ser demorada • O modelo final é um produto da interpretação do modelador e pode não ser reproduzível entre modeladores • A incerteza é difícil de quantificar • Podem não ser atualizados automaticamente à medida que informações novas ou diferentes se tornam disponíveis. As edições, portanto, podem consumir mais tempo do que nos modelos implícitos 	<ul style="list-style-type: none"> • Documentar as especificidades de como o modelo funciona ou fornecer uma rastreabilidade bem documentada desde o modelo até os dados brutos pode ser difícil, tornando importante registrar rigorosamente os principais dados de entrada • A incerteza nos modelos digitais permanece, e são necessários esforços para quantificar ou tornar claras as fontes e os impactos da incerteza • Os algoritmos de interpolação podem ser difíceis de reproduzir e verificar independentemente

2.3.5.1.8 Modelos de água subterrânea, contaminantes e fluxo de calor

Uma variedade de modelos digitais pode ser usada para prever mudanças com o tempo em tais assuntos, como:



- Os efeitos das mudanças hidrológicas (como bombeamento de água subterrânea ou sistemas de irrigação) no comportamento de um aquífero.
- O fluxo natural e a química de água subterrânea. Esses modelos de água subterrânea tentam prever o destino e o movimento dos produtos químicos em cenários naturais, urbanos ou hipotéticos.
- Fluxo de calor pelo terreno. Tais modelos tentam prever a variação periódica da temperatura do terreno com a profundidade.

Todos esses modelos são desenvolvidos a partir de um modelo digital 3D devidamente construído e bem condicionado. Equações diferenciais que muitas vezes podem ser resolvidas apenas por métodos aproximados usando uma análise numérica são usadas para prever mudanças com o tempo.

Esses tipos de modelos devem ser calibrados, o que envolve executar o modelo em relação a dados reais observados e alterar o modelo/parâmetros até que uma concordância aproximada seja obtida.

2.3.5.2 Fontes e gestão de dados

Informação para caracterização geotécnica podem ser adquiridas a partir de uma ampla gama de métodos e técnicas investigativas. Esses dados podem ser coletados, registrados e exibidos como pontos, em perfis (*logs*) lineares, como plantas ou seções 2D ou como voxels ou polígonos 3D. Essa variedade deve ser assegurada pela disponibilização de uma estrutura de dados genérica adequadamente flexível.

Para incorporar logs ou registros de investigações (furos, sondagens etc.) em um modelo digital 3D, é necessário um banco de dados relacional. As relações entre registros/entradas nesta forma de banco de dados são fornecidas por meio de duas tabelas:

- Uma tabela de fontes de dados (arquivo de topo do furo) apresentando coordenadas, orientação/azimute, inclinação etc. e outras informações posicionais.
- Uma tabela de atributos (arquivo de fundo de furo) registrados para profundidades

ou intervalos de profundidade para cada fonte de dados.

Essas duas tabelas são interrelacionadas por uma chave que normalmente é um único atributo ou um grupo de atributos. A chave é uma parte extremamente importante de um banco de dados relacional e é usada para estabelecer e identificar relações entre tabelas e para identificar exclusivamente qualquer registro ou linha de dados dentro de uma tabela.

Do ponto de vista da gestão de dados, é recomendável usar arquivos universais de projeto, sempre que possível, para minimizar a dependência de arquivos transitórios específicos de software que tenham funcionalidade limitada entre software ou entre versões de software. Dados fixos ou factuais são geralmente codificados de forma padronizada que pode ser modificado para um Padrão Descritivo Nacional ou um Padrão Descritivo Internacional, como o formato da Associação de Especialistas Geotécnicos e Geoambientais [AGS – Association of Geotechnical and Geo-environmental Specialists] no Reino Unido e o formato do Intercâmbio de Dados para Especialistas Geotécnicos e Geoambientais [DIGGS – Data Interchange for Geotechnical and Geoenvironmental Specialists] nos EUA. Os formatos baseados em texto podem ser acessados sem qualquer software específico de modelagem, embora os tamanhos de arquivo possam ser grandes. Existem padrões de transferência de dados que permitem a transferência de dados geotécnicos factuais ao longo do ciclo de vida do projeto.

Como todos os dados, é necessária uma verificação robusta para assegurar que as informações geográficas e os atributos observados sejam razoáveis e dentro de margens de erro aceitáveis (conforme escolhido e documentado pelo modelador). Com base nessa avaliação, podem ser tomadas decisões sobre se bancos de dados específicos devam ser incluídos no modelo e o nível de confiança que deve ser colocado em cada banco de dados diferente. A avaliação e as decisões devem ser documentadas no Relatório do Modelo Digital 3D pelo modelador.



2.3.5.3 Documentação do modelo digital 3D

Existem riscos em fornecer resultados "estáticos" para as equipes de projeto quando o Modelo Geológico-Geotécnico é atualizado continuamente durante um projeto. É necessário um processo para garantir que as equipes de projeto estejam usando as informações mais atualizadas do MGG. As informações podem precisar ser classificadas como fixas (por exemplo, informações factuais que não são sujeitas a alterações, como registros de ensaios de laboratório), bem como informações interpretativas (por exemplo, contatos/superfícies geotécnicas) que podem evoluir à medida que novos dados factuais são obtidos.

Durante as fases mais avançadas dos projetos, especialmente durante a construção, o modelo digital 3D deve ser revisitado e atualizado com novas informações/dados e ser considerada uma reinterpretação das implicações de engenharia. Isso pode ser responsabilidade do engenheiro do proprietário ou da contratada, mas a responsabilidade deve ser claramente distribuída.

É importante a atualização transparente do modelo digital e seus componentes usados dentro de uma estrutura de apoio à tomada de decisões. O resultado de um processo judicial pode depender da demonstração de que o modelo representou a melhor informação naquele momento, e não o que foi descoberto posteriormente. O histórico do modelo digital deve ser documentado manualmente por meio, por exemplo, de uma planilha ou automaticamente por software ou ferramenta baseada na Internet.

2.3.5.3.1 Importância de um eficiente fluxo de trabalho de gestão de dados

A gestão eficiente de dados é um pré-requisito para estabelecer um fluxo de trabalho eficiente para o processo de desenvolvimento do modelo digital 3D. Isto tem grandes benefícios econômicos para o custo total de desenvolvimento e uso do modelo. O seguinte fluxo de trabalho é sugerido:

- Planejar: descrição dos dados que serão compilados e como os dados serão coletados, gerenciados e disponibilizados ao longo de sua vida útil. É provável que



isso envolva o cliente ou outros investidores. Os proprietários devem ser incentivados a preservar seus próprios dados.

- Coletar: captura e aquisição de dados do local e de laboratório como um arquivo de dados padronizado, ou relatórios factuais impressos, ou modelos de captura de dados de planilhas/banco de dados (pró-forma).
- Garantir: a qualidade dos dados registrados é assegurada sempre que possível por meio de verificações por meio de procedimentos de garantia de qualidade (ISO 9001, UKAS, AGS) usando os procedimentos internos apropriados de verificação e validação.
- Descrever: os dados são organizados (limpos e eliminados) com precisão e minuciosamente descritos e compreendidos pelo usuário final. Quando os dados forem excluídos, a justificativa para tal deve ser claramente documentada.
- Preservar: os dados são enviados para um arquivo apropriado de longo prazo em um sistema indexado em nuvem ou em pastas e arquivos do projeto.
- Descobrir: dados potencialmente úteis são localizados e obtidos, juntamente com as informações relevantes sobre os dados (metadados).
- Integrar: dados de fontes distintas são combinados para formar um conjunto de dados homogêneo que pode ser facilmente analisado. Aqui é fundamental que quaisquer limitações de dados ou problemas de escala sejam claramente identificados e registrados.
- Analisar: os dados são empregados para criar visualizações (seções transversais ou modelos digitais 3D) e avaliados usando planilhas ou métodos mais sofisticados de análise de dados.

2.3.5.4 Revisão de modelos digitais 3D

O verificador e o revisor devem ser adequadamente experientes nas condições geotécnicas do local, os requisitos do projeto e o pacote de software usado para criar os modelos digitais 3D.

Antes da revisão do modelo digital 3D, deve ser primeiramente concluída uma verificação do sistema de modelagem. O geólogo de engenharia encarregado da verificação deve

estar familiarizado com o pacote de software e ser capaz de verificar os seguintes fatores:

- Os dados de entrada estão atualizados e as colunas corretas foram importadas do(s) banco(s) de dados.
- As resoluções da topografia e o modelo 3D são adequadas.
- A seleção de superfícies para cada unidade geotécnica.
- A relação entre cada superfície e as outras unidades geotécnicas.
- As superfícies em 3D e sua conformidade com o modelo conceitual básico, furos de sondagem e dados de entrada.
- Quaisquer seções ou outros resultados produzidos.

A avaliação, revisão e verificação de modelos digitais 3D é uma etapa crítica no processo de modelagem e fornece a garantia da qualidade. Como o modelo digital 3D é um aspecto do MGG, os processos e princípios descritos no Item 1.1, bem como as etapas de desenvolvimento descritas no Item 1.2, devem ser seguidos. A revisão e verificação de modelos digitais 3D podem ser mais difíceis e demoradas que a revisão de mapas e seções convencionais, pois todas as áreas das superfícies e volumes devem ser avaliadas e verificadas quanto a sua aderência ao MGG.

Se as seções e o mapeamento 2D forem produzidos e entregues independentemente ao modelo 3D sendo usado como base para a interpretação dos dados, e não fornecidos como um produto do modelo 3D, as seções 2D devem ser revisadas de acordo com a prática padrão (dados de furos avaliados, 'lógica' geológica avaliada etc.).

2.3.5.5 Resultados de modelos digitais 3D

É importante que a incerteza no modelo digital 3D seja documentada e claramente comunicada. Superfícies ou outros elementos do modelo que são extraídos devem ter uma informação de metadados anexada indicando incerteza.

Embora a visualização possa ter sido criada em 3D, nem todos os projetos requerem resultados em 3D. Para alguns projetos, os resultados 2D do modelo digital 3D podem ser suficientes ou até mesmo preferíveis. Muitos pacotes de software de modelagem agora



são configurados para que os resultados 2D possam ser exportadas do software em vários formatos, incluindo formatos de visualização (por exemplo, PDF) e arquivos de desenhos digitais (por exemplo, *.dwg) que podem ser importados diretamente para outros programas para análises.

Os modelos digitais 3D também podem ser importados por outro software de modelagem e projeto (*design*) 3D para informar diretamente os de elementos que dependem das condições do solo. Deve-se tomar cuidado nesses cenários para que a incerteza seja claramente comunicada a todos os usuários atuais e futuros do modelo digital 3D.

Pode ser útil incorporar detalhes 2D em uma saída 3D. Um exemplo disso é a inclusão de seções 2D detalhadas típicas ou específicas em um modelo digital 3D. Podem ser feitas anotações nessas seções. Isso fornece um nível de detalhe para as saídas que não pode ser facilmente capturado em um formato 3D e auxilia na comunicação de detalhes e incertezas do MGG.

Um Relatório de Modelo Digital 3D deve acompanhar todos os dados exportados.

Outras técnicas de visualização incluem PDFs 3D, várias ferramentas específicas de visualização de modelos digitais, animações e vídeos, realidade virtual ou realidade aumentada, impressão 3D etc.

2.3.5.5.1 Modelo Geológico-Geotécnico e Modelagem da Informação da Construção (BIM)

A Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modelling* - BIM) é um processo que envolve a geração e gestão de representações digitais de características físicas e funcionais de uma edificação ou terrenos. Isto visa garantir que a informação apropriada seja criada em um formato adequado no momento correto, para que melhores decisões possam ser tomadas durante o projeto, construção e operação dos ativos construídos (Kessler et al. 2015). Combinar uma visualização 3D do terreno com os



componentes construídos do projeto (às vezes chamado de modelo federado¹⁰) pode ser altamente benéfico, por exemplo, durante a avaliação do projeto.

No entanto, é importante entender as principais diferenças entre os modelos estruturais acima do terreno/BIM e o MGG em termos de incerteza e a forma como os modelos foram desenvolvidos. Podem ocorrer problemas com as saídas digitais do MGG sendo importadas pelos sistemas BIM, sendo consideradas precisas e razoáveis quando um refinamento adicional é apropriado e/ou necessário.

Além disso, é importante reconhecer ou lembrar os usuários/modeladores do nível de incerteza e como isso se relaciona com as escalas correspondentes entre MGG e BIM. Em um modelo BIM, os trabalhos são comumente visualizados com precisão milimétrica, enquanto os Modelos Geológico-Geotécnicos podem ter precisão de dezenas de metros, apropriada para as condições do terreno interpretadas. Isso terá impacto na aplicabilidade de qualquer modelo dentro da hierarquia BIM em termos de Nível de Desenvolvimento (LOD) (BIM Fórum 2019).

Consulte “**Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.-GEOTÉCNICO**” para mais informações.

¹⁰ Nota do tradutor: federated model

2.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MGG

2.4.1 INTRODUÇÃO

A incerteza dentro do Modelo Geológico-Geotécnico é causada por aspectos imperfeitamente conhecidos ou completamente desconhecidos da estrutura cognitiva do modelo. Essa incerteza pode afetar negativamente a confiabilidade do MGG, que é a situação em que as condições geológico-geotécnicas previstas fornecem uma aproximação precisa e razoável das condições ou desempenho reais à medida que influenciam o projeto. Uma confiabilidade reduzida levará ao aumento do risco, que é a probabilidade de um resultado adverso, que é muitas vezes expresso em termos de uma combinação das consequências de uma série de eventos ou cenários e a probabilidade associada de sua ocorrência.

Aumentos na confiabilidade e redução do risco ocorrem por meio do acúmulo de conhecimento conceitual e observacional dentro do MGG, geralmente por vários estágios de investigações que são realizadas à medida que o projeto avança (**Figura 2-10**).

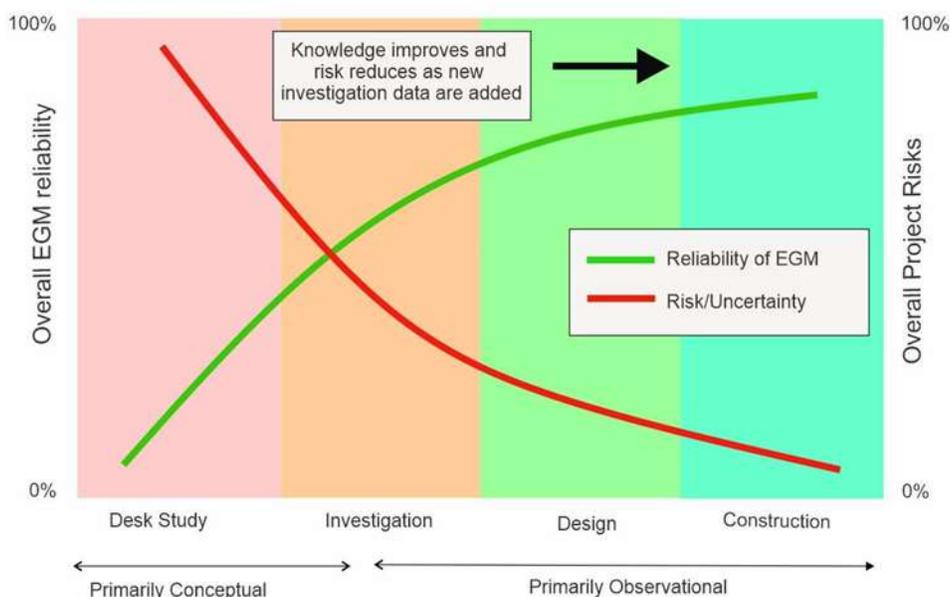


Figura 2-10: Melhorias idealizadas na confiabilidade do Modelo Geológico-Geotécnico conforme o projeto avança.



No entanto, a suposição clássica de que a redução progressiva do risco e o aumento da confiabilidade associada serão obtidos por meio de etapas sequenciais de investigação, depois projeto e depois construção, pode ser enganosa. A redução significativa do risco e a melhoria da compreensão requerem ciclos de retroalimentação durante cada etapa do projeto (Carter 1992, Carter & Marinos 2020). É essencial que, à medida que o projeto avança, o MGG seja revisto, verificado e, quando necessário, aprimorado ou alterado. O aprimoramento da confiabilidade é alcançado por meio de uma melhor compreensão quando ideias conceituais e dados observacionais são conciliados por meio de um processo iterativo de revisão, comparação, modificação e verificação.

Uma verificação verdadeira do MGG em relação a um ambiente geológico natural e complexo do mundo real é problemática. No entanto, os ciclos de retroalimentação no processo de desenvolvimento do MGG (**Figura 2-**) permitem que ele seja condicionado pelas observações advindas do projeto. Se essas comparações mostrarem maior confiabilidade à medida que o projeto avança, a obra muitas vezes poderá ser concluída com mais eficiência, mesmo que o MGG nem sempre seja totalmente preciso.

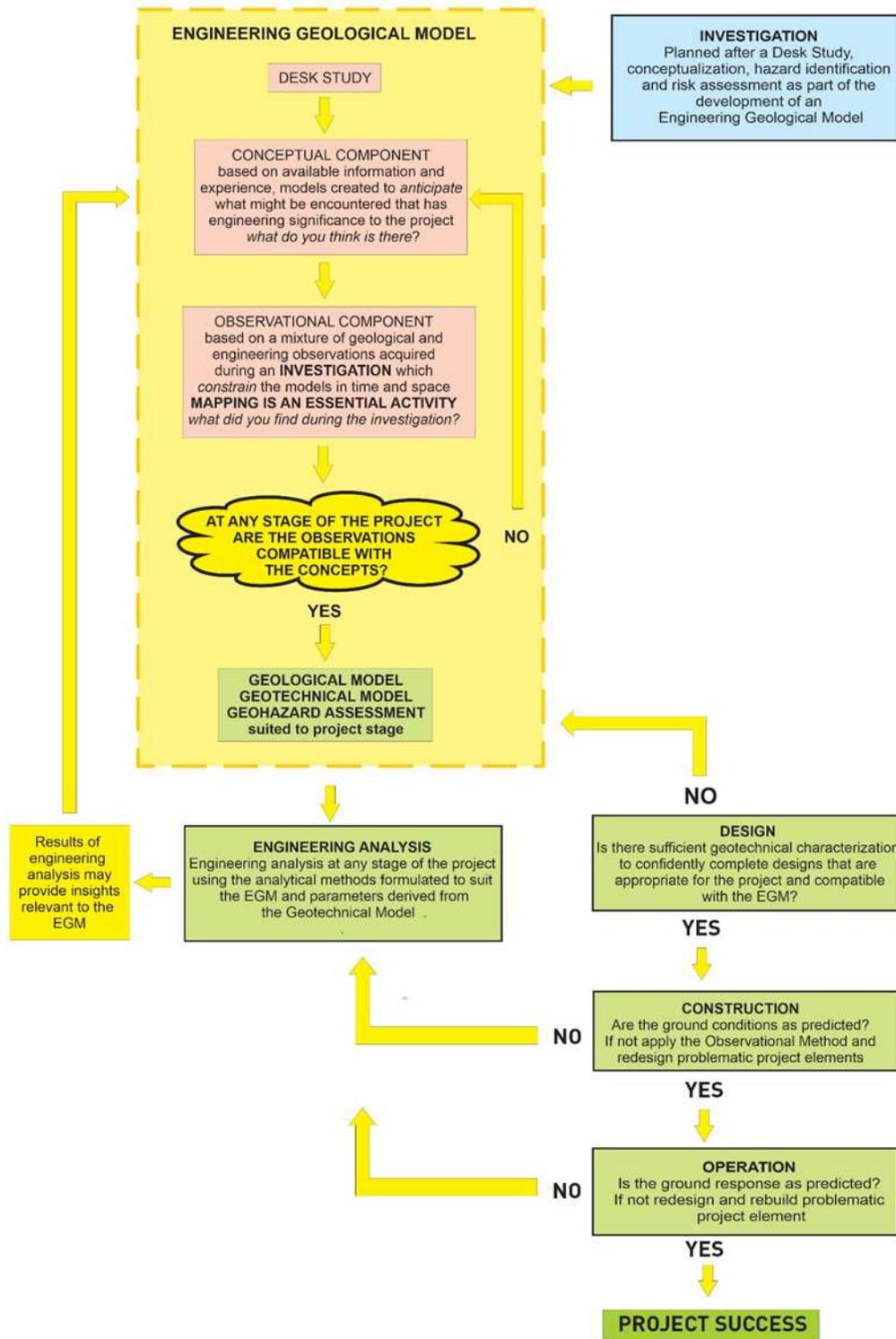


Figura 2-11: Ciclos de retroalimentação para progressivamente atualizar o Modelo Geológico-Geotécnico durante o ciclo de vida do projeto



O nível de risco considerado aceitável para o projeto reflete o apetite do proprietário pelo risco e varia consideravelmente na indústria de engenharia geotécnica e em todo o mundo. Este perfil de risco deve ser considerado no início do projeto, pois fundamentalmente orienta o nível de incerteza que é aceitável dentro da estrutura cognitiva do MGG e, portanto, a natureza e a extensão das investigações que são necessárias para reduzir a incerteza a níveis aceitáveis. O perfil de risco pode ser expresso de várias maneiras, desde a simples afirmação de um nível de risco aceitável expresso qualitativamente até o uso de avaliações quantitativas de risco sofisticadas e critérios de aceitação precisamente definidos.

Ao longo do ciclo de vida do projeto, a incerteza dentro da estrutura cognitiva do MGG também terá que ser comunicada às diferentes partes interessadas, algumas das quais sem conhecimento técnico, usando métodos que sejam relevantes para elas e suas necessidades. Classificações simples e transparentes de nível de risco são preferidas, como exemplificado abaixo.

Classificação de Nível de Risco do Projeto.

EXTREMO	Ameaça significativa ao projeto; ação imediata necessária
ALTO	O risco pode representar uma ameaça ao projeto; recuperação possível; atenção da alta administração necessária
MODERADO	O risco pode representar uma ameaça ao projeto; recuperação quase imediata possível; responsabilidade de gestão deve ser especificada
BAIXO	O risco representa uma ameaça mínima ao projeto; administrar por procedimentos de rotina

2.4.2 FONTES DE INCERTEZA

2.4.2.1 Incerteza no modelo conceitual

As decisões tomadas durante o processo de conceituação podem introduzir erros (bias) e incerteza no modelo. Bond et al. (2008) observaram vários tipos de vieses, sendo os mais relevantes:

- Erros de disponibilidade: uma interpretação que vem mais prontamente à mente e



é familiar.

- Erros de ancoragem: aceitar a opinião publicada dominante ou de 'especialistas'.
- Erros de confirmação: buscar apenas opiniões ou fatos que sustentem a própria hipótese ou, interpretar os dados de forma semelhante para se adequar à hipótese.
- Erros otimistas: interpretar de uma maneira que produza um resultado mais positivo para um estudo (como interpretar uma maior continuidade de estruturas de controle de mineralização ou evitar a colocação de falhas) ou preferir ignorar dados conflitantes que podem reduzir os resultados positivos do projeto.

No entanto, os seguintes fatores também são importantes:

- A relevância espacial dos dados para o projeto – localização e escala.
- A qualidade das fontes de dados disponíveis.
- A representatividade e adequação volumétrica (quantidade) dos dados disponíveis.
- A complexidade geotécnica.

Contudo, a confiabilidade geral do modelo conceitual depende essencialmente do nível de experiência e conhecimento dos envolvidos em seu desenvolvimento.

2.4.2.2 *Incerteza no modelo observacional*

Desde que uma quantidade adequada de dados observacionais seja considerada em um modelo conceitual robusto, as incertezas no modelo observacional serão devidas a:

- Variabilidade inerente: a variabilidade espacial natural do ambiente geológico que não pode ser reduzida.
- Dados limitados: a impossibilidade de medir propriedades geológicas e geotécnicas em todos os pontos do terreno; a incerteza pode ser reduzida aumentando o número e distribuição das medições.
- Incerteza nos ensaios: incertezas relacionadas à precisão de medição de dispositivos de ensaio que não podem ser removidas sem melhorar a qualidade do instrumento de ensaio.



2.4.3 AVALIAÇÃO HOLÍSTICA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Um MGG confiável é estabelecido quando existir 'compatibilidade' ou 'harmonia' suficiente entre o modelo conceitual em evolução e os dados observacionais adquiridos. É o modelo conceitual que é usado para medir essa compatibilidade ou harmonia, pois incorpora o pensamento geológico-geotécnico fundamentalmente correto que precisa ser desenvolvido para um local. Essa comparação também permite avaliar a adequação do modelo conceitual - se houver muitas discrepâncias entre o modelo conceitual e os dados observacionais e elas forem aumentando à medida que mais observações são adquiridas, o modelo conceitual deve ser analisado e revisto. Versões anteriores de um modelo conceitual não devem ser consideradas erradas ou imprecisas, mas devem ser reconhecidas como parte de um processo iterativo e documentadas como parte do desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico.

Embora a revisão especializada inclua a avaliação dos componentes conceituais do MGG, essas análises geralmente ocorrem por um tempo limitado e muitas vezes não podem aprofundar suficientemente nos detalhes do modelo para revelar problemas fundamentais de desenvolvimento que possam afetar a confiabilidade final. Para minimizar o impacto dessa limitação inerente ao processo de revisão, a abordagem ideal é iniciar a revisão por especialistas na primeira oportunidade possível assim que o projeto for iniciado e continuar a análise regularmente até a conclusão do projeto. Isso não será possível quando a revisão por especialistas for implementada no meio do projeto, por exemplo, em resposta a alguma falha importante do projeto.

2.4.4 OUTROS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA E CONFIABILIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

2.4.4.1 Avaliação da confiabilidade do componente conceitual

O MGG deve ser autoverificado em pontos selecionados ao longo do desenvolvimento e refinamento do modelo para que a confiabilidade do modelo conceitual possa ser comparada com situações conceituais análogas às mesmas características geológicas da área que está sendo modelada. Assim, a autoverificação deve ter como objetivo comparar

o conceito previsto com exemplos catalogados do mundo real.

2.4.4.2 Avaliação da confiabilidade do componente observacional – abordagens qualitativas

Existem várias maneiras de comunicar a confiabilidade do modelo observacional aos usuários do modelo, incluindo gráficos e mapas temáticos. A **Figura 2-** mostra um diagrama de confiabilidade na forma de um mapa de calor como um exemplo de como comunicar graficamente a incerteza nas observações.

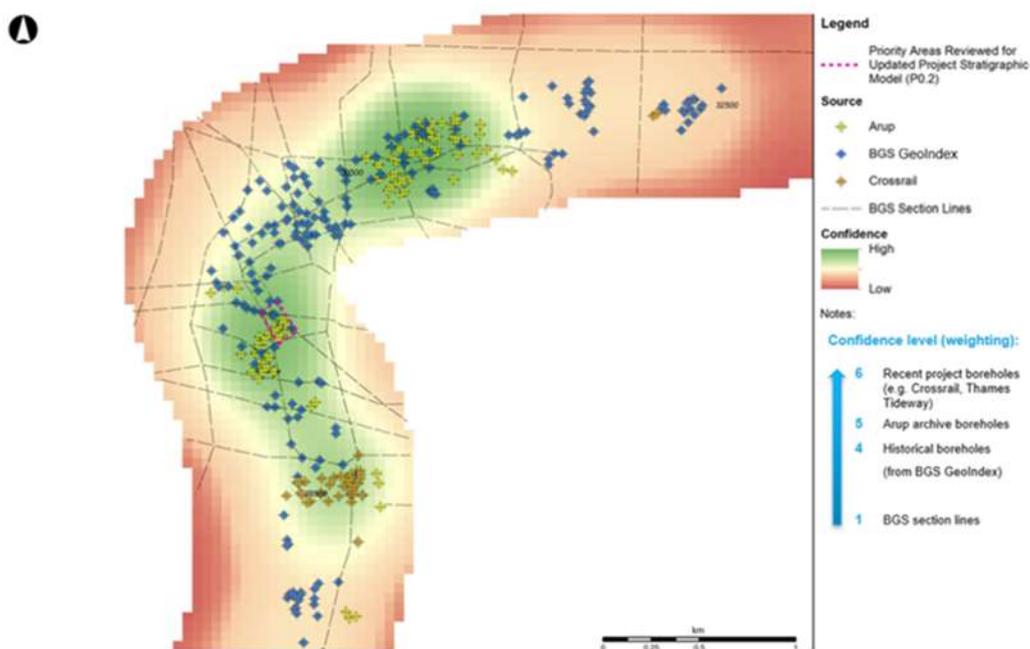


Figura 2-12: Mapa de confiança de calor para níveis estratigráficos (de Ting *et al.* 2020).

A incerteza na representação geométrica de modelos também pode ser documentada e visualizada por técnicas como:

- Consulta de distância (sombrear a superfície e a subsuperfície com base na distância dos pontos de investigação).
- Mergulho frontal da superfície (localiza zonas de interesse, como possíveis falhas observadas como superfícies de mergulho acentuado entre os pontos de investigação).
- Contornar o limite do modelo até uma distância máxima dos pontos de investigação

para não modelar além do limite definido.

2.4.4.2.1 Confiabilidade relativa das Observações Geotécnicas

Uma abordagem qualitativa para avaliar a confiabilidade relativa dos dados pode ser aplicada aos MGG para classificar a confiabilidade dos conjuntos de dados (em ordem de certeza do menor para o maior) sob os títulos 'Implícito', 'Qualificado', 'Justificado' e finalmente 'Verificado' (consulte a **Tabela 2-**).

2.4.4.3 Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens semiquantitativas

2.4.4.3.1 R-Índice (*R-Index*) para escavação de túneis

O *R-Index* é um método de classificação que foi desenvolvido para estimar a confiabilidade de Modelos Geológicos e Geotécnicos preparados para propósitos de escavação de túneis (Perello et al. 2005, Dematteis & Soldo 2015, Venturini et al. 2019), mas foi ampliado para aplicação na indústria de mineração, particularmente para validação de modelo de mina a céu aberto (Carter & Barnett 2021). Este método avalia a qualidade dos dados de investigação geotécnica e a complexidade geológica do local para qualificar a confiabilidade do modelo.

Tabela 2-3: Incerteza relacionada às informações disponíveis

Tipo de Dado	Requisitos (adaptados de Haile 2004) assumindo que o MGG é obtido de acordo com Diretrizes
Implícito	<ul style="list-style-type: none"> Sem dado geotécnico específico do local, necessário ou disponível. O MGG é essencialmente conceitual. O MGG tem um baixo nível de confiabilidade.
Qualificado	<ul style="list-style-type: none"> Os dados específicos do projeto são consideravelmente representativos das principais unidades geológico-geotécnicas e domínios geotécnicos inferidos, embora a variabilidade ou continuidade local não possa ser adequadamente contabilizada. As observações estão amplamente em conformidade com o modelo conceitual. Áreas não conformes identificadas. O MGG tem um nível de confiabilidade moderado.
Justificado	<ul style="list-style-type: none"> Dados específicos do projeto são de distribuição espacial suficiente (densidade) para identificar unidades geológico-geotécnicas e demonstrar continuidade e variabilidade de propriedades geotécnicas dentro de cada unidade. Alto grau de concordância entre os modelos conceitual e observacional. O MGG tem um alto nível de confiabilidade.

Verificado	<ul style="list-style-type: none">• Dados específicos do local são obtidos. Todos os limites/unidades geológico-geotécnicas foram mapeados em campo após a exposição durante a construção.• Alto grau de concordância entre os modelos conceitual e observacional.• O MGG incorpora mapeamento de exposições, por exemplo fundação/túnel, e observação direta de condições in situ.• O MGG tem o mais alto nível de confiabilidade.
------------	--

Dematteis e Soldo (2015) explicaram em detalhe a aplicação do método em um contexto de escavação de túneis com base em um sistema de classificação desenvolvido para considerar os seguintes parâmetros:

- Qualidade da investigação geológica e geotécnica. O método fornece tabelas de classificação para cada um dos parâmetros que se subdividem em:
 - Mapeamento geológico e geotécnico, incluindo fotografia aérea e interpretação de imagens de satélite.
 - Investigação geofísica (investigação indireta).
 - Sondagem e perfilagem, testes de campo e de laboratório (investigações diretas).
- Complexidade do local, que pode ser descrita por meio dos três parâmetros geológicos, denominados Parâmetros do Sistema (o método fornece uma tabela com as classificações a serem utilizadas para as condições geológicas previstas):
 - Complexidade do contexto litoestratigráfico (LC).
 - Complexidade de estruturas relacionadas a deformações dúcteis (DC).
 - Complexidade das estruturas relacionadas à deformação rúptil (BC).

Como muitos dos parâmetros (Parâmetros de Qualidade e Parâmetros do Sistema) envolvidos podem estar relacionados entre si, a influência de um único parâmetro sobre todos os outros e vice-versa é considerada por meio de matrizes de interação binárias e totalmente acopladas.

O cálculo do R-Index é fornecido ao longo do perfil geológico e geotécnico longitudinal do túnel. O alinhamento é dividido em trechos homogêneos, aos quais são atribuídas as classificações dos parâmetros descritos acima, que permitem o cálculo do R-Index para cada trecho. Os valores do R-Index variam de 0 a 10. Sua significância em termos de

confiabilidade do modelo foi deduzida pelo exame de vários estudos de casos e é expressa em quatro classes (A, B, C, D) conforme descrito na **Tabela 2-4**.

Tabela 2-4: Confiabilidade do modelo geológico e geotécnico em projetos de túneis usando o R-Index (modificado de Dematteis e Soldo 2015).

R-Index		Confiabilidade	Descrição
Classe	Valor		
A	10 – 7,6	Boa a muito boa	Limites e falhas relatados na seção serão encontrados dentro de um intervalo de ± 25 -50 m; a margem de erro para a espessura das diferentes litologias pode estar entre 10% e 20%.
B	7,5 – 5,1	Média a boa	Limites e falhas relatados na seção serão encontrados dentro de um intervalo de ± 50 -100 m; a margem de erro para a espessura das diferentes litologias pode estar entre 30 e 50%. Além das indicadas, outras falhas menores podem estar presentes.
C	5 – 2,6	Ruim a média	Limites e falhas relatados na seção serão encontrados dentro de um intervalo de ± 100 -200 m; a margem de erro para a espessura das diferentes litologias pode estar entre 50 e 100%. Além das indicadas, outras falhas maiores podem estar presentes.
D	2,5 – 1	Minimamente confiável ou não confiável	Limites e falhas relatados na seção podem estar ausentes e outros elementos podem estar presentes. A espessura das diferentes litologias não é definida. Elementos geológicos diferentes dos previstos podem estar presentes.

O método possui um módulo específico destinado a abordar o plano de investigação geotécnica para melhorar a confiabilidade do modelo (Perello et al. 2005; Dematteis e Soldo 2015). O método fornece uma avaliação da qualidade de cada um dos dados do modelo e o impacto que os diferentes tipos de investigação geotécnica podem ter para melhorar a classificação e, assim, apoiar a decisão sobre o tipo de investigação geotécnica mais adequada para melhorar a confiabilidade do modelo.

2.4.4.3.2 Avaliação da Incerteza

Após a conclusão de uma investigação no local, o nível de incerteza e confiabilidade de diferentes partes da estrutura cognitiva do MGG pode ser avaliado sistematicamente para identificar as implicações do projeto, por exemplo, usando o método desenvolvido por Paul (2018).



2.4.4.3.3 Uso de declarações de metadados

A incerteza relacionada a arquivos de dados eletrônicos, que podem incluir dados e interpretações, pode ser documentada como uma declaração independente de metadados anexada a arquivos trocados dentro de organizações ou entre diferentes disciplinas e aplicações de software.

2.4.4.4 *Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens quantitativas*

Os seguintes métodos também são capazes de quantificar e gerenciar esse tipo de incerteza: abordagem de campo aleatório, krigagem e simulação estocástica, que são apresentados abaixo.

2.4.4.4.1 Abordagem de campo aleatório

Este método permite que os usuários interpretem a incerteza da variabilidade espacial por uma função de tendência determinística e flutuações aleatórias. Ao implementar as propriedades de flutuação aleatória dentro de uma simulação de Monte Carlo, os usuários podem calcular o desvio padrão espacial relacionado aos valores estimados dos parâmetros em todo o domínio de interesse (Vanmarcke 1984).

2.4.4.4.2 Métodos de Krigagem

Os métodos de krigagem são um conjunto de técnicas geoestatísticas univariadas e multivariadas que permitem mapear a distribuição espacial de dados georreferenciados quantitativos, como propriedades mecânicas e hidráulicas de solos e rochas, bem como de fluidos contidos. Esses métodos são baseados na Teoria das Variáveis Regionalizadas que considera atributos quantitativos de um determinado domínio (por exemplo, uma unidade geológico-geotécnica), medidos de forma discreta, como variáveis aleatórias e espacialmente dependentes. Ou seja, valores relacionados a medições próximas serão provavelmente mais semelhantes do que se fossem mais afastados. Essas técnicas geoestatísticas fornecem uma quantificação da incerteza associada às estimativas em



termos de variância de krigagem que, por sua vez, pode fornecer um valor de desvio padrão (dentro da mesma unidade geológico-geotécnica) ou limites necessários de intervalo de confiança (Vessia et al. 2020). Para que a krigagem forneça resultados significativos, esta deverá ser realizado para as unidades geológico-geotécnicas desenvolvidas com o MGG.

2.4.4.4.3 Métodos de Simulação Estocástica

Os métodos de Simulação Estocástica permitem a quantificação da incerteza, fornecendo uma série de avaliações obtidas por funções de variabilidade espacial definidas por meio de medições experimentais (variograma ou LMC). As numerosas configurações equiprováveis de distribuição espacial resultantes relacionadas ao parâmetro geotécnico em estudo resultam numa distribuição estatística de valores em cada local do domínio considerado, representando uma estimativa e quantificação da incerteza local.

2.4.4.4.4 Incorporação da incerteza dos dados aos parâmetros de projeto

Comentários sobre esses aspectos do projeto estão fora do escopo destas Diretrizes.

Consulte “**Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.-GEOTÉCNICO**” para mais informações.

2.5 GARANTINDO A QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

2.5.1 OBJETIVOS GERAIS DE QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O MGG deve satisfazer uma série de objetivos e deve ser:

- Compatível - com os documentos/especificações da licitação do projeto.
- Robusto - criado a partir de um entendimento lógico baseado na assimilação de todas as informações disponíveis, com aporte de considerável experiência e seguindo a lógica geológica.
- Transparente - de fácil acesso e compreensão até para pessoas não técnicas.
- Defensável - de qualidade suficientemente alta para resistir a críticas razoáveis.
- Consistente - tudo deve funcionar em harmonia e deve estar livre de grandes falhas.
- Suficiente - deve documentar e explicar todas as condições geológicas e geotécnicas importantes no local.
- Necessário - partes do MGG que não são essenciais devem ser removidas.

2.5.2 VERIFICANDO A QUALIDADE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MGG

2.5.2.1 Padronização das Entradas de Dados do Modelo

A padronização da entrada de dados do modelo reduzirá as dificuldades no desenvolvimento de modelos em diferentes estágios do mesmo projeto (que podem ser realizados por diferentes organizações ou diferentes profissionais) e/ou ajudará a padronizar os formatos de entrada de dados nas pastas de ativos. Isso é para garantir que os usuários/clientes possam distribuir esses modelos internamente em suas empresas para permitir o máximo uso deles e permitir que os modelos sejam mais bem compreendidos por aqueles fora das disciplinas de geologia, geotecnia e engenharia civil. A **Tabela 2-** abaixo não pretende ser exaustiva em relação à categorização da camada espacial mas sim fornecer uma orientação quanto ao nível de detalhe das informações que os usuários/clientes gostariam de ver nas informações 'típicas'.

Observe que as informações mais antigas que não possuem o formato 'padrão' podem ser classificadas como 'imprecisas ou incompletas' e omitidas do banco de dados. No entanto, como essas informações podem fornecer entendimentos valiosos sobre as

condições do terreno, é imperativo que elas possam ser incorporadas ao modelo. É importante garantir que os protocolos de padronização de entrada não sejam usados para filtrar e omitir dados não padronizados, mas possivelmente críticos.

Em alguns projetos, as entradas de dados podem ter que atender a um plano de gerenciamento de engenharia digital específico do projeto.

Tabela 2-5: Padronização de entrada de dados.

Tipo de Dado	Subtipo	Informações requeridas
Topografia		Data de aquisição, método de aquisição, descrição da topografia (por exemplo, mescla das superfícies x & y etc.), superada ou atual? precisão declarada, escala
Dados de furos de sondagem/escavação	Boca do furo	ID do furo, boca do furo (xyz), projeção e datum, profundidade, inclinação, azimute, padrão de perfilagem, furo/poço de teste/tipo de trincheira, método
	Dados de fundo do furo (conjunto de dados de referência para todos os dados derivados)	ID do furo, de, até, tipo de rocha/solo, descrição de rocha/solo, normalmente isso está em um banco de dados em um formato de dados reconhecido, por exemplo AGS e todo o banco de dados é disponibilizado.
Dados estruturais (medição geológica)		Data de aquisição, tipo de defeito, medição de azimute magnético ou norte verdadeiro
Dados de piezômetros		ID do furo, data de perfuração, boca do furo, RL, profundidade do furo, tipo de piezômetro, data da medição, nível d'água, resultado do teste de permeabilidade in situ
Seções geológicas		Nome da seção e breve descrição, data, desenhada/produzida, desenhada por/aprovada por, tolerância de deslocamento da seção, orientação, escala, métodos de projeção de furo/poço
Principais feições estruturais geológicas (falhas, diques, zonas de cisalhamento, eixo de anticlinal e de sinclinal)		ID da falha (se aplicável), confiança (conceitual, inferida/baixa, moderada ou alta), distância de extrapolação e justificativa, largura estimada da falha/zona (se conhecida), descrição das características da falha, padrão descritivo (por exemplo, como AS 1726: 2017)
Mapas georreferenciados	Imagens aéreas/sensoriamento remoto terrestre	Data de aquisição, tipo - Lidar, foto aérea, imagem de satélite etc. método de aquisição, faixas de onda, métodos de processamento, superada ou atual, precisão estimada de georreferenciamento, escala
	Desenhos (informações a serem incluídas no próprio desenho ou na convenção de nomenclatura, conforme apropriado)	Número do desenho, data de criação, escala, legenda do desenho (se disponível), datum do desenho original, precisão estimada do georreferenciamento

Geofísica	Linhas de levantamentos (por exemplo, sísmico)	Data de aquisição, método de aquisição, terreno ou sobre a água, legenda, precisão estimada do georreferenciamento
	Levantamentos aéreos (por exemplo, gravimétrico ou radiométrico)	Data de aquisição, método de aquisição, legenda, precisão estimada do georreferenciamento, escala
	Geofísica de furos (por exemplo, perfilagem a cabo (densidade) ou visual (ATV))	Tipo de levantamento, data de aquisição, escala de medição (conforme apropriado)

Consulte “**Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.-GEOÉCNICO**” para mais informações.



2.6 MGG E A ENGENHARIA DE PROJETOS

2.6.1 DESCRIÇÃO GERAL

A estrutura cognitiva do MGG dá suporte à documentação do projeto, provisionamento do projeto, investigação, design, construção e gestão de riscos. Como tal, o MGG é relevante para o Proprietário do Projeto, o Engenheiro do Projeto, o Empreiteiro, o Regulador e outras partes interessadas do projeto.

2.6.2 DESCRIÇÃO GERAL DO MGG E DAS ETAPAS DO PROJETO

O MGG desempenha um papel fundamental na progressão da modelagem-análise-projeto-construção-operação. Embora nem todos os projetos se desenvolvam da mesma maneira e nomenclaturas diferentes sejam usados para descrever as etapas do projeto em diferentes regiões, um esboço de como o MGG pode se desenvolver ao longo de um projeto é apresentado a seguir:

Conceito/Pré-viabilidade

- Majoritariamente baseado em um estudo documental e informações existentes.
- Baixa confiabilidade, especialmente na escala de campo próximo (local do projeto); melhor confiabilidade na escala de campo distante (regional).
- Principalmente conceitual.
- Modelo Geológico inicial produzido.
- Informa questões e perigos geotécnicos de alto nível e fases de investigação subsequentes.
- A visualização 3D pode começar nesta fase.
- A visualização pode ser relativamente simples, como por exemplo, com ênfase em auxiliar na interpretação da geomorfologia e estratigrafia ou litologia, ou pode ser mais complexa, por exemplo, se o mapeamento de reconhecimento está sendo feito.

Viabilidade

- Dados de investigação específicos do local disponíveis. Conceituação revisada e alterada, se necessário.



- Modelo Geológico produzido.
- Realizar avaliação qualitativa ou quantitativa da confiabilidade do MGG. Questionar quais seriam os principais controles geológico-geotécnicos do comportamento do terreno e os mecanismos de falha críticos.
- Planejar investigação adicional para reduzir a incerteza e alcançar a sinergia entre a conceituação e a observação.
- Modelo Geotécnico produzido
- Modelos analíticos iniciais desenvolvidos para informar análises específicas.
- Verificar se a confiabilidade do MGG é consistente com o estágio de projeto.

Projeto Esquemático/Projeto de Licitação

- Maior detalhamento em Modelos Geológicos e Geotécnicos devido à investigação adicional do local.
- Modelos analíticos desenvolvidos para alimentar o projeto.
- Desenvolver submodelos adicionais para conferir melhor confiabilidade em escala maior, conforme necessário.
- Garantir que o MGG seja transferido para os licitantes, onde os arranjos contratuais permitirem.

Fase de Detalhamento do Projeto (Projeto Executivo)

- A visualização pode ser um modelo digital 3D.
- Confiabilidade consistente com os objetivos na escala exigida.
- Modelos analíticos desenvolvidos a partir do Modelo Geológico e Geotécnico com confiança. As perguntas-chave nesta etapa incluem:
 - Quais são os controles geológicos e geotécnicos no projeto presentes no MGG antes do início da análise?
 - Como os resultados analíticos ajudam a compreensão dos mecanismos e comportamento do terreno, e isso é consistente com a compreensão conceitual?
 - Como o entendimento geológico-geotécnico e analítico ajudam na seleção dos parâmetros do projeto? Como o perfil de risco do projeto impacta nas

decisões de design?

Construção

- O MGG é usado como uma ferramenta preditiva para o trabalho de construção e é atualizado repetidamente em resposta às informações do terreno observadas durante a construção.
- Observações e monitoramento da construção, verificação do projeto.
- Serve como um registro "as built" das condições encontradas.
- Integração com o BIM.

2.6.3 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E AS INVESTIGAÇÕES LOCAIS

Após o desenvolvimento do Modelo Geológico inicial, juntamente com o registro inicial de risco, a investigação do local pode ser planejada para testar o modelo e investigar áreas de incerteza. Da perspectiva da geologia de engenharia, o foco da investigação deve estar na aquisição de informações relacionadas aos seguintes objetivos principais:

- Confirmação da compreensão da configuração, estratigrafia, estrutura e processos em superfície, em subsuperfície e ao redor do local. Os dados podem ser adquiridos em locais específicos do projeto, como as extremidades de uma estrutura, mas esses pontos podem mudar com o tempo conforme o layout for modificado. Os dados mais críticos devem ser adquiridos em locais que são favoráveis para a compreensão do Modelo Geológico inicial, como a profundidade dos limites importantes de unidades geológico-geotécnicas. No entanto, como os orçamentos são limitados e todas as partes devem estar envolvidas no planejamento das investigações, sempre haverá comprometimento no planejamento dos locais de investigação.
- Avaliação, caracterização e documentação das unidades e condições geológico-geotécnicas por meio de observações e testes em superfície e subsuperfície.
- Investigação e caracterização de quaisquer perigos e riscos geológicos ou de resposta do terreno que tenham sido indicados na conceituação.
- Avaliação de quaisquer condições geológico-geotécnicas problemáticas cuja existência é conhecida, mas são tão complexas que se torna impraticável investigá-las em detalhe.



- Procurar evidências de quaisquer condições geológico-geotécnicas problemáticas que foram previstas pelo processo de conceituação mas que não foram observadas e, portanto, se encontradas inesperadamente durante a construção, poderiam ser potencialmente ser consideradas como condições imprevistas do terreno que poderiam formar a base para uma reivindicação.

A **Figura 2-** mostra um diagrama de processo genérico sobre como usar a estrutura cognitiva do MGG para planejar e executar investigações no local do projeto.

2.6.4 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO EM ANÁLISE E PROJETO

2.6.4.1 *Entrada de dados do MGG para o projeto*

À medida que o MGG é gradualmente refinado durante as investigações, as observações adquiridas tornam-se cada vez mais compatíveis com os conceitos, a qualidade do entendimento aumenta, a incerteza é reduzida e, para qualquer estágio de um projeto, é alcançado um ponto onde o design pode prosseguir com confiança. Nessa fase, um MGG eficaz contribui para:

- Desenvolver um contexto para a avaliação e seleção de parâmetros geotécnicos apropriados para cada unidade geológico-geotécnica.
- Garantir que quaisquer simplificações do MGG que sejam necessárias para a análise geotécnica sejam razoáveis e robustas.
- Escolher os modelos analíticos mais adequados para o projeto. O nível de análise possível aumentará em sofisticação proporcionalmente à qualidade e confiança do MGG.
- Uma avaliação de risco geotécnico para os vários componentes de engenharia do projeto.
- O MGG também pode ser usado como base para uma avaliação inicial de construtibilidade e técnicas de construção associadas que podem ser empregadas, bem como uma base para estimativa preliminar de custos para o escopo das obras sendo consideradas.

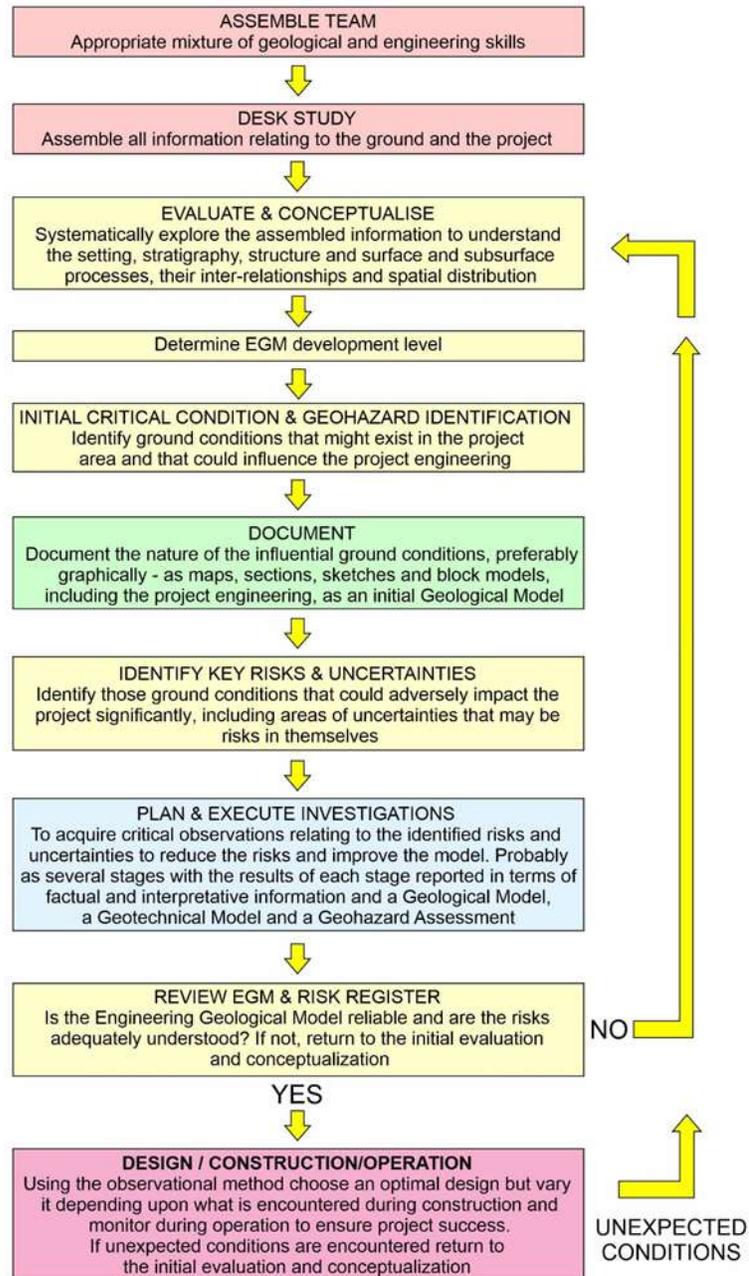


Figura 2-13: Componentes do MGG e investigação no local (segundo Baynes *et al.* 2021)

2.6.4.2 Criando modelos para análise

As representações simplificadas da distribuição das unidades geológico-geotécnicas e suas características de engenharia devem ser exportadas da estrutura cognitiva do MGG

para fornecer informações para desenvolvimento de modelos analíticos. Normalmente, elas incluem seções 2D, mas cada vez mais são requeridas em 3D. Os modelos analíticos devem ser adequados ao software que está sendo usado e geralmente requerem uma simplificação considerável, tanto do Modelo Geológico quanto do Modelo Geotécnico e, portanto, um julgamento significativo é necessário para garantir que condições representativas e apropriadas do terreno, incluindo parâmetros e limites geotécnicos, sejam adotadas.

2.6.4.3 Excesso de ênfase em modelos digitais para projeto

Modelos digitais 3D sofisticados das condições geológico-geotécnicas que não são baseados em um MGG confiável podem dar uma impressão enganosa de entendimento. A tendência aparentemente comum de adotar cada vez mais sofisticação na modelagem digital, mas sem adquirir dados adicionais de verificação em campo devido à inexperiência, falta de orçamento ou falta de tempo (ou a combinação de todos) deve ser reconhecida pelos projetistas, construtores e proprietários, e evitada (**Figura 2-**).

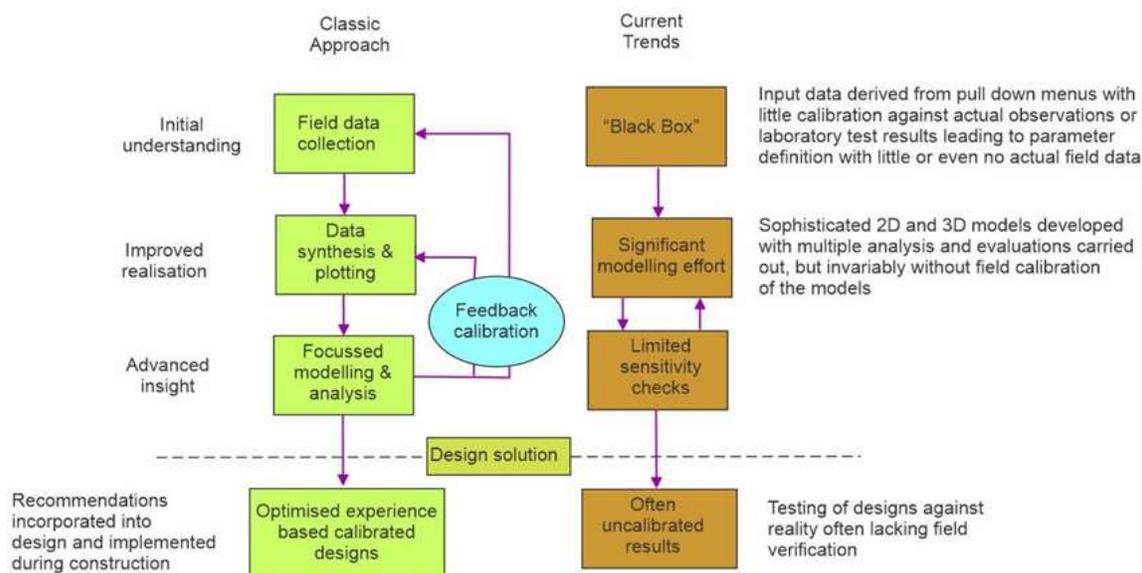


Figura 2-14: Comparação entre a abordagem clássica com a prática de projeto atual (segundo Carter 2015).



2.6.5 MODELO GEOLÓGICO EM GESTÃO DE OBRAS

À medida que um projeto avança para a fase de construção, as condições expostas do terreno devem ser avaliadas em relação às possíveis variações previstas pelo MGG, e deve ser feita uma avaliação se essas variações potencialmente podem ou não impactar a metodologia de projeto ou de construção e se a avaliação de risco geotécnico requer, ou não, atualização.

O MGG também desempenha um papel durante a fase de construção quando o Método Observacional é adotado. O Método Observacional, conforme proposto por Peck (1969), é uma metodologia de projeto e construção distinta do modelo observacional e envolve essencialmente as seguintes etapas:

- Considerar as implicações de engenharia de uma variedade de condições geológico-geotécnicas que podem ser razoavelmente previstas a partir do MGG.
- Projetar para as condições geológico-geotécnicas mais prováveis, mas criar projetos ajustados para a variedade possível de condições geológico-geotécnicas e garantir que o contrato permita tais mudanças.
- Durante a construção, se as condições geológico-geotécnicas encontradas forem diferentes das previstas, os projetos devem ser modificados de acordo. Isso requer uma ligação muito estreita entre as equipes de projeto, os geólogos e geotécnicos em campo e os engenheiros da obra para garantir que as diferenças entre as condições observadas e aquelas previstas pelo MGG sejam resolvidas rapidamente.

2.7 REFERÊNCIAS

AS1726. 2017. Australian Standard Geotechnical site investigations. Standards Australia, SAI Global, Sydney Australia, 75p.

Baynes, F. J., Fookes, P. G. & Kennedy, J. F. 2005. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 67-94. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0271-4>

Baynes, F. J., Parry, S., & Novotny, J., 2021. Engineering geological models, projects, and geotechnical risk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54. <http://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>.

BIM Forum 2019. Level of Development (LOD) Specification 2019, Part I & Commentary for Building Information Models and Data. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>, Accessed 7 January 2020

Bock, H., Broch, E., Chartres, R., Gambin, M., Maertens, J., Maertens, L., Norbury, D., Pinto, P., Schubert, W. & Stille, H. 2004. The Joint European Working Group of the ISSMGE, ISRM and IAEG for the Definition of Professional Tasks, Responsibilities and Co-operation in Ground Engineering. In: Hack, R., Azzam, R. & Charlier, R. (eds), *Engineering geology for infrastructure planning in Europe*. Lecture Notes in Earth Sciences 104, Springer, Berlin, Heidelberg, 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_1

Bond, C. E., Shipton, A. D., Gibbs, A. D. & Jones, S. 2008. Structural models: Optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6), 65-71. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2008006>

Carter, T. G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessment. In: *Proceedings of the 4th Italian Rock Mechanics Conference*, Torino, 1.1–1.22

Carter, T. G. 2015. On increasing reliance on numerical modelling and synthetic data in rock engineering. In: *Proceedings of the 13th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada. Paper 821, 17p. ISBN: 978-1-926872-25-4

Carter, T. G. & Marinos, V. 2020. Putting geological focus back into rock engineering design. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53(10): 4487–4508. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02177-1>

Carter, T. G. & Barnett, W. P. 2021. Improving reliability of structural domaining for engineering projects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28p. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02544-6> Print ISSN: 0723-2632 Electronic ISSN: 1434-453X

Dematteis, A. & Soldo, L. 2015. The geological and geotechnical design model in tunnel design: estimation of its reliability through the R-Index. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1104547> .

Davis, J. 2017. Crossrail's experience of Geotechnical Baseline Reports (GBRs). *Crossrail Project: Infrastructure design and construction*, 4, Published Online: August 21, 2017, © Thomas Telford Limited and Crossrail, <https://doi.org/10.1680/cpid.63594.323>



- Dearman, W. R., Baynes, F. J. & Irfan, T. Y. 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, 354-374. <https://doi.org/10.1007/BF02635355>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. 2015. *Geotechnical engineering of dams*. London, CRC Press. ISBN 9781138749344 <https://doi.org/10.1201/b17800>
- FIDIC. 2019. *Conditions of contract for underground works*. Geneva, Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN 9782884320870
- Fookes, P. G. 1997. Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30(4): 293–424, <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>,
- Fookes, P. G., Baynes, F. J. & Hutchinson, J. N. 2000. Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. Invited Paper, Proceedings of GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, 19 – 24 November, Melbourne, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania USA, 370–460.
- Fookes, P. G., Pettifer, G. & Waltham, T. 2015. *Geomodels in engineering geology – an introduction*. Dunbeath, UK, Whittles. 208 pp ISBN978-184995-139-5
- Giles, P. G., Griffiths, J. S., Evans, D. J. A. & Murton, J. B. 2017. Geomorphological framework: glacial and periglacial sediments, structures and landforms. In: Griffiths, J. S. & Martin, C. J. (eds.) *Engineering Geology of Glaciated and Periglaciated Terrains*. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 28, 59-368. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.3>
- Griffiths, J. S., 2019. Advances in engineering geology in the UK 1950-2018. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 52, 401-413. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-171>
- Haile, A. 2004. A reporting framework for geotechnical classification of mining projects. *AussIMM Bulletin*, September/October 2004: 30-37.
- Hoek, E. & Brown, E. T. 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(3), June 2019, 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Kessler, H., Wood, B., Morin, G., Gakis, A., McArdle, G., Dabson, O., Fitzgerald, R. & Dearden, R. 2015. Building Information Modelling (BIM) – a route for geological models to have real world impact. In: MacCormack, K., Thorleifson, H., Berg, R. & Russell, H. (eds). *Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts*. Geological Society of America Annual Meeting, Baltimore, Maryland, October 31, 2015; Alberta Energy Regulator, AER/AGS Special Report 101, 13–18.
- Knill, J. L. 2003. Core values: the First Hans Cloos Lecture. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 1–34, <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0187-9>
- Moon, A. T., Wilson, R. A. & Flentje, P. N. 2005. Developing and using landslide frequency models. In: Hungr, H., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (eds), *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver. A. A. Balkema, Lieden. 681-690.

Morgenstern, N. R. & Cruden, D. M. 1977. Description and classification of geotechnical complexities: International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations. Italian Geotechnical Society, 2, 195–204.

Norbury, D. 2020. Ground models; a brief overview. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-018>

Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., Novotny, J. & Paul, D. 2014. Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(3), 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0576-x>

Paul, D. R. 2018. A simple method of estimating ground model reliability for linear infrastructure projects. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 – Volume 2, Shakoor, A. & Cato, K. (eds.) https://doi.org/10.1007/978-3-319-93127-2_2

Peck, R. B. 1969. Ninth Rankine Lecture: advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Géotechnique, 19, 171 – 187.

Perello, P., Venturini, G., Dematteis, A., Bianchi, G., Delle Piane, L. & Damiano, A. 2005. Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures the method of the R-Index. Geoline 2005. Lyon (FR). 1–8.

Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990. Analysis of geological structures, University Press, Cambridge, UK.

Shilston, D. T., Teeuw, R. M., West, G. & Engineering Group Working Party. 2012. Desk study, remote sensing, geographical information systems and field evaluation. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 25, 159–200. <https://doi.org/10.1144/EGSP25.06>

Ting, C., Gilson, G. & Black, M. 2020. Developing the 3D geological model for Crossrail 2, London, UK. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-029>

Turner, A. K., Kessler, H. & van der Meulen, M. J. (eds). 2021. Applied multidimensional geological modelling: informing sustainable human interactions with the shallow subsurface. London, Wiley, 450p, ISBN: 978-1-119-16312-1

Vanmarcke, E. H. 1984. Random fields, analysis and synthesis. Cambridge (USA): MIT Press.

Venturini, G., Bianchi, G. W. & Diederichs, M. 2019. How to quantify the reliability of a geological and geotechnical reference model in underground projects. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. 525-537.

Vessia, G., Di Curzio, D. & Castrignanò, A. 2020. Modeling 3D soil lithotypes variability through geostatistical data fusion of CPT parameters. Science of The Total Environment, Volume 6981, Article 134340.

Zaruba, Q. & Mencl, V. 1954. Engineering geology. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 428p. (in Czech)

APÊNDICE A – COLABORADORES

Role	Individual		Country
Autor Principal	Fred	Baynes	Australia
Autor Principal	Steve	Parry	United Kingdom
Autor Principal	Martin	Culshaw	United Kingdom
Autor Principal	Jim	Griffiths	United Kingdom
Editores IAEG	Yogendra	Deva	India
Editores IAEG	Antonio	Dematteis	Italy
Editores IAEG	Erik	Wunder	Brazil
Editores IAEG	Jorge	Bergeman	Argentina
Editores IAEG	Jia-Jyun	Dong	Taiwan
Editores IAEG	Bill	Haneberg	USA
Editores IAEG	Doug	Stead	Canada
Editores IAEG	Ann	Williams	New Zealand
Editores IAEG	Anthony	Bowden	Australia
Colaboradores	Fred	Baynes	Australia
	Richard	Brehaut	Australia
	Roberto	Cravero	Argentina
	Martin	Culshaw	UK
	Dafydd	Chandler	UK
	Antonio	Dematteis	Italy
	Yogendra	Deva	India
	Jia-Jyun	Dong	Taiwan
	Mark	Eggers	Australia
	Peter	Fair	UK
	Robin	Fell	Australia
	Phil	Flentje	Australia
	Martin	Griffin	UK
	Andrew	Forsythe	Singapore
	Jim	Griffiths	UK
	Nizam	Hasan	Malaysia
	Chris	Jack	UK
	Graeme	Jardine	Australia
	Stratis	Karantanellis	Greece
	Aliki	Kokkala	Greece
	Teemu	Lindqvist	Finland
	Robert	MacKean	UK
	Vassilis	Marinos	Greece
	Stuart	Millis	Hong Kong
	Tim	Nash	Australia
	Judith	Nathanail	UK
	Paul	Nathanail	UK
	Simon	Nelis	New Zealand



	Jan	Novotny	Czech Republic
	Steve	Parry	UK
	Darren	Paul	Australia
	Alistair	Schofield	Australia
	David	Shilston	UK
	Ian	Shipway	Australia
	Keith	Turner	USA
	David	Waring	UK
	Felicia	Weir	Australia
	Ann	Williams	New Zealand
	Erik	Wunder	Brazil
BECA forneceu específica contribuição para a Seção 3	Ann	Williams	New Zealand
	Joe	Cant	New Zealand
	David	Dobson	New Zealand
	Christoph	Kraus	New Zealand
	Alicia	Newton	New Zealand
IAEG C28 forneceu específica contribuição para a Seção 4	Antonio	Dematteis	Italy
	Wayne	Barnett	Canada
	Trevor	Carter	Canada
	Diego	Dicurzio	Italy
	Giovanna	Vessia	Italy



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológicos

3 EXEMPLOS



3.1 *APLICAÇÃO E DADOS DE SAÍDA DE MGGs*

Este item fornece exemplos de aplicações e de dados de saída do Modelo Geológico-Geotécnico para diversos tipos de projetos e reflete a diversidade de abordagens adotadas pelos profissionais. É importante observar que esses exemplos foram fornecidos por profissionais antes da finalização das Diretrizes e, como tal, podem não seguir a estratégia de desenvolvimento do MGG definida neste documento. Algumas das terminologias utilizadas podem diferir daquelas recomendadas nas Diretrizes. No entanto, considerou-se que os estudos de caso individuais fornecem exemplos valiosos da incorporação da abordagem do MGG para diferentes tipos de projeto. A intenção é atualizar progressivamente os exemplos fornecidos em revisões subsequentes das Diretrizes.



3.2 *MODELOS GEOLÓGICOS PARA PEQUENOS PROJETOS*

Ian Shipway

O potencial de riscos relacionados ao terreno para grandes projetos de infraestrutura é geralmente reconhecido e os escopos de trabalho para investigação e desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico geralmente refletem esse entendimento. No entanto, o requisito para considerar um MGG para pequenas estruturas ou, às vezes, componentes menores de grandes projetos, é frequentemente negligenciado durante as fases de planejamento. Alguns tipos de projetos de pequeno porte em que o uso de um MGG no processo de desenvolvimento do projeto é frequentemente negligenciado são descritos abaixo:

- Pequenas edificações ou outras estruturas com menor custo de capital.
- Pequenas escavações, como cortes isolados de estradas ou aterros.
- Partes relativamente menores de grandes projetos de infraestrutura, onde pode haver (ou não) um MGG abrangente, mas o detalhamento geológico-geotécnico para algo como uma ombreira específica de ponte pode não ter sido considerado.
- Obras temporárias para grandes projetos, onde a investigação se concentrou nos requisitos das estruturas de obras permanentes, mas não considerou componentes menores, como plataformas de guindastes ou escavações temporárias.

Em todas essas situações, o desenvolvimento de um MGG pode não ser contemplado inicialmente até que algum problema com a engenharia ou construção surja devido à falta de conhecimento das condições do terreno, ou alguma forma de restrição de custo no progresso da obra se torne aparente.

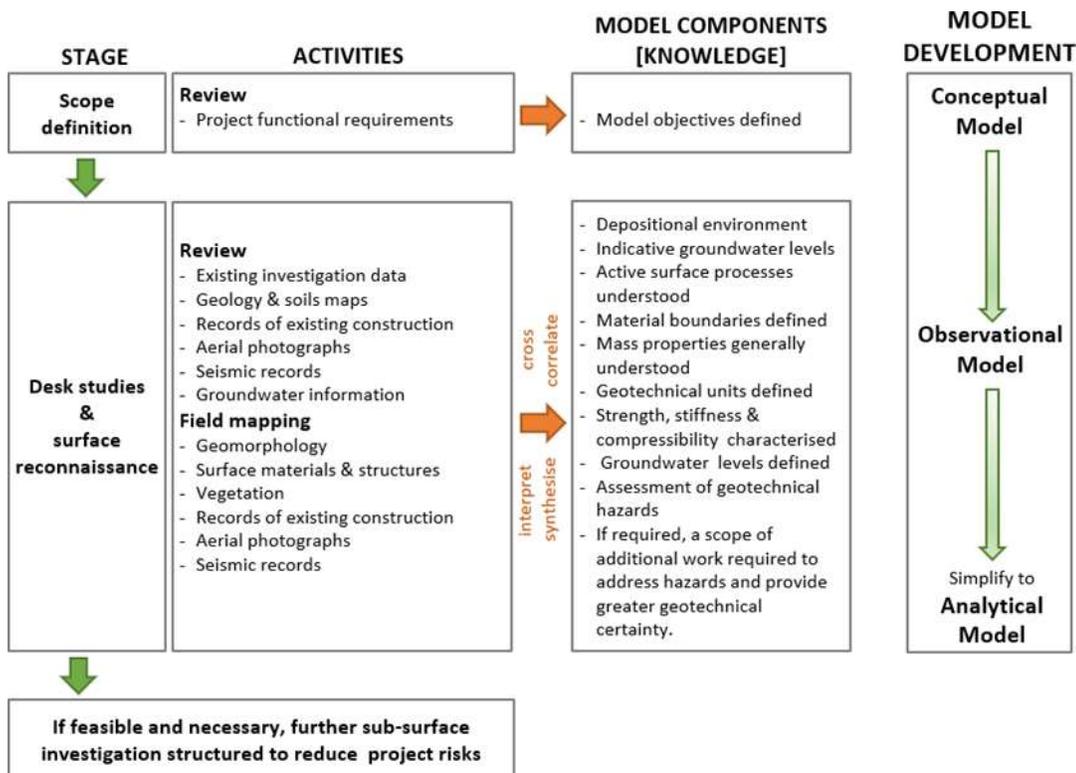


Figura 3.2-1: Descrição das tarefas iniciais críticas que devem ser realizadas

O processo de desenvolvimento de um modelo para um pequeno projeto, com restrições orçamentárias comuns do mundo real ou onde a necessidade de desenvolver um MGG não tiver sido reconhecida até que uma investigação mais ampla tenha sido conduzida, deve ser como mostrado na **Figura 3.2-1**. Essencialmente, a adoção do processo descrito pode permitir o desenvolvimento oportuno de um modelo prático e útil com um escopo de trabalho integrado.

Independentemente de o desenvolvimento do MGG começar junto com a investigação inicial do local ou em algum estágio posterior, são as etapas iniciais do estudo documental e da avaliação de dados que são essenciais para o desenvolvimento de um MGG prático para pequenos projetos.

A **Figura 3.2-2** mostra um típico projeto de pequenas obras temporárias onde a necessidade de algum tipo de modelo não foi compreendida - a construção de uma ombreira de ponte exigia uma plataforma de estaqueamento construída próximo a um rio

para suportar um guindaste enquanto ele era utilizado para cravação das estacas. Nenhuma investigação específica para a plataforma de estaqueamento foi realizada. No entanto, informações de uma investigação detalhada do local realizada para o projeto de estaqueamento da ponte estavam disponíveis.

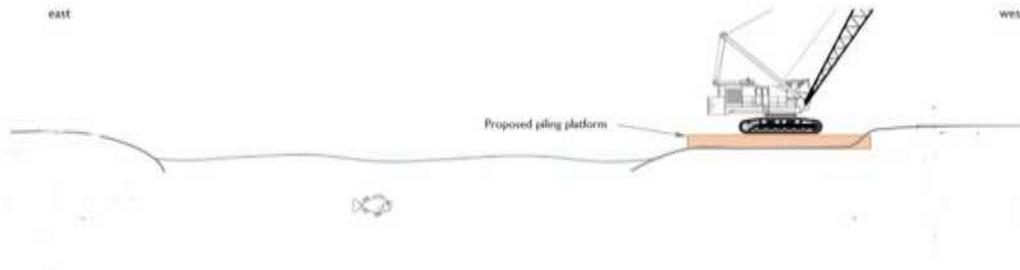


Figura 3.2-2: Esboço de seção transversal antes do desenvolvimento de um Modelo Geológico-Geotécnico para as obras temporárias.

A aplicação do processo de desenvolvimento do MGG na **Figura 3.2-1**, com ênfase na aquisição das informações do estudo documental, permitiu que uma seção transversal mais detalhada fosse preparada conforme mostrado na **Figura 3.2-3**. O modelo melhorado antecipa a presença de uma camada aluvionar com resistência e rigidez potencialmente baixas, o que pode afetar significativamente o desempenho da plataforma de estaqueamento, e identifica alguns riscos geotécnicos específicos.

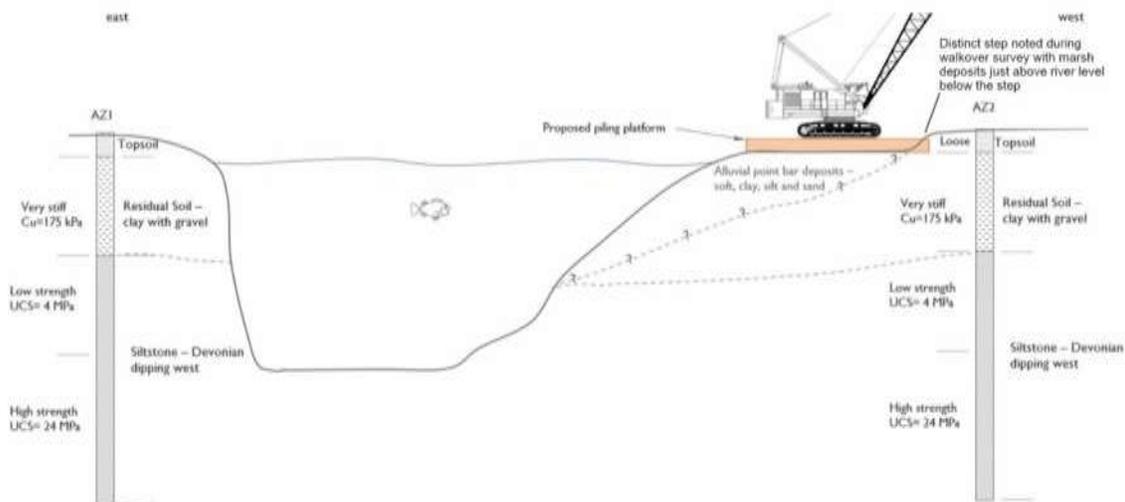


Figura 3.2-3: Seção do local, incluindo condições previstas e riscos potenciais com base no MGG simplificado específico para os trabalhos temporários.



Com um conhecimento mais aprimorado dos riscos geotécnicos, o projetista pode optar por:

- realizar mais investigações para refinar o MGG, ou
- adotar o modelo como está e projetar considerando os riscos inerentes à camada aluvionar mole.



3.3 *MODELOS GEOLÓGICOS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA DE ROCHAS*

Mark Eggers

OBJETIVOS E FINALIDADE DO MODELO

Um dos principais objetivos do MGG para projetos de engenharia em maciço rochoso é entender os controles geológicos sobre o comportamento da rocha quando ela é solicitada por escavações superficiais ou subterrâneas e por forças externas, como cargas sísmicas. O objetivo desta abordagem geológica para engenharia de rochas é permitir uma previsão mais precisa e confiável das condições de estabilidade e facilitar o projeto de engenharia, a construção e a operação do ativo.

É importante que a aplicação da engenharia e os objetivos do projeto sejam claramente definidos no início do processo do projeto. Essas decisões definem como o modelo será construído, incluindo a avaliação de quais são os principais elementos de engenharia a serem projetados. Por exemplo, na engenharia de túneis, os objetivos do modelo podem incluir elementos como:

- Escavabilidade;
- Projeto de estabilidade e suporte;
- Desaguamento e assentamento;
- Afluência de águas subterrâneas e injeção;
- Manuseio, reutilização e descarte de materiais.

Na engenharia de taludes rochosos, o modelo pode ser solicitado para abordar elementos de projeto como:

- Desmonte de produção, detonação de contorno final e escavabilidade;
- Parâmetros de projeto de taludes;
- Estabilização incluindo reforço, descarregamento, medidas de proteção;
- Despressurização de taludes saturados;
- Monitoramento de movimentação de taludes e procedimentos de vigilância do terreno.



ELEMENTOS IMPORTANTES DO MGG PARA PROJETOS EM MACIÇOS ROCHOSOS

Um foco particular do Modelo Geológico-Geotécnico para engenharia de rochas é a geologia estrutural que talvez seja um importante diferencial deste tipo de modelo em comparação com MGGs desenvolvidos para engenharia de solos. Na maioria dos projetos de engenharia, as tensões in situ e induzidas são menores que a resistência da rocha intacta, caso em que o comportamento da rocha é predominantemente controlado por descontinuidades no maciço rochoso. Como tal, a geologia estrutural e a interpretação de dados relacionados são conhecimentos e habilidades importantes necessários para a construção do MGG para engenharia de rochas.

Sempre há exceções à regra, como projetos em grandes profundidades e em locais onde há grande concentração de tensões. Os exemplos incluem minas subterrâneas profundas ou cavidades subterrâneas profundas para estruturas de armazenamento hidrelétrico bombeado. Nestas circunstâncias, a influência das descontinuidades pode ser reduzida.

Há uma tendência na prática recente de concentrar o desenvolvimento do modelo conforme a classificação do maciço rochoso para avaliação de sua resistência ao cisalhamento e uso na avaliação de parâmetros empíricos de projeto. Exemplos típicos são os sistemas RMR (Rock Mass Rating) e GSI (Geological Strength Index) para resistências ao cisalhamento de maciços rochosos, e sistema Q para recomendações de suporte subterrâneo. A tendência de dar muita atenção à classificação do maciço rochoso pode, às vezes, desviar o foco dos principais elementos do modelo que estão representando o comportamento das rochas e os mecanismos de ruptura, em particular as descontinuidades e a água subterrânea. O papel do MGG é garantir que todos os principais controles geológicos do comportamento e desempenho do maciço rochoso sejam adequadamente identificados e avaliados para fins de análise e projeto.

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA PROJETOS EM MACIÇOS ROCHOSOS

A relação entre diferentes tipos de modelos em projetos de engenharia de rochas, as etapas do projeto em que são realizados, as fontes de dados usadas e as atividades realizadas para compilar cada modelo estão resumidas na **Figura 3.3-1**. Esta figura

mostra um diagrama geral de fluxo de trabalho para montar e interpretar um MGG para projetos em maciços rochosos.

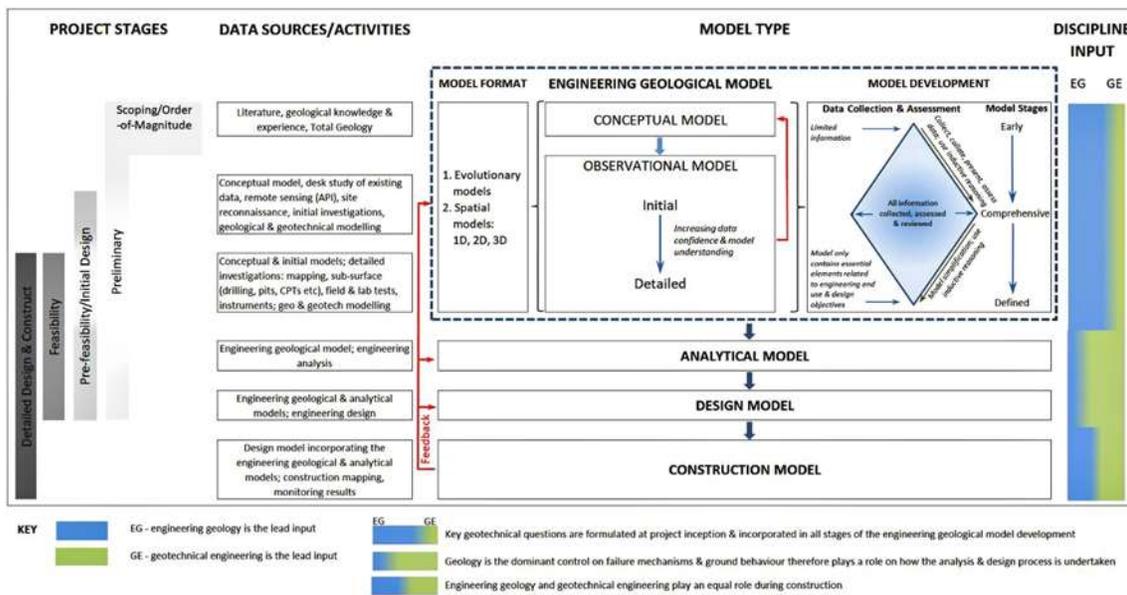


Figura 3.3-1: Diagrama de fluxo de trabalho para desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico para maciços rochosos (Eggers & Bertuzzi 2020)

A modelagem começa com a conceituação que é realizada no início do projeto. Normalmente faz parte de estudos de Escopo, Ordem de Grandeza ou estudos Preliminares com base em um estudo documental da literatura, conhecimento geológico e experiência da área do projeto embasado no conceito de Geologia Global. Esse ponto é quando os objetivos de engenharia são estabelecidos para a compilação das principais questões geotécnicas que devem ser abordadas pelo modelo e pelo projeto.

Para projetos de engenharia de rochas, a conceituação é particularmente importante para o sucesso do processo geral de modelagem. Em última análise, esta etapa inicial permite a criação de modelos estruturais e geológicos hipotéticos (por exemplo, alteração de rocha em depósitos minerais) que são desenvolvidos na escala do projeto com base na configuração tectônica de escala global, passando pela regional até a local. Os modelos hipotéticos fornecem a estrutura na qual os dados e interpretações de investigações futuras são testados e revisados.

O desenvolvimento do modelo pode ser representado por um losango (**Figura 3.3-1**) que denota a quantidade de informação usada ou contida no modelo em cada etapa (Sullivan 2010). Nas etapas iniciais durante a conceituação e construção inicial do modelo observacional, os dados são limitados.

Depois que a investigação é concluída, há uma coleta abrangente de informações no centro do losango. Isso pode incluir mapeamento geológico-geotécnico e dados de sondagem rotativa, incluindo perfilagem geotécnica, perfilagem estrutural de testemunho orientado, imagem de furos (televiseurs ópticos e acústicos) e assim por diante. O próximo passo no processo envolve agrupamento, apresentação e interpretação dos dados para refinar o modelo. Este é um processo de simplificação para focar o modelo nas principais questões geotécnicas a serem abordadas pelo projeto de engenharia.

Este processo pode ser repetido duas ou três vezes conforme o projeto passa pelas fases de pré-viabilidade, viabilidade e projeto executivo. Em cada fase, o modelo é refinado para as questões geotécnicas específicas necessárias para um projeto de engenharia cada vez mais detalhado, incluindo a atualização da conceituação e modelos hipotéticos que sustentam a interpretação estrutural, do maciço rochoso e a interpretação hidrogeológica dos dados.

Enquanto o geólogo desenvolve o MGG, o engenheiro desempenha um papel fundamental nas etapas iniciais ao ajudar a formular as questões geotécnicas que o modelo deve abordar. Durante as análises, o geólogo deve manter um envolvimento para garantir que os controles geológicos sobre o comportamento do terreno sejam adequadamente capturados no projeto. A construção é uma responsabilidade compartilhada entre o geólogo e o engenheiro.

COMPONENTES DO MGG PARA MACIÇOS ROCHOSOS

Como é um MGG para um projeto de engenharia de rochas? Os principais componentes do modelo estão resumidos na **Figura 3.3-2**. Cada uma dessas partes é formulada durante diferentes etapas do desenvolvimento do modelo, mostrado na **Figura 3.3-2**, relacionando

os componentes do modelo ao diagrama de fluxo de trabalho apresentado na **Figura 3.3-1**.

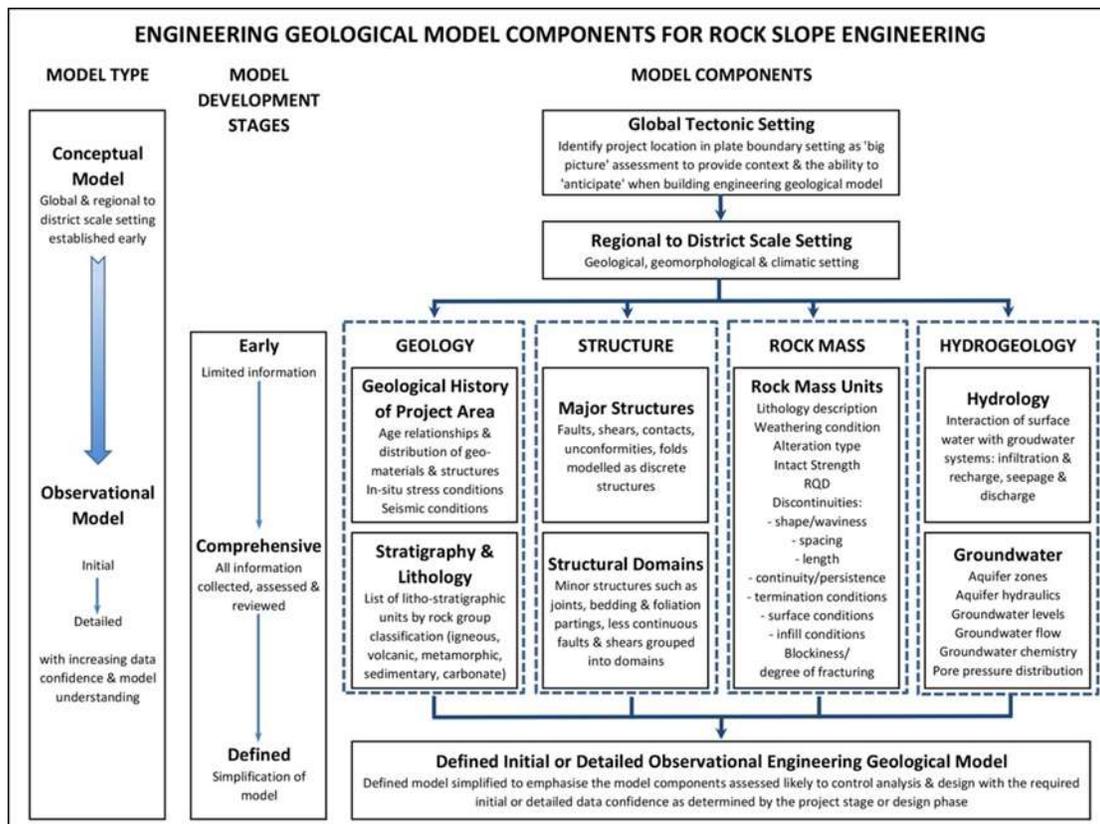


Figura 3.3-2: Componentes do MGG em engenharia de rochas (Eggers & Bertuzzi (2020).

Durante a conceituação, é estabelecido o cenário geológico tectônico em escala global, regional e local. É importante que esse “quadro geral” seja estabelecido no início do processo de modelagem porque fornece uma ferramenta poderosa para ajudar a prever as condições geológicas possíveis na escala do projeto. A força desta abordagem é a compreensão do “quadro geral” que ajuda a considerar as lacunas e avaliar as incertezas que são inevitáveis devido à limitada “amostragem” do maciço rochoso que pode ser alcançada por um programa de investigação. Conceitos estruturais e geológicos estabelecidos e modelos hipotéticos podem ser usados para testar os dados coletados com base nesse conhecimento do “quadro geral” ao construir o modelo observacional.

Os principais componentes do MGG podem ser listados da seguinte forma: geologia,

estrutura, maciço rochoso e hidrogeologia. A **Figura 3.3-2** lista os diferentes elementos e feições a serem observados, registrados e interpretados para cada componente.

No que diz respeito ao componente de geologia, o MGG deve incorporar:

- Conhecimento da história geológica estrutural das rochas, o que permite a interpretação das possíveis condições de tensão, incluindo paleotensões de regimes tectônicos anteriores que ainda podem estar presentes no maciço rochoso.
- Associações estruturais regionais, por exemplo, bacias separadas e estruturas relacionadas à intrusão em depósitos de cobre pórfiro e depósitos epitermais de ouro para desenvolvimento de cavas.
- Compreensão da história geomorfológica do local e como os processos de deposição, erosão e intemperismo podem ter alterado as condições de tensões, desencadeado perigos geológicos e resultado na geração de materiais superficiais formados acima da rocha.
- Dependendo da localização, o histórico de sismos em uma região pode ser importante para estabelecer relações entre a magnitude do terremoto e o período de retorno.

FORMATO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Cada componente principal do modelo pode ser avaliado e descrito conforme ilustrado na **Figura 3.3-3**.

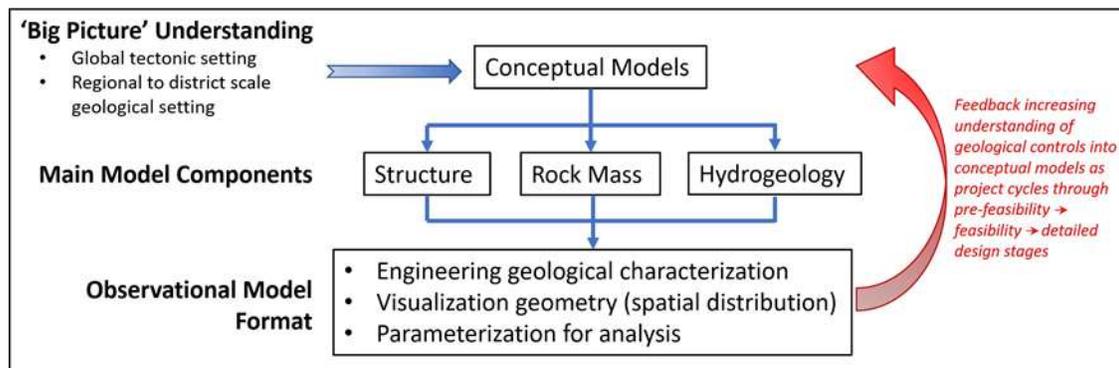


Figura 3.3-3: Formato usado para avaliar e descrever os principais componentes do MGG.



- 1) Avaliar os **fatores geológicos** que controlam ou influenciam a distribuição e a mudança na condição da feição do modelo: por exemplo, influência da litologia e do intemperismo na condição de falha, diferenciação de unidades de maciço rochoso por litologia, grau de intemperismo ou histórico de alteração. Esses fatores são baseados em modelos hipotéticos ou conceituais formulados durante a conceituação a partir da compreensão geológica do "quadro geral" do projeto. À medida que o projeto passa pelas etapas de estudo de pré-viabilidade-viabilidade-projeto executivo, o conhecimento crescente dos controles geológicos obtidos com a modelagem observacional é realimentado nos modelos conceituais para fornecer melhores informações para a etapa seguinte do desenvolvimento do projeto.
- 2) **Caracterização geológico-geotécnica** da estrutura, unidades de maciços rochosos e unidades hidrogeológicas usando sistemas de classificação e descrição apropriados. Em alguns casos, sistemas específicos do projeto podem ser concebidos para registrar e descrever elementos do maciço rochoso que são específicos da geologia do projeto. Por exemplo:
 - Diferentes tipos de rocha brechada em depósitos de cobre pórfiro para capturar os elementos-chave das texturas da matriz de clasto que controlarão o comportamento do maciço rochoso.
 - Diferentes estilos de dano de falha em estruturas principais que influenciam as propriedades de resistência ao cisalhamento.
- 3) **Geometria de visualização** (distribuição espacial) compreendendo limites entre domínios estruturais, unidades de maciços rochosos e unidades hidrogeológicas, e modelagem discreta de estruturas principais. Os limites e as estruturas principais podem ser apresentados em 1D (por exemplo, logs de furos), 2D (plantas e seções transversais) ou 3D (wireframes ou modelos de blocos)
- 4) **Parametrização** que incorpora a quantificação das propriedades físicas como resistência, deformabilidade e permeabilidade da rocha intacta, estrutura e maciço rochoso para fins de análise numérica. Isso é baseado na caracterização da estrutura e das unidades de maciço rochoso, juntamente com a compilação dos resultados dos testes de laboratório.



CONTEÚDO DOS COMPONENTES DO MODELO

As notas a seguir fornecem algumas orientações sobre as informações contidas em cada componente de um MGG típico de maciço rochoso.

Estrutura geológica

O componente estrutural do MGG é normalmente dividido em duas escalas:

- 1) Estruturas de grande porte, que possuem continuidade aproximadamente na mesma escala do projeto: falhas e zonas de cisalhamento, discordâncias e contatos geológicos.
- 2) Estruturas de médio a pequeno porte, representadas no modelo como domínios.

Fontes de dados comuns a estruturas de grande, média e pequena escala para caracterização geológico-geotécnica incluem:

- Mapeamento de afloramentos;
- Perfilagem geotécnica de testemunhos de sondagem;
- Perfilagem estrutural de testemunhos orientados;
- Interpretação de imagens de furos por televiewers óticos ou acústicos.

O uso da projeção estereográfica para apresentar e interpretar os dados de orientação estrutural é uma habilidade-chave na construção do modelo geológico estrutural.

O modelo de grandes estruturas normalmente conterà as seguintes informações:

- Além do mapeamento de afloramentos e dados baseados em furos, **a interpretação de lineamentos** a partir de fotografias aéreas e modelagem de sombreamento de dados LiDAR constitui uma importante fonte de dados para o modelo de estrutura de grande porte.
- A avaliação de uma **hierarquia ou ordem de estruturas** auxilia na compreensão de quais discontinuidades controlarão a estabilidade em diferentes escalas de taludes ou túneis. Em um maciço rochoso estruturalmente complexo, um esquema hierárquico mais sofisticado do que a diferenciação entre estruturas 'maiores' e 'menores' pode ser necessário para capturar todos os elementos importantes para

a modelagem estrutural. Para definir o escopo dos estudos de viabilidade, os dados disponíveis são predominantemente de furos para a maioria dos projetos. A **Tabela 3.3-1** apresenta um esquema que auxilia na interpretação das principais estruturas a partir de logs de furos, fotografias de testemunho e imageamento de furos. Sistemas semelhantes podem ser concebidos com base em dados de mapeamento ou análise de lineamento, normalmente usando comprimento mapeado ou visível e persistência como uma característica para ajudar a julgar a ordem.

Tabela 3.3-1: Exemplo de uma hierarquia de estruturas baseada em dados de furos (Eggers 2016)

Estruturas primárias	Preenchimento com argila ou camada de argila envolvida por uma zona de brecha argilosa mais extensa, com uma maior proporção de trama de brecha heterogênea a rotacionada, suportada por matriz; esta zona pode passar a uma zona fragmentada a altamente fraturada, mudando para brecha do tipo mosaico a quebradiça suportada por matriz a clasto, dependendo da largura e natureza da zona de 'dano'.
Estruturas secundárias	Menor desenvolvimento de uma zona de brecha de argila sem um preenchimento significativo ou zona de argila dentro de rocha fragmentada a altamente fraturada
Estruturas terciárias	Rocha fragmentada a altamente fraturada na lapa imediata e capa do plano de falha sem desenvolvimento de materiais de preenchimento ou brecha argilosa

- **Classificação de falhas e classificação da confiança.** A interpretação do modelo estrutural é muitas vezes baseada em uma série de fontes de dados, principalmente a avaliação de furos de sondagem apoiada por uma foto aérea e/ou um estudo de lineamento LiDAR e, às vezes, com a disponibilidade de exposições de superfície para mapear. O sistema apresentado na Tabela 3.3- permite reunir todas essas fontes de dados para classificar cada estrutura. A classificação de falha é usada para classificar cada estrutura quanto ao nível de confiança em termos de precisão da previsão, conforme mostrado na Tabela 3.3-3. A classificação da confiança, juntamente com a avaliação da hierarquia, contribui diretamente para o conhecimento de quais estruturas podem ser consideradas para análise de estabilidade e em que escala a estrutura pode impactar nas condições de estabilidade.

Tabela 3.3-2: Exemplo de uma classificação de fontes de dados de falhas (Eggers 2016)

Foto aérea/lineamento por LiDAR	Interseção por furo	Exposição em superfície
Y — com	1 — com	y — com
N — nenhum	0 — sem	n — nenhuma

Tabela 3.3-3: Exemplo de um sistema de classificação de confiança de falhas (Eggers 2016)

Nível	Classificação	Descrição
1	Y1y	Alta
2	Y0y, Y1n, N1y	Média
3	Y0n, N1n, N0y	Baixa

- **Distribuição espacial/geometria.** Grandes estruturas são normalmente modeladas discretamente como feições específicas no MGG. Em um modelo 3D digital, elas podem ser incorporadas como superfícies em wireframe ou como um modelo de blocos se a estrutura for representada com uma largura definida, em função da caracterização geológico-geotécnica.
- **Propriedades de resistência ao cisalhamento** são avaliadas a partir da caracterização geológico-geotécnica e dos testes de laboratório. Elas também podem ser estimadas a partir da retroanálise de instabilidades anteriores. Os materiais da zona de falha associados a grandes estruturas geralmente são solos. O teste desses materiais pode incluir o teste de resistência ao cisalhamento triaxial de amostras intactas coletadas por sondagens com recuperação de testemunhos.

O **modelo de domínio estrutural** é composto por dados de estruturas de médio a pequeno porte. As feições e elementos de importância para o modelo de domínio estrutural são resumidos abaixo:

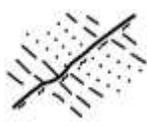
- No modelo de domínio estrutural é importante diferenciar claramente entre estrutura interna, que forma uma trama no maciço rochoso (p. ex. foliação), e descontinuidades estruturais (p.ex. fraturas).
- O processo de formulação do modelo de domínio estrutural compreende:
 - Avaliar a mudança nos padrões estruturais em toda a área a partir de cada

uma das fontes de dados disponíveis, ou seja, mapeamento, perfilagem estrutural de testemunho orientado e/ou interpretação das imagens de furos (ATV, OTV).

- Avaliar os controles de grandes estruturas nos limites do domínio, como falhas e cisalhamentos, contatos litoestratigráficos, discordâncias e assim por diante.
- Um modelo pode ser apresentado como uma planta ou uma vista mostrando os limites do domínio estrutural com diagramas estereográficos resumidos, mostrando os padrões estruturais de cada domínio.
- A caracterização geológico-geotécnica da estrutura deve ser baseada no tipo de descontinuidade, separada por domínios e conjuntos de descontinuidades, se houver dados suficientes. Os dados do mapeamento ou perfilagem podem frequentemente ser apresentados de forma eficiente como histogramas resumidos com todas as características descritas apresentadas em uma folha para cada conjunto de descontinuidade ou tipo de descontinuidade.
- A resistência ao cisalhamento de descontinuidades é normalmente baseada em ensaios de cisalhamento direto com resultados separados em um gráfico de tensão de cisalhamento versus tensão normal para cada tipo de descontinuidade, com resultados de ensaios diferenciados por condição de amostra de descontinuidade de perfilagem, incluindo forma de descontinuidade, rugosidade, tipo de preenchimento e largura.

Observe que o mesmo tipo de estrutura geológica pode formar tanto uma trama na rocha quanto estruturas que impactam em diferentes escalas no maciço rochoso. Um exemplo é a foliação em folhelho, conforme explicado na **Tabela 3.3-**. O mesmo conceito se aplica à estrutura de estratificação em rochas sedimentares que podem formar uma trama e uma série de diferentes estruturas de descontinuidade, como clivagem, cisalhamento de estratificação e zonas de falhas paralelas de estratificação.

Tabela 3.3-4: Diferentes tipos de estrutura de foliação

Estrutura interna	Descontinuidade			
	Trama da foliação	Partição da foliação	Cisalhamento da foliação	Zona cisalhada paralela à foliação ou camada com fragmentos de rocha
Camadas repetitivas na rocha intacta formando uma trama planar devido à orientação preferencial dos grãos minerais constituintes, que em rochas metamórficas são frequentemente minerais laminares. Podem formar uma anisotropia na resistência do material rochoso intacto	Separação única no maciço rochoso, paralela (ou quase paralela) à foliação, sem sinais de cisalhamento	Separação única no maciço rochoso que é paralela (ou quase paralela) à foliação onde a estrutura mostra evidências de deslocamento por cisalhamento, como superfícies polidas ou com estrias de fricção	Zona de fragmentos de rocha (clastos), de solo ou mistura de fragmentos de rocha em uma matriz de solo com limites paralelos à foliação; a zona cisalhada é caracterizada por juntas estreitamente espaçadas, superfícies cisalhadas que dividem a massa em clastos lenticulares ou em forma de cunha; a zona pode ser suportada por clasto ou por matriz. A camada de material terroso com conteúdo variável de fragmentos de rocha tem limites paralelos à foliação; a camada geralmente é suportada por matriz (solo), mas pode ser suportada por clasto (fragmentos de rocha).	
				
				

Maciço rochoso

Estes exemplos ilustram a importância de definir e descrever claramente os diferentes tipos de estruturas que estão presentes no maciço rochoso. O tipo de descontinuidade carrega implicações em relação ao tamanho (comprimento, persistência), frequência (espaçamento) e resistência ao cisalhamento que são características que devem ser bem entendidas para a elaboração do modelo estrutural.

A chave para a caracterização do trecho em maciço rochoso do MGG é a avaliação dos controles geológicos sobre as mudanças nas condições do maciço rochoso no local do projeto. O uso de modelos conceituais formulados durante a montagem do cenário geológico é fundamental para esta etapa, que deve incluir uma compreensão da história

geológica. Exemplos de controles geológicos na definição de unidades de maciço rochoso incluem:

- Litoestratigrafia (mudança no tipo de rocha);
- Intemperismo (alteração supérgena);
- Alteração (hipógena) (particularmente em projetos de mineração de natureza epitermal e pórfiro);
- Tipos de brechas (hidrotermais, magmáticas, vulcânicas etc.);
- Tectônica, tanto em materiais de zona de falha quanto em zonas de dano de falha (fraturadas) em rocha adjacente.

É importante lembrar que, para a maioria dos projetos, geralmente existem vários geocontroles sobre o tipo e a distribuição das unidades de maciço rochoso. Por exemplo, um conjunto típico de controles é uma combinação de litologia e intemperismo. À medida que a complexidade da história geológica aumenta, o número de geocontroles das condições do maciço rochoso geralmente aumenta.

Um exemplo de um modelo de maciço rochoso para um depósito de cobre pórfiro no sudeste da Ásia é mostrado na **Tabela 3.3-**. Neste exemplo, o tipo de rocha é o mesmo em toda a área do projeto, que compreende um andesito nos flancos de um antigo estratovulcão.

Tabela 3.3-5: Exemplo de um modelo de maciço rochoso para um projeto de cobre pórfiro (Eggers 2016)

Unidade de maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Correlação com modelo geológico	
		Alteração/Tipo de rocha	Falhamento
WR	'Rocha intemperizada'	Argiloso/rocha EW-HW	Fora das principais zonas de falha
FR	'Rocha fraturada' com RQD alto a moderado, sem argila e cisalhamento isolado	<ul style="list-style-type: none"> • Abaixo da superfície de gesso • Andesito em estágio avançado 	
HF	'Rocha altamente fraturada' com baixo RQD, cisalhamento ocasional e zonas de brecha	<ul style="list-style-type: none"> • Propilítica • De melhor qualidade, medianamente argilosa 	

FG	'Rocha fragmentada' com RQD muito baixo a zero; algum desenvolvimento de matriz argilosa (suportada por clastos) com algum cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> Argilosa avançada De baixa qualidade, medianamente argilosa 	Geralmente fora das principais zonas de falha
HBx/FBx	'Brecha argilosa' (suportada por matriz) com numerosas zonas cisalhadas e sem retorno de água de perfuração	Rocha intensa e hidrotermalmente brechada	Brecha de falha
FC	'Rocha esmagada' tipicamente caracterizada por rocha de resistência muito/extremamente baixa e sem retorno de água de perfuração	Independente do tipo de rocha	Camadas de esmagamento por falha

O principal diferenciador na condição do maciço rochoso neste projeto é a alteração hipógena de alta sulfetação, alteração supergênica em estágio tardio, brechação hidrotermal e falhamento. Os dados históricos para este projeto indicam uma brechação complexa, compreendendo:

- brechas de fluxo autoclásticas precoces e desenvolvidas localmente e brechas de carapaça de intrusão;
- brechas diatrema de estágio intermediário espacialmente restritas;
- brechas hidrotermais de alta sulfetação, onipresentes, e
- brechas de falha.

Diante de tamanha complexidade, principalmente onde ocorrem múltiplos eventos brechados, nem sempre é possível desvendar completamente a história geológica responsável pelas condições do maciço rochoso no âmbito e no contexto dos estudos de engenharia. Nessas situações, deve haver um foco adicional na caracterização geológico-geotécnica para identificar e separar as unidades de maciço rochoso que são o produto de eventos de sobreposição de natureza semelhante.

O modelo de maciço rochoso pode ser formulado da seguinte forma:

- Histogramas de dados do maciço rochoso extraídos de perfilagem de furos e/ou mapeamento de afloramentos que resumem as principais características de cada



unidade de maciço rochoso.

- A geometria do modelo digital pode ser apresentada como limites de wireframe entre unidades de maciço rochoso ou um modelo de blocos do maciço rochoso. Devido à típica baixa 'amostragem' do maciço rochoso com furos geotécnicos largamente espaçados, a modelagem digital das superfícies de contorno do maciço rochoso geralmente pode ser baseada em elementos selecionados do modelo geológico, como um *proxy* baseado nos modelos conceituais desenvolvidos a partir da compreensão do 'quadro geral' e os resultados dos estudos de caracterização geológico-geotécnica.
- Algum cuidado é necessário ao adotar *proxies* geológicos para modelar unidades de maciço rochoso para estudos de projeto de mina. Normalmente não é apropriado adotar apenas o modelo geológico do recurso como base para avaliar unidades de maciços rochosos. O modelo de recurso é compilado principalmente para explicar a distribuição do teor de mineralização. Em contraste, o MGG é formulado para explicar a mudança no caráter geológico-geotécnico, que pode ser um pouco diferente da forma e função do modelo de recurso.
- A parametrização é baseada em uma combinação de caracterização geológico-geotécnica e de testes de laboratório. As classificações de maciço rochoso RMR e GSI são frequentemente usadas para estimar a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso.

Uma tendência recente é que o desenvolvimento de modelos seja substancialmente limitado à aplicação de RMR e GSI com o objetivo de estimar as resistências ao cisalhamento do maciço rochoso. A "abordagem de receita pronta" fornecida por esses sistemas de classificação é vista como um método rápido e fácil de modelar o maciço rochoso. O perigo dessa abordagem é que os principais elementos geológicos do maciço rochoso que provavelmente controlarão o comportamento do terreno não são reconhecidos corretamente. A falta de um entendimento do 'quadro geral' do projeto não fornece o conhecimento conceitual para testar os dados coletados durante as investigações. A identificação errônea de mecanismos críticos de ruptura na análise devido à falta de modelagem geológico-geotécnica adequada representa um risco



geotécnico para o projeto de engenharia.

Hidrogeologia

As águas subterrâneas e a interação delas com as águas superficiais são partes importantes do MGG para a engenharia de rochas. Os principais objetivos do modelo de águas subterrâneas são avaliar o desaguamento e o assentamento, afluência e injeção para desenvolvimentos subterrâneos, escavações profundas, despressurização de taludes rochosos e trabalhos em superfície.

Pode haver vantagens substanciais em integrar as investigações geotécnicas e hidrogeológicas a um projeto, em vez de tratá-las como programas independentes. Isso inclui o compartilhamento do desenvolvimento e do entendimento do "quadro geral" durante a conceituação e a interpretação das unidades hidrogeológicas, que geralmente é uma variante do modelo do maciço rochoso. O modelo de estrutura maior é tão importante para a hidrogeologia quanto para a avaliação geotécnica.

Informações sobre o desenvolvimento do modelo hidrogeológico são fornecidas no Item 3.6; consulte também Preene (2020).

Referências

Eggers, M. J. 2016. Engineering geological modelling for pit slope design in the porphyry copper-gold deposits of Southeast Asia. Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference, 6-8 September 2016, Brisbane, pp 49-81. Australian Centre for Geomechanics (ed P. M. Dight). DOI https://doi.org/10.36487/ACG_rep1604_0.4_Eggers

Eggers, M. J. & Bertuzzi, R. 2020. Chapter 1 The Engineering Geological Model. In: Tunnel Design Handbook 4th Edition by Robert Bertuzzi; PSM publication

Sullivan, T. D. 2010. The Geological Model. In: Williams, A. L., Pinches, G. M., Chin, C. Y., McMorran, T. J. & Massey, C. L. (eds) Geologically Active, Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Auckland, New Zealand, 155-170.

Preene, M. 2020. Conceptual modelling for the design of groundwater control systems, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-138>



3.4 *MODELOS DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA PROJETO DE ESCAVAÇÕES EM MACIÇOS ESTRUTURALMENTE CONTROLADOS*

Robert MacKean

Introdução

É amplamente reconhecido que, se as estruturas geológicas ditam os mecanismos de deformação dos maciços rochosos, então a compartimentação estrutural deve ser examinada e detalhada minuciosamente (Brown 2008, Hoek et al.2013). Só então os mecanismos e as condições de estabilidade podem ser compreendidos e as medidas de engenharia apropriadamente concebidas, quando necessárias, para melhorar a condição existente. Esta breve visão geral descreve como a estrutura geológica pode ser incorporada em um processo de projeto, por meio do uso de um tipo específico de Modelo Geológico, chamado Modelo de Maciço Rochoso (MMR).

O contexto estabelecido por um MGG mais amplo e estudos associados são essenciais no projeto de engenharia de rochas e como um pré-requisito para um MMR. Tais estudos, descritos em detalhe em outras partes deste documento, normalmente incluiriam uma compreensão da história geológica regional, incluindo a compartimentação estrutural, clima e campos de tensão, definição de famílias de juntas, subdivisões de acordo com domínios estruturais e litológicos e outros fatores como intemperismo, alteração e fatores dependentes do tempo, como sensibilidade à umidade, solução, tectônica, carregamento ou descarregamento e águas subterrâneas. Estes são todos fatores que um geólogo ou geóloga de engenharia deve considerar, dependendo do cenário geológico e dos requisitos de engenharia.

Surpreendentemente, na prática atual da engenharia de rochas, é comum haver pouca representação explícita da compartimentação estrutural. Em vez disso, parâmetros de resistência 'globais' (generalizados), assumidos para representar a contribuição tanto do material rochoso quanto das discontinuidades, são estimados e frequentemente usados para análises de meio contínuo. Análises que não fazem referência explícita à estrutura geológica de controle são incapazes de simular a influência da anisotropia ou as respostas



específicas da mecânica das rochas e os mecanismos de ruptura associados a maciços rochosos descontínuos. Tais análises em muitas circunstâncias não conseguem fornecer qualquer base confiável para o projeto.

As conclusões de projeto oriundas de tais análises, incluindo previsões de uma distribuição uniforme de carregamento favorável do terreno em um revestimento, podem ser altamente enganosas (Barton 2016) e vários colapsos notáveis aconteceram, apesar das análises que indicavam conformidade com as normas de projeto estrutural.

Como solução, propõe-se que a compartimentação estrutural seja representada rotineiramente como um MMR e que um MMR seja considerado um requisito para as melhores práticas de avaliação e desenvolvimento de projeto de engenharia de rochas. Um MMR, atuando como uma representação detalhada em corte transversal (ou 3D) da estrutura geológica, deve ser desenvolvido no contexto de um MGG, para qualquer projeto de engenharia de rochas, para garantir que a compartimentação estrutural essencial para caracterização, avaliação e análise seja fornecida.

Os MMRs ajudam na combinação de dados geológicos, incluindo a estrutura, com a teoria da mecânica das rochas para promover uma capacidade interpretativa e preditiva para a prática da engenharia de rochas.

O que são modelos de maciços rochosos (MMR) e para que servem?

Um MMR deve procurar ser um modelo semi-determinístico que utiliza, quando disponível, medições em afloramentos, furos de sondagem e túneis escavados que, tanto quanto for possível, posicione cada descontinuidade na sua localização correta no modelo em relação às outras. Este processo é diferente de DFNs (*Discrete Fractures Networks*) computacionais obtidas estatisticamente, que normalmente adotam uma abordagem probabilística.

Os desafios de definir e identificar descontinuidades no campo não são aqui abordados, mas é feita referência a um resumo útil desenvolvido por Hencher (2013). O artigo também

aborda as dificuldades em aceitar afloramentos de rocha como um análogo confiável das condições estruturais em profundidade.

Um exemplo de MMR para um projeto de cavidade em calcário carbonífero, com base em interpretação, é mostrado na **Figura 3.4-1**.

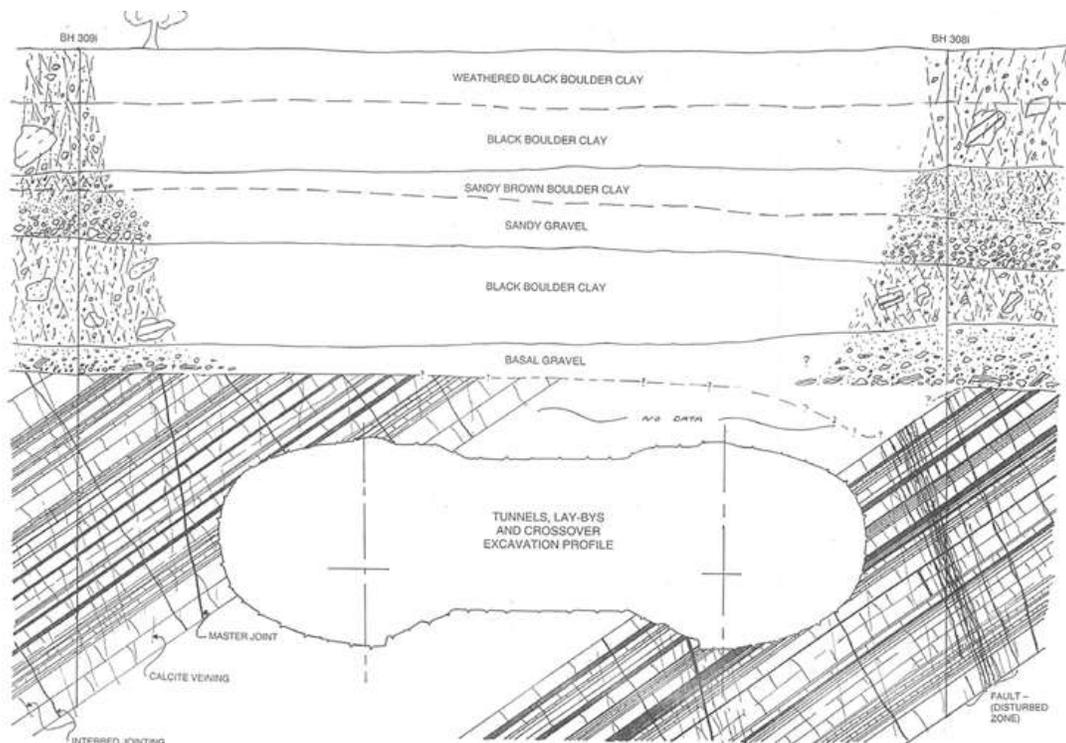


Figura 3.4-1: Exemplo de um modelo de maciço rochoso em escala para um calcário carbonífero com base em interpretação de dados de furos de sondagem para investigar a viabilidade da construção de cavidade no Túnel do Porto de Dublin (esboço à mão por Robert MacKean).

No contexto de um amplo MGG, um MMR descreve em detalhes a compartimentação estrutural e a distribuição de materiais rochosos em 2D ou 3D, fornecendo um contexto ao qual parâmetros podem ser atribuídos e os principais controles do comportamento do maciço rochoso podem ser identificados. Os MMRs contribuem em todas as etapas de avaliação ou projeto e sua finalidade é ampla e variada, incluindo:

- Estudos de localização, focando na litologia principal e nas principais estruturas geológicas em termos de orientação e frequência.



- Caracterização específica do local e síntese da geologia local em profundidade.
- Uma representação visual da compartimentação estrutural real no contexto de um croqui de engenharia (como taludes, túneis, cavidades, fundações, incluindo barragens).
- Apresentação de uma condição específica do maciço rochoso como base para a classificação geomecânica (Q, RMR etc.), ou seja, a classificação se torna um componente de saída do processo de modelagem geológica e do maciço rochoso.
- Opinião fundamentada ou análise geotécnica empírica da condição de estabilidade intrínseca e layout conceitual das medidas de engenharia necessárias.
- Uma estrutura para caracterização geomecânica de todos os componentes do maciço rochoso.
- Uma base para subseqüentes análises numéricas de Elementos Discretos, avaliação geotécnica e projeto de engenharia de rochas.
- Uma estrutura para caracterização hidrogeológica, previsões de fluxo e uma base para projeto de mitigação, incluindo injeção.

Seja conceitualmente ou como componente de entrada para análise numérica, os MMRs permitem a apreciação da resposta real do maciço rochoso. Essa compreensão dos mecanismos de deformação dá suporte à seleção do método de escavação, geometria, sequenciamento, tratamento do terreno, controle de águas subterrâneas, previsão de *overbreak* e métodos de suporte, de modo que sejam adequados para o ambiente geológico.

A Importância da Escala

O conceito de escala é importante para reconhecer quando uma estrutura geológica (e propriedades associadas), conforme representada em um MMR, deve ser considerada explicitamente na engenharia de rochas.

Tradicionalmente na mecânica das rochas, entender a escala em termos do volume de rocha mobilizado (tensionado) pelo projeto de engenharia, comparado com o espaçamento e a posição da estrutura geológica de controle, ajudou a definir a resistência

apropriada da rocha a ser usada na análise (Hoek 1981, Wyllie & Mah 2004). Por exemplo, a estabilidade de um banco individual em um talude de corte pode ser controlada pela resistência ao cisalhamento de uma única junta persistente, enquanto em uma escala maior, como a estabilidade de taludes totais, as características 'globais' de resistência que abrangem todo o maciço rochoso em termos de materiais e descontinuidades podem ser aplicáveis. Uma apresentação mais recente desse conceito (**Figura 3.4-2**) esclarece a aplicação de resistências globais ao cisalhamento (como GSI) restrita a maciços rochosos homogêneos e sem anisotropia. A respeito disso, Hoek et al. (2013) afirmaram o seguinte: *“Uma suposição fundamental do critério de Hoek-Brown para a estimativa das propriedades mecânicas de maciços rochosos é que a deformação e a resistência máxima são controladas pelo deslizamento e rotação de blocos intactos de rocha definidos por sistemas de descontinuidade que se intersectam. Admite-se a existência de vários conjuntos de descontinuidades e que estejam suficientemente espaçados, em relação ao tamanho da estrutura em questão, para que o maciço rochoso possa ser considerado homogêneo e isotrópico”*.

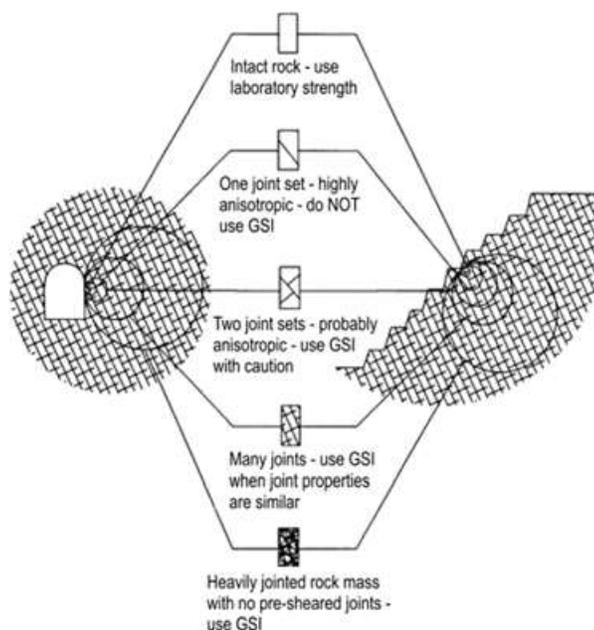


Figura 3.4-2: Limitações no uso do sistema GSI (Geological Strength Index) dependendo da escala (Hoek et al. 2013).

A transição de escala de rocha intacta para rocha fortemente diaclasada, conforme

representado na **Figura 3.4-2**, envolve um número maior de famílias de juntas e juntas individuais, de modo que eventualmente “o maciço rochoso pode ser considerado homogêneo e isotrópico” (isto é, em termos de modelagem numérica, 'contínuo', ou às vezes considerado como alcançando o Volume Elementar Representativo, Hudson, 1989). A experiência mostra que os maciços rochosos muitas vezes permanecem não homogêneos e anisotrópicos mesmo em grandes escalas, devido à influência de estruturas geológicas discretas de maior porte. Isso limita ainda mais a aplicação do GSI para estimar os parâmetros globais de resistência ao cisalhamento e enfatiza a importância de um MMR representativo para auxiliar no entendimento da mecânica da rocha.

Uma abordagem semelhante, que avalia a influência da ‘escala’ para projetos subterrâneos, foi proposta por Bandis et al. (2011). Este esquema relacionava o vão de uma abertura com o espaçamento da família de juntas principais, com o objetivo de identificar um método adequado de caracterização e análise (**Figura 3.4-3**). A **Figura 3.4-3** indica 'contínuos' (homogêneos e isotrópicos) como membros finais, que são raros na natureza.

Description of Rock Mass						
	Unlithified granular material	Tectonically disturbed $s < 0.05\text{m}$ $D/s > 500$	'Very closely' jointed $s = 0.05\text{-}0.1\text{m}$ $D/s = 100\text{-}500$	Bedded $s = 0.1\text{-}0.5\text{m}$ $D/s = 20\text{-}100$	'Widely' Jointed $s = 0.5\text{-}2.0\text{m}$ $D/s = 5\text{-}20$	Intact massive $s > 2\text{m}$ $D/s < 5$
Analysis	Continuum		Equivalent Continuum	Discontinuum		Continuum

Figura 3.4-3: Ampla distinção de tipos de maciços rochosos ilustrando a mudança na forma de análise na transição de rocha intacta em rocha diaclasada e, em seguida, rocha completamente tectonizada, para um túnel com vão livre de 10m (os esboços são altamente indicativos). Adaptado de Bandis et al. (2011).

Uma compreensão da escala mostra que a compartimentação estrutural tende a ser a

influência dominante na maioria das situações envolvendo engenharia de maciços rochosos. Os MMRs garantem o reconhecimento da compartimentação estrutural e sua representação adequada no processo de projeto.

Desenvolvimento de um Modelo de Maciço Rochoso

Os procedimentos para o desenvolvimento de MMRs variam de acordo com a escala do modelo, o ambiente geológico, o desafio de engenharia e a natureza dos dados disponíveis. Além disso, o número de modelos necessários para caracterizar o projeto dependerá das variações espaciais que devem ser analisadas e compreendidas por meio do processo de preparação do MGG. Neste contexto, a identificação de domínios geológicos, dentro dos quais as condições podem ser representadas por um único MMR, é um passo importante. As considerações para um MMR são apresentadas de forma geral na **Figura 3.4-**.

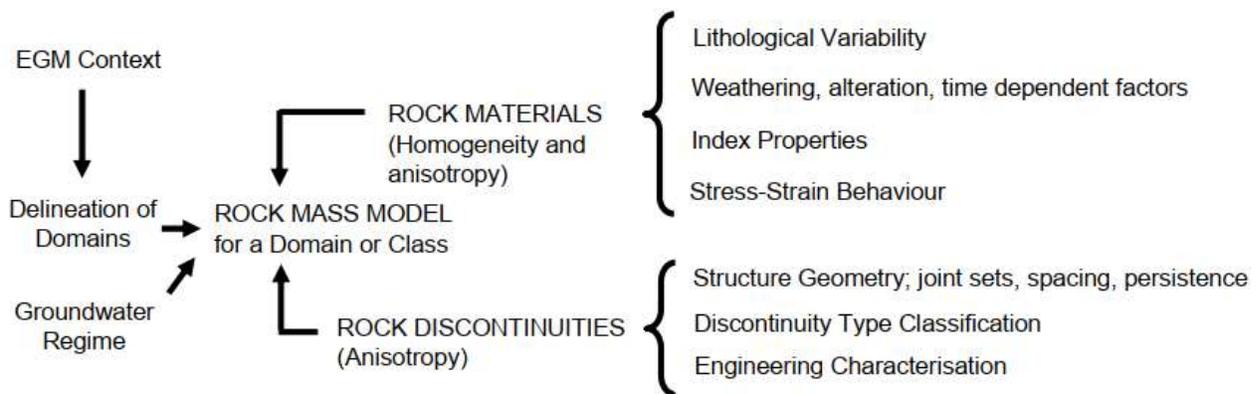


Figura 3.4-4: Principais componentes de um Modelo de Maciço Rochoso (MMR).

Um exemplo de desenvolvimento de modelo semi-determinístico relevante para um maciço rochoso sedimentar estratificado, com estrutura relacionada à estratificação altamente persistente, é o trabalho de estabilização executado para uma mina em Dudley (Reino Unido) (MacKean *et al*, 2015). Neste exemplo, o sequenciamento litoestratigráfico detalhado para as rochas silurianas forneceu uma estrutura inicial para o modelo (**Figura 3.4-5** à esquerda) e os detalhes foram obtidos por meio de perfilagem estrato a estrato no afloramento e no testemunho e correlacionados por meio de horizontes marcadores (**Figura 3.4-5** à direita).

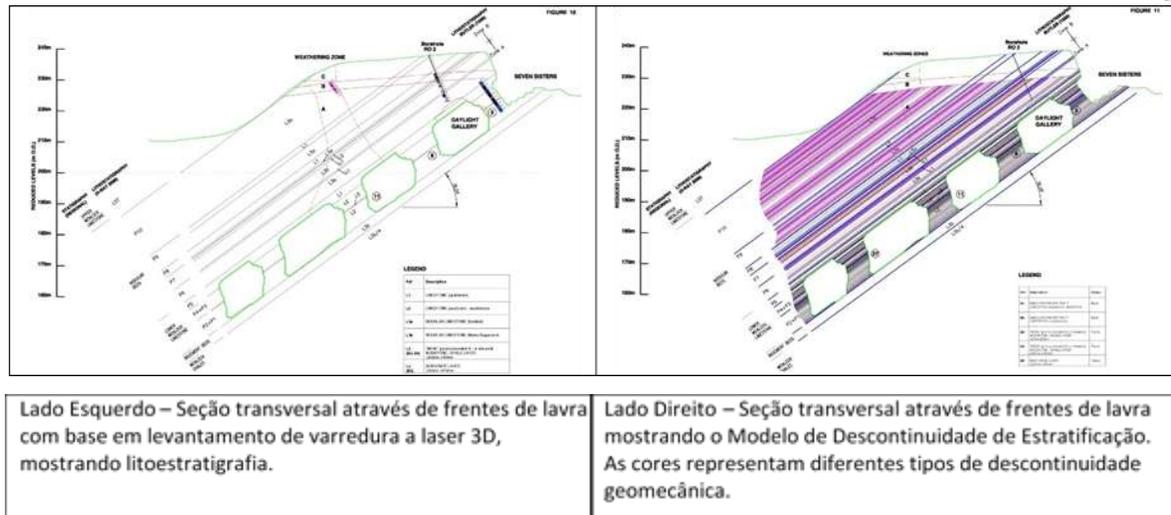


Figura 3.4-5: Desenvolvimento do Modelo de Maciço Rochoso de Wrens Nest (MacKean *et al*, 2015).

As camadas de rocha neste exemplo eram compostas por uma ampla gama de litologias de carbonatos e cada tipo foi caracterizado em termos de propriedades geotécnicas (incluindo propriedades-índice, comportamento tensão-deformação e como elas variaram com a influência do intemperismo), em linha com a prática geotécnica típica.

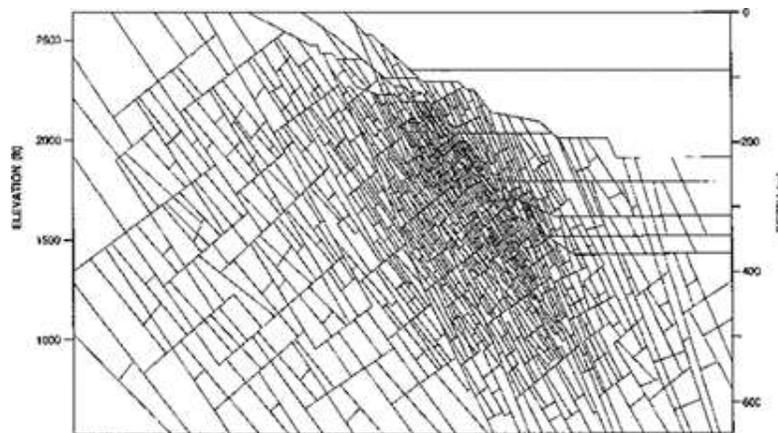


Figura 3.4-6: Modelo Digital de Elevação para um talude rochoso alto com detalhes do modelo concentrados em áreas de maior concentração de tensões (Sharp & MacKean 2000).

Pode haver exemplos em que as limitações de computação determinam, até certo ponto, o nível em que os detalhes do maciço rochoso podem ser incorporados. No exemplo de

taludes muito altos, as limitações de capacidade do computador exigiram um foco em uma escala maior, e uma estrutura mais espaçada. Uma maneira de contornar isso é fornecer mais detalhes nas áreas de interesse do modelo (**Figura 3.4-6**). No entanto, a capacidade computacional moderna permite modelos de taludes totalmente detalhados em escalas de pelo menos até 100m (

Figura 3.4-7).

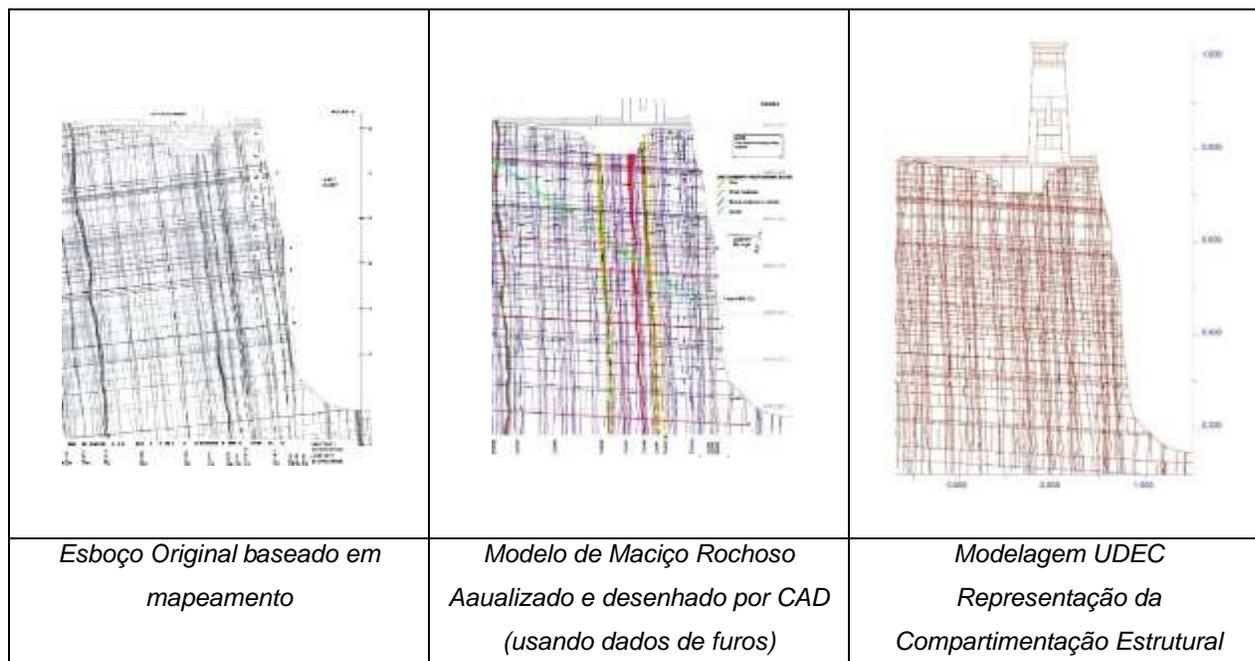


Figura 3.4-7: Ombreira Leste da Ponte Suspensa de Clifton – Talude Rochoso com 70m de altura aproximadamente. Disponibilizado por Robert MacKean com permissão dos curadores da CSB Trustees.

Tipos de Descontinuidades

As descontinuidades serão inicialmente definidas de acordo com a orientação e reunidas em famílias de juntas que tenham um intervalo característico de direção e mergulho.

Uma segunda etapa, e um componente principal de um MMR, é a classificação dos “tipos” de descontinuidades. “Tipos” podem ser específicos para uma família de juntas. No exemplo de Dudley, seis tipos de descontinuidades geomecânicas foram definidos e caracterizados e cada descontinuidade de estratificação foi atribuída a um “tipo”,

evidenciado pelas diferentes linhas coloridas na **Figura 3.4-5** (lado direito). Os tipos variaram de camadas de argila a fortes discontinuidades de estratificação calcário - calcário. Da mesma forma, no exemplo da Ponte Suspensa de Clifton (**Figura 3.4-7**, centro), quatro tipos de estrutura vertical foram registrados, com uma concentração de estruturas preenchidas com argila situadas abaixo e atrás da torre da ponte (detalhe mostrado em vermelho no diagrama central).

Um exemplo de classificação de tipos de discontinuidade para juntas sub-horizontais em granito tropicalmente alterado é mostrado na **Figura 3.4-8**. Quando a classificação de tipos foi aplicada a furos de sondagem, os tipos de discontinuidade definiram uma distribuição vertical, mas lateralmente variável, que levou ao reposicionamento de uma cavidade proposta, de modo a evitar intemperismo mais profundo (Chui *et al*, 2011), reduzindo assim o risco e o custo.

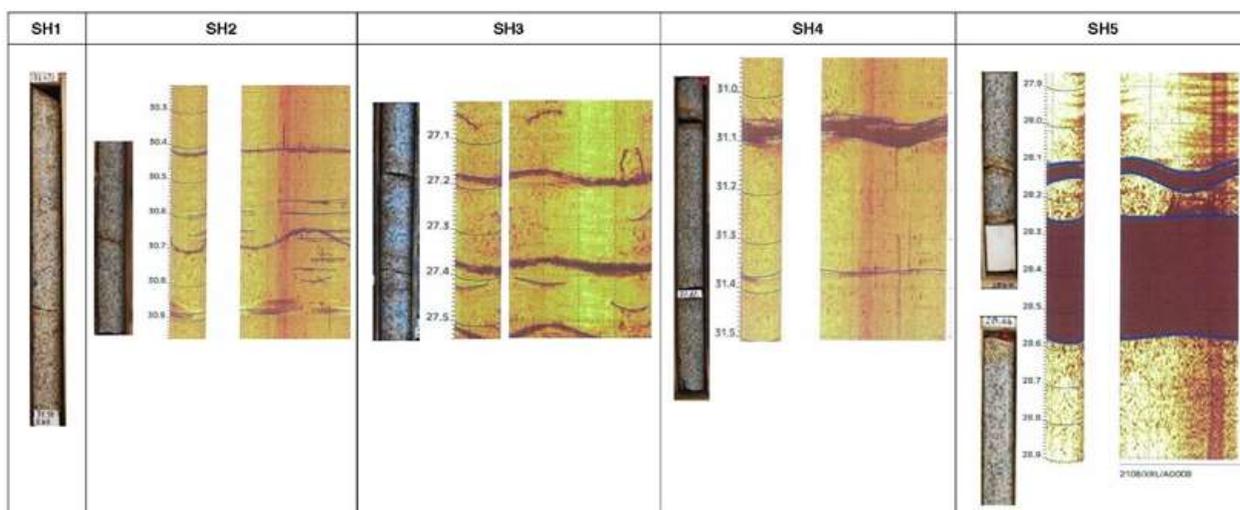


Figura 3.4-8: Ilustração da classificação do tipo de discontinuidade para granitos tropicalmente intemperizados. Classificação para juntas sub-horizontais usando fotografias de testemunhos e dados de perfilagem ótica (preparados por Robert MacKean).

Uma vez estabelecida a classificação, cada “tipo” pode ser caracterizado, com base em suas características físicas, como rugosidade, abertura, grau de alteração, preenchimento

e resistência da parede. Estes dados fornecem a base para a estimação do coeficiente de rugosidade da junta (JRC), resistência à compressão da junta (JCS) e ângulo de atrito residual, juntamente com efeitos de escala, todos índices usados no modelo Barton-Bandis (BB) para resistência ao cisalhamento e modelagem de rigidez (Barton & Choubey (1977), Bandis *et al* (1983) e Bandis (1990)).

Integração de um Modelo de Maciço Rochoso em um Modelo Numérico

Conforme descrito, as propriedades físicas dos tipos de discontinuidades podem ser usadas para definir relações tensão-deformação adequadas para uso nos modelos constitutivos em análises numéricas subsequentes. No exemplo do caso de Dudley, o modelo constitutivo 'BB' foi usado dentro do UDEC-BB. Isso permite a caracterização interativa da resistência de descontinuidade dependente de tensão e deformação sob condições de tensão efetiva, de modo que todas as implicações do histórico de tensões sejam simuladas. O estudo de caso de Dudley é mostrado na **Figura 3.4-9**, e um outro exemplo, de Dublin, é mostrado na

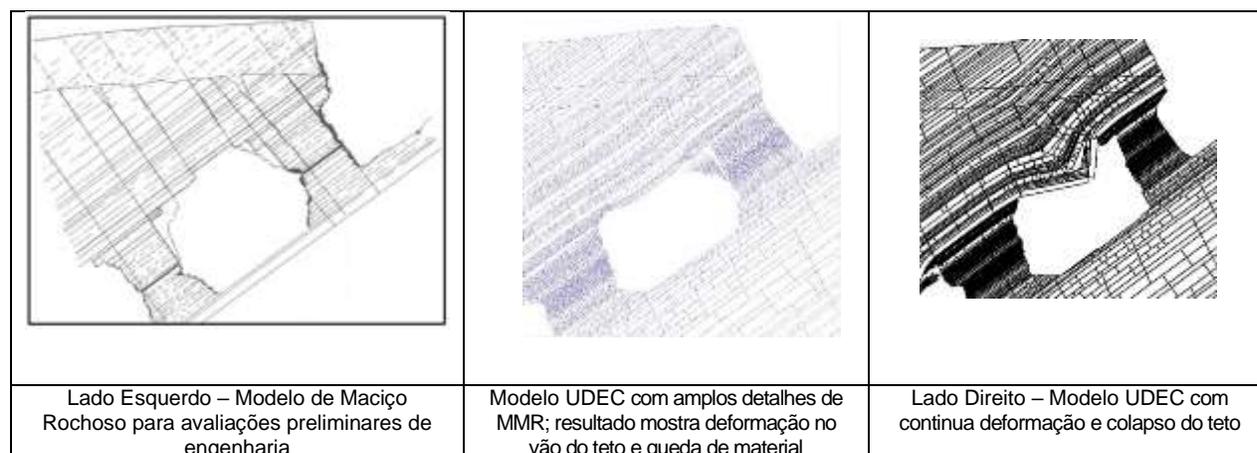


Figura 3.4-9: Avaliação da estabilidade da mina de Wrens Nest (MacKean *et al*, 2015).

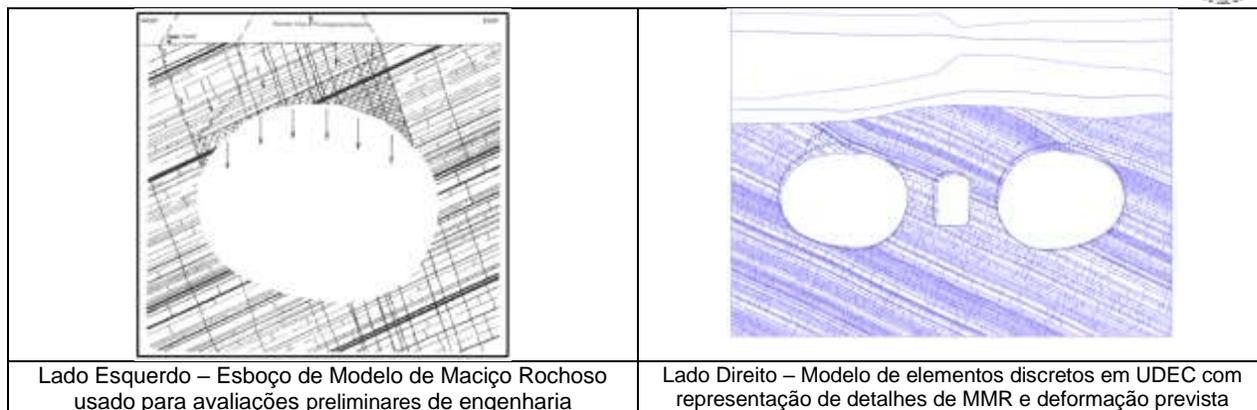


Figura 3.4-10: Modelo Digital de Elevação em UDEC para o projeto de cavidade de travessia do Túnel do Porto de Dublin (Geo-Design 2002).

Um exemplo de dados de saída do modelo DEM do estudo de caso de Clifton (**Figura 3.4-11**) é a distribuição de tensões abaixo da torre da ponte que parece estar concentrada em uma zona vertical estreita abaixo da torre (coloração amarela e vermelha) devido à distribuição de tipos de descontinuidades fracas e orientadas verticalmente.

Para um maciço rochoso descontínuo, a resistência e a deformabilidade do material rochoso são importantes. No entanto, o controle primordial da resposta e comportamento do maciço rochoso estão associados às descontinuidades e seus atributos de resistência e rigidez. A previsão da resposta geral para maciços rochosos descontínuos é, portanto, um processo complexo e iterativo, envolvendo matriz rochosa e descontinuidades, e varia significativamente com a localização, direção e estado de tensão. Essa complexidade tem consequências importantes para a confiabilidade da previsão e simulação via modelagem numérica, e para o entendimento da resposta do maciço rochoso ao redor de uma escavação, sendo, portanto, a fundamental importância de um MMR.

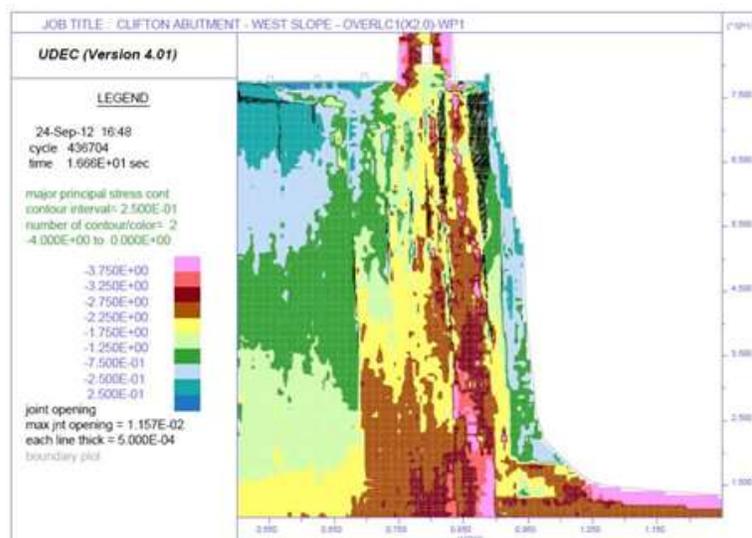


Figura 3.4-11: Modelo Digital de Elevação em UDEC gerado para a principal distribuição de tensões sob carregamento da Ponte Suspensa de Clifton (com permissão dos curadores da CSB).

O uso alternativo e comparativo de classificações de maciços rochosos para estimar parâmetros de entrada para análise implícita de projeto de 'contínuo' (via GSI, por exemplo), sem o contexto e justificativa de um MGG e MMR abrangentes, não deve ser a melhor prática aceitável para aplicações de engenharia civil em maciços rochosos descontínuos.

MGGs e MMRs devem ser considerados como uma base essencial para avaliação do estado de estabilidade e seleção de método analítico apropriado.

Referências

- Barton, N. & Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 12:1-54.*
- Barton, N., 2016. Cavern and tunnel collapses due to adverse structural geology. In: Proceedings of the 15th Colombian Geotechnical Congress and International Specialised Conference of Soft Rocks, Cartagena, Colombia – October 5 – 7 2016.*
- Bandis, S. C., A. C. Lumsden & Barton, N., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. International Journal of Rock Mechanics, Mineral Sciences and Geomechanics, 20, 249-268.*
- Bandis, S., 1990. Mechanical properties of rock joints. Keynote Paper, Proceedings of the*



International Conference on Rock Joints, Loen, Norway, 125-140.

Bandis, S. C., Sharp, J. C., MacKean, R. A. N. & Bacasis, E. A., 2011. Explicit characterisation and interactive analysis for engineering design of rock caverns. Proceedings of the HKIE & HKIP Conference on Planning and Development of Underground Space, Hong Kong..

Brown, E. T., 2008. Estimating the mechanical properties of rock masses. 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Potvin, Y., Carter, J., Dyskin, A. & Jeffrey, R. (eds).

Chiu, E. H. M., Lee, P. K. F. & MacKean, R. N., 2011. The design of rock caverns for University and Sai Ying Pun Stations, In: Proceedings of the HKIE & HKIP Conference on Planning and Development of Underground Space, Hong Kong.

Geo-Design. 2002. Detailed design of Cross Over Enlargement, No.3 Final Report.

Hencher, S. R., 2013 Characterizing discontinuities in naturally fractured outcrop analogues and rock core: the need to consider fracture development of geological time. In: Advances in the Study of Fractured Reservoirs, Geological Society of London, Special Publication 374, 113-123.

Doi.org/10.1144/SP374.15

Hoek, E., Carter, T. G. & Diederichs, M. S. 2013. Quantification of the geological Strength Index Chart. In: US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA June 23-26.

Hudson, J. A. 1989. Rock mechanics principles in engineering practice. London: CIRIA.

MacKean, R. A., Sharp, J. C., Bandis, S. C., Bacasis, E. A. & Morgan, R. 2015. Applied rock engineering for the investigation and restoration of mine workings, case example – Dudley Limestone Mines. In: Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and G Engineering, Edinburgh UK.

3.5 *MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS PARA ESTUDOS DE ENGENHARIA DE SOLOS*

Ian Shipway

O desenvolvimento de um MGG para áreas sustentadas por perfis de solo espesso apresenta um conjunto distinto de requisitos devido aos materiais do solo estarem potencialmente sujeitos a mudanças ou modificações em períodos de tempo relativamente curtos pela ação de uma variedade de processos em superfície. Os solos em um contexto de engenharia, ao contrário das rochas, são simplesmente considerados materiais que podem ser desagregados com agitação suave na água.

Portanto, eles estão sujeitos a mudanças de forma e características através de processos naturais em superfície (ações do vento, água, gelo, gravidade, intemperismo) e ações antropogênicas durante e após sua deposição inicial. Consequentemente, a interpretação do contexto geomorfológico é crítica nos estágios iniciais do desenvolvimento do MGG e geralmente fornece informações sobre os episódios mais recentes de deposição e variedade de processos em superfície ativos. Isso leva a uma ampla classificação dos solos superficiais como descrito abaixo:

- Solos transportados:
 - Pela água – solos fluviais (aluvionares), de estuário, de pântanos, marinhos
 - Por gravidade – solos coluvionares
 - Pelo vento – solos eólicos
 - Por atividade vulcânica – solos piroclásticos
 - Pelo gelo – solos glaciais ou periglaciais
 - Pela atividade humana – solos antropogênicos.
- Solos desenvolvidos in situ:
 - Por intemperismo químico
 - Por intemperismo físico
 - Por atividade hidrotermal
 - Por decomposição de materiais orgânicos (como turfa)



No entanto, as condições geomorfológicas atuais podem estar desprovidas de características específicas e não refletir a complexidade dos depósitos de solo mais profundos formados por processos deposicionais que variaram ao longo do Quaternário com mudanças dramáticas no clima e mudanças associadas no nível do mar. Em terrenos vulcânicos ativos, as oscilações na atividade vulcânica também podem resultar em condições complexas do solo. Pode haver camadas de solo eólico flanqueando depósitos aluvionares profundos, ou camadas de cinzas (solo piroclástico) envoltas por solos residuais oriundos de basalto. Nessas circunstâncias, muitas vezes é necessário contar com técnicas de investigação de subsuperfície para desenvolver o modelo conceitual e alimentar os resultados progressivamente de volta ao MGG (**Figura 3.5-1**).

Ensaio de penetração de cone e outros métodos que mostram um perfil contínuo de características específicas são ferramentas fundamentais para avaliar definições de camadas dentro da sequência do solo e a forma da base dos materiais de resistência que geralmente representam o início da deposição quaternária. A engenharia de solos geralmente requer uma gama de habilidades diferentes, por exemplo, conhecimento de geomorfologia, pedologia e perfilagem sedimentológica, em vez de perfilagem geotécnica. Muitos aspectos geológicos da estrutura cognitiva do MGG são frequentemente desenvolvidos através da aquisição de uma compreensão do comportamento geotécnico do solo. Por exemplo, a interpretação das idades relativas de estratificação dentro de um perfil de argila aluvionar mole é muitas vezes crítica na compreensão da compressibilidade das respectivas camadas. Embora as camadas de argila possam parecer semelhantes em cor e outras características físicas, pode haver diferenças nas propriedades medidas ou calculadas que permitem uma avaliação da idade geológica dos solos, como teor de umidade, limites de consistência, resistência ao cisalhamento, taxa de sobreadensamento etc.

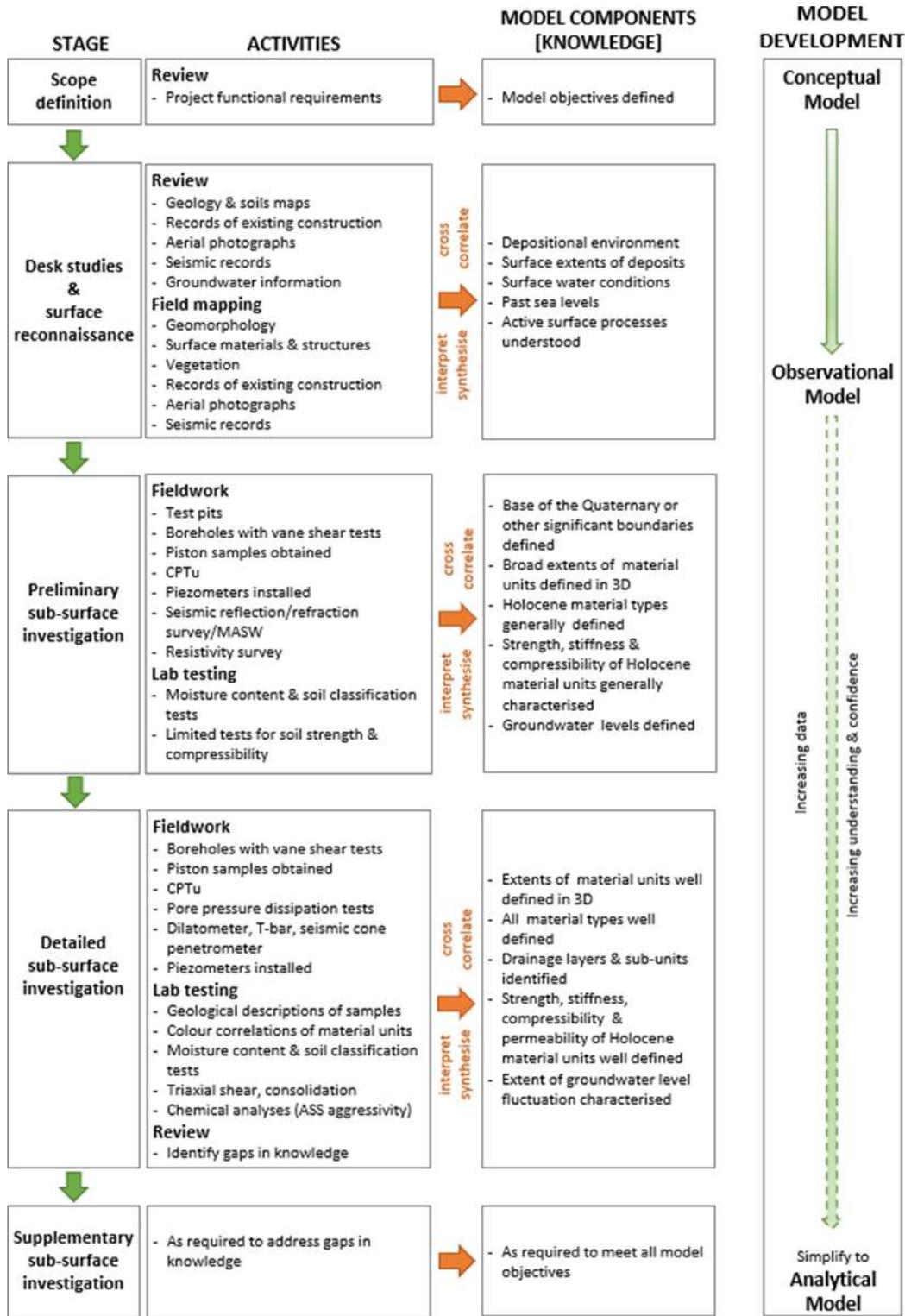


Figura 3.5-1: Desenvolvimento de um MGG para projetos em solos.

Esses valores podem ser inseridos no modelo para dar suporte a uma interpretação da

estratigrafia que, por sua vez, pode ser usada para identificar unidades geológico-geotécnicas por meio de um processo de zoneamento e identificar os limites de contorno dos materiais. A identificação de estruturas dentro do solo (fissuras, vazios e outros defeitos/descontinuidades) pode ser muito difícil e muitas vezes dependerá do exame cuidadoso de amostras de solo em profundidade. No entanto, uma vez identificado o tipo de estrutura, este pode ser um elemento chave para melhor compreender a origem do solo e, assim, definir a estratigrafia do modelo e as unidades geológico-geotécnicas.

A **Figura 3.5-2** mostra alguns dados de saída de um MGG preliminar para um grande edifício com vários níveis abaixo da superfície e que deveria ser construído na margem de um rio previamente preparada, apoiada em uma sequência quaternária de idade e composição variadas.

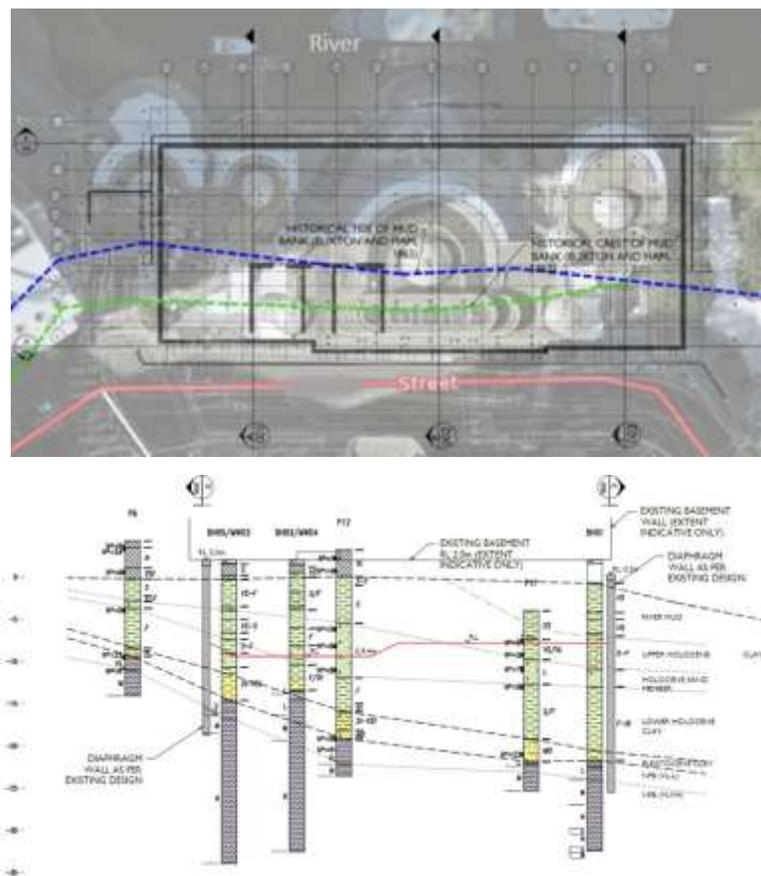


Figura 3.5-2: Planta e Seção Transversal extraídas de MGG para um edifício com subsolo em uma área ribeirinha. A linha vermelha indica o novo nível do subsolo.



O modelo completo compreendeu:

- Tabelas de dados.
- Plantas em várias escalas.
- Uma série de seções transversais como a mostrada na figura.
- Um modelo 3D básico mostrando relações amplas de unidades principais.

Como o local e as áreas vizinhas haviam sido trabalhados várias vezes anteriormente e estavam completamente cobertos por aterros ou estruturas em subsolo, observações geológicas de superfície não foram possíveis. Mapas históricos mostrando a crista e a base da antiga margem do rio foram os principais dados de entrada do modelo que foram usados em conjunto com os dados de resistência ao cisalhamento para obter a sequência de camadas do Holoceno representada na seção transversal do exemplo. Pistas sobre a extensão de algumas unidades foram obtidas através de dados simples de penetrômetro manual informados em logs de furos e que foram correlacionados de forma cruzada com ensaios de penetração de cone (não mostrados).

3.6 MGG PARA ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

Ann Williams

Relação entre o Modelo Geológico-Geotécnico e o Modelo Hidrogeológico

Um modelo hidrogeológico é uma representação de um sistema de fluxo de águas subterrâneas. Sua finalidade é promover uma compreensão (geralmente numérica) do fluxo, níveis e pressões das águas subterrâneas, bem como a recarga e a descarga do sistema. O processo de modelagem hidrogeológica pode ser resumido num fluxograma (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os principais componentes do processo de modelagem hidrogeológica são:

- Planejamento
- Conceituação
- Modelagem
- Relatórios Informativos

O MGG é um componente de entrada crítico para a conceituação do modelo hidrogeológico. O modelo hidrogeológico conceitual identifica as características que podem influenciar o comportamento das águas subterrâneas nas condições atuais e pós-ocorrência.

Conseqüentemente, o MGG deve fornecer uma representação da geologia (a partir da qual as propriedades hidráulicas dos solos e rochas representadas no modelo podem ser avaliadas ou investigadas), a topografia (que pode influenciar a direção do fluxo das águas subterrâneas e as interações água superficial/água subterrânea), identificar as ligações aos sistemas de águas superficiais (fontes de recarga ou descarga, como lagos, rios ou nascentes) e condições de contorno (por exemplo, estruturas geológicas, grandes rios ou litoral). Devem também ser determinadas as atividades humanas, como a captação de águas subterrâneas e/ou a recarga de águas pluviais.

Se o MGG for usado como componente de entrada para um modelo hidrogeológico, deve ser considerada a sua extensão de modo a abranger, pelo menos, os limites hidráulicos

prováveis e a estender-se suficientemente para além dos efeitos potenciais do problema hidrogeológico a ser modelado.

Os MGGs geralmente são desenvolvidos com muitos detalhes na área de interesse proposta e próximo a ela. Quando esses modelos precisarem ser usados para avaliações hidrogeológicas, o modelo hidrogeológico deve se estender a uma distância significativamente maior da área principal de interesse, para evitar a influência das condições de contorno. Se os MGGs forem desenvolvidos de forma a poderem ser facilmente expandidos ou, tendo em mente a expansão, no que diz respeito ao modelo de software e à compreensão da geologia em maior escala, eles serão mais úteis para efeitos de modelamento hidrogeológico.

O hidrogeólogo pode modificar o MGG no desenvolvimento do modelo hidrogeológico conceitual para equilibrar a complexidade das informações disponíveis com a capacidade de modelar pragmaticamente um problema que atinja os objetivos do projeto. Por exemplo, diferentes unidades geológicas podem ser combinadas no modelo hidrogeológico se apresentarem propriedades hidráulicas semelhantes. Os objetivos e resultados do modelo seriam estabelecidos na fase anterior de planejamento.

O modelo hidrogeológico é usado para avaliar os efeitos de uma mudança no ambiente existente nos níveis das águas subterrâneas, volumes e direções de fluxo e pressões da água. Uma alteração do ambiente existente pode ser 'natural', por exemplo, subida do nível do mar, o aumento da precipitação ou seca, ou pode ser introduzida, por exemplo, uma escavação, rebaixamento, construção subterrânea, carregamento de solos compressíveis ou poços de captação. Tais mudanças podem resultar na elevação ou redução do nível do lençol freático, o que pode causar inundações, recalques por adensamento ou intrusões salinas. Pode impactar as vazões de poços e/ou resultar em mudanças nas direções do fluxo das águas subterrâneas. A alteração da direção do fluxo pode espalhar contaminantes já presentes no solo.

Planejamento

O objetivo da fase de planejamento é alinhar o entendimento sobre como o MGG será usado e quais resultados se pretende obter do modelo hidrogeológico, bem como, o que pode ser alcançado com os recursos e dados disponíveis. Isto incluirá a compreensão do nível de confiança necessário nos dados de saída do modelamento (por exemplo, um modelo com um nível de confiança mais baixo pode ser apropriado nas fases iniciais de um projeto ou para direcionar os esforços das próximas etapas de investigação visando atingir os objetivos do projeto) e o nível de confiança nos dados de entrada disponíveis (por exemplo, os dados do nível do lençol freático registrados em um piezômetro durante um período de tempo serão mais confiáveis do que aqueles obtidos a partir de uma leitura única durante a perfuração). De uma perspectiva hidrogeológica, a confiança dos dados de saída inclui a capacidade de calibrar o modelo para dados históricos de águas superficiais e subterrâneas.

É útil informar as limitações ou exclusões à medida que o modelo é preparado para evitar perder de vista o objetivo para o qual ele está sendo desenvolvido.

Conceituação

O modelo hidrogeológico conceitual deve identificar e descrever os processos que controlam ou influenciam o movimento e armazenamento das águas subterrâneas. A área do modelo conceitual deve ser suficientemente grande para abranger todas as potenciais influências no sistema de águas subterrâneas, bem como a extensão destes efeitos que podem resultar do projeto a ser considerado. Deverá também ser grande o suficiente para capturar todos os processos de fluxo de águas subterrâneas que controlam seu comportamento na área de estudo.

O modelo conceitual pode ser apresentado como uma série de diagramas 2D e 3D apoiados por uma descrição das principais unidades hidrogeológicas, da recarga por precipitação, fluxo e descarga de águas subterrâneas (incluindo um balanço hídrico básico) e da forma como estes processos podem ser influenciados por variações sazonais e pelo projeto. O modelo hidrogeológico conceitual deve procurar explicar o



comportamento observado das águas subterrâneas na área do modelo. Os relatórios devem incluir alguma semi-quantificação básica para que seja possível, por exemplo, avaliar se é razoável que o modelo indique que 90% da vazão afluyente venha da chuva, e o restante, de fluxo entre aquíferos, etc.

Em resumo, o modelo conceitual das águas subterrâneas:

- É uma combinação do MGG e das influências hidráulicas – que estabelece o contexto para a avaliação dos efeitos no sistema de águas subterrâneas;
- Identifica as principais unidades hidrogeológicas e propriedades relativas;
- Identifica os principais limites, fontes e sumidouros;
- Identifica as interações inferidas entre unidades e entre águas subterrâneas e superficiais.

Dependendo do projeto, os seguintes aspectos poderão ter de ser considerados no MGG:

Captação

- Identificar os prováveis limites de captação de água subterrânea;
- Fontes de recarga e descarga em escala regional;
- Avaliar os registros de precipitação para determinar a variação sazonal e anual típica;
- Direções do fluxo de águas subterrâneas em escala regional.

Unidades hidrogeológicas e suas propriedades

- Definidas de acordo com o seu provável comportamento hidrogeológico;
- Parâmetros hidrogeológicos, valores aceitos e intervalos (diferenciar dos valores usados na calibração e verificação do modelo).

Níveis de águas subterrâneas

- Traçar a distribuição dos dados do nível das águas subterrâneas;
- Os níveis das águas subterrâneas variam (tanto em nível absoluto como em amplitude sazonal) nas diferentes unidades?
- Identificar a direção e os gradientes do fluxo das águas subterrâneas e se estes

variam temporalmente.

Recarga e descarga de águas subterrâneas

- Recarga pluviométrica (quanto, como foi quantificada? Variações espaciais e temporais devido ao uso do solo, cobertura do solo e clima);
- Interações com corpos hídricos em superfície e com o litoral;
- Fluxo entre aquíferos (ou seja, troca com outros aquíferos, por exemplo, fluxo ascendente ou descendente).

Qualidade das águas subterrâneas

- Existem problemas conhecidos de qualidade da água (por exemplo, áreas de contaminação introduzida ou níveis naturalmente elevados de um contaminante que podem ser relevantes para o projeto?)
- Existe o risco de intrusão salina?

Uso de águas subterrâneas

- Captações existentes de águas subterrâneas ou superficiais que possam influenciar o modelo de base ou serem afetadas pelo projeto;
- Sistemas de captação e recarga (água doce, água reciclada [de sistemas de aquecimento e arrefecimento] e águas pluviais ou residuais).

Modelagem hidrogeológica

Os modelos hidrogeológicos requerem uma compreensão do passado para simular a situação atual e permitir a avaliação de cenários futuros. São fornecidas orientações sobre o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos em documentos como Harbaugh et al. (2000), Reilly & Harbaugh (2004) e Barnett et al. (2012). Uma visão geral é fornecida aqui apenas para dar ao desenvolvedor do MGG uma compreensão das necessidades do hidrogeólogo.

Entradas de dados

As entradas de dados típicas incluem:



- Investigações do terreno utilizadas no desenvolvimento do MGG (dados geológicos, dados do nível do lençol freático em cada unidade, resultados do teste de permeabilidade *in situ* [ensaios de perda d'água, slug tests], testes de bombeamento e resultados de rebaixamento em escavação experimental, etc.);
- Uma análise da literatura publicada e não publicada para tabular as propriedades hidrogeológicas obtidas a partir de testes e modelagem de materiais geológicos semelhantes ou iguais na região;
- Plotagem dos dados do nível das águas subterrâneas obtidos de outros locais de monitoramento em escala regional (unidades geológicas avaliadas, variação sazonal, correlação com a precipitação, natureza do aquífero [livre, confinado, artesiano, lençol freático, etc.]);
- Dados topográficos, que podem ser usados para desenvolver um gráfico de superfície do solo em 3D em aplicativos como o SURFER, desde que nenhum modelo 3D tenha sido gerado;
- Imagens da superfície do solo (Google Earth/filmagens de drones/fotografias aéreas) para facilitar a localização do modelador e reconhecer a importância dos efeitos potenciais (por exemplo, a extensão do rebaixamento em córregos ou na costa, ou sob estruturas); isso também auxilia na identificação da extensão de terrenos urbanizados e não urbanizados para permitir a seleção de domínios de recarga apropriados;
- Dados históricos de precipitação a partir dos quais um nível apropriado de recarga pluviométrica pode ser selecionado;
- Investigações de águas superficiais usadas na avaliação (nível de rios e dados de medição de vazão para identificar onde os cursos d'água ganham ou perdem água) para apoiar a calibração do modelo.

Configuração do modelo

Várias decisões precisam ser tomadas sobre como representar melhor o modelo conceitual em um ambiente de modelagem em computador. Uma das primeiras considerações é determinar se o problema pode ser adequadamente modelado em 2D, ou se há dados suficientes e os resultados procurados necessitam de um modelo 3D. Na



prática, vários modelos podem ser desenvolvidos para responder a um problema. Estes podem incluir um modelo de água superficial, um modelo de infiltração 2D (por exemplo, para examinar, em detalhe, mudanças no fluxo em torno de uma estrutura), um modelo de fluxo regional 3D para considerar o fluxo geral e o comportamento do aquífero, e modelos de 'corte' 3D para examinar um determinado problema 3D dentro do contexto do modelo mais amplo. No entanto, recomenda-se que seja aplicada a abordagem mais simples de modelagem que alcance os resultados acordados na etapa de planejamento. A simplicidade ajuda na convergência e calibração do modelo, enquanto limita o tempo para executar cada cenário e, portanto, o custo.

Há uma série de softwares disponíveis comercialmente para modelagem de águas subterrâneas e estes são apresentados na Tabela 4-1 de Barnett et al. (2012) juntamente com conselhos sobre a seleção de um pacote de software apropriado.

Uma vez tomada a decisão sobre o software e número, natureza e finalidade dos modelos que serão construídos, o seguinte deve ser considerado:

- Escala. O modelo deve ser delimitado por limites bem conhecidos (por exemplo, rios, litoral) ou ser de extensão suficiente para que as suposições de limite não influenciem os resultados do modelo;
- Avaliação de como o modelo pode ser melhor dividido em um grid de nós de cálculo; camadas geológicas finas e grandes mudanças nos valores dos parâmetros em distâncias curtas podem significar que o modelo não 'converge' e não será executado;
- Prazos a serem usados na modelagem;
- Consideração de como a geologia foi definida e como as características das águas superficiais são incorporadas. É mais simples se essas informações puderem ser levadas para o modelo hidrogeológico diretamente do MGG;
- Calibração (quantitativa e qualitativa); um modelo que é 'calibrado' deve tentar resolver muitos problemas hidrogeológicos. Primeiro, uma calibração qualitativa é realizada para verificar se os principais aspectos do modelo conceitual são respeitados (por exemplo, verificar se a direção do fluxo e a descarga



correspondem às observações). Em seguida, uma calibração quantitativa é realizada modificando os dados de entrada do modelo para que este corresponda mais de perto às cargas e fluxos ou concentrações observadas para modelagem de qualidade/pluma. O ajuste de parâmetros pode ser feito manualmente ou automaticamente usando técnicas estatísticas de regressão não linear, com o modelo sendo executado muitas vezes em uma maneira de 'tentativa e erro' até que uma calibração satisfatória seja alcançada. O esforço aplicado para alcançar uma 'boa' calibração depende do uso pretendido do modelo. Determinar se a calibração é suficiente para o uso pretendido do modelo é importante para avaliar se foi construído adequadamente. Um valor numérico que indique a proximidade do ajuste entre os bancos de dados modelados e observados é frequentemente usado (por exemplo, a raiz quadrada do erro médio $< 10\%$ é frequentemente considerado como um ajuste satisfatório);

- Sensibilidade do modelo a variações nos valores dos parâmetros (normalmente), mas também tamanho do *grid*, condições de contorno e critérios de calibração. A análise de sensibilidade é a avaliação dos parâmetros de entrada do modelo para ver o quanto eles afetam os dados de saída, que são cargas e fluxos ou concentrações. O efeito relativo dos parâmetros dá uma maior compreensão do sistema simulado e das limitações do modelo para auxiliar na tomada de decisão e pode ser usado para dimensionar qualquer trabalho futuro. Além disso, os parâmetros mais sensíveis serão os mais importantes a serem monitorados de perto durante o projeto;
- É necessário considerar a possibilidade de enviesamento dos ensaios, ou seja, se o seu modelo for sensível ao 'k' horizontal de uma rocha fraturada, mas toda a sua amostragem for de rocha não fraturada, então a correspondência dos valores observados poderá não fornecer um limite superior. Por outro lado, se todos os seus valores observados forem tendenciosos para zonas de fratura isoladas, os dados poderão ter sido superestimados;
- A forma como o projeto ou alteração do ambiente é simulada, por exemplo, introdução de uma parede de estacas prancha, um poço ou um túnel, é



introduzido progressivamente ou “implantada” em um único intervalo de tempo ou diversos intervalos? Esta obra é considerada como um limitador de fluxo? Como são considerados os vazamentos, etc? O rebaixamento é feito por bombeamento de um reservatório, por único poço ou a partir de várias ponteiros filtrantes?

- Como as condições de contorno podem ser usadas para representar as interações entre as características das águas subterrâneas e das águas superficiais adjacentes. Além disso, deve-se considerar como as condições climáticas (precipitação e evaporação) e captação ou recarga de água subterrânea serão incluídas no modelo e como serão definidas as variações nas propriedades hidrogeológicas do sistema.
- Como contabilizar as condições que não podem ser quantificadas (por exemplo, um número muito grande de pequenos poços privados para os quais a vazão não está disponível, mas cumulativamente pode ser significativa para o balanço hídrico) ou não podem ser incluídas no modelo de fluxo de águas subterrâneas (por exemplo, rede de drenagem/fluxo de água superficial/escoamento de águas pluviais, etc.)

Cenários de modelagem

Modelos hidrogeológicos são frequentemente desenvolvidos para avaliar os efeitos de uma mudança no ambiente existente (por exemplo, alterações climáticas, introdução de novos poços para captação de água subterrânea, rebaixamento para escavação de subsolo, descarga de águas residuais no solo, construção de um túnel, etc.). Isso significa que o modelo de base precisa ser modelado e executado no mesmo local no qual será analisado o modelo da mudança a ser implementada.

Se um modelo for executado em estado estacionário (equilíbrio), os resultados do modelo indicarão a condição final das águas subterrâneas quando todas as mudanças no sistema já tiverem se estabilizado. É provável que esta seja uma condição média que não leva em conta a variação sazonal, mudanças temporais na vazão, etc.



Alternativamente, o modelo pode ser executado em intervalos de tempo (os cálculos são feitos em uma sequência de intervalos de tempo), de modo que a mudança progressiva nas condições futuras das águas subterrâneas e/ou variações temporais de longo prazo possam ser investigadas.

Os cenários de modelagem normalmente levam em consideração:

- Potenciais impactos nos níveis das águas subterrâneas, fluxo e direções do fluxo.
- Influência das águas subterrâneas nas escavações;
- Mudanças no volume e direção do fluxo dentro e ao redor de estruturas subterrâneas;
- Mudanças na taxa de descarga de águas subterrâneas em córregos e corpos d'água ou mudanças nas interações entre águas subterrâneas e águas superficiais;
- Potenciais mudanças nas direções de fluxo, caminhos ou gradientes para alterar caminhos preferenciais de fluxo de contaminantes, incluindo intrusão salina;
- Extensão do rebaixamento do lençol freático e potencial para ocorrência de recalque por adensamento;
- Potencial inundação como resultado do impedimento do fluxo das águas subterrâneas;
- Potencial para usuários de poços existentes serem afetados adversamente;
- Mudança no balanço hídrico do aquífero e implicações para campos de poços, tolerância ambiental e/ou sustentabilidade a longo prazo;
- Limitações do modelo (incerteza). Como não podemos construir um único modelo 'verdadeiro', os resultados simulados são sempre incertos.

Relatórios Informativos

Todo o processo de modelagem deve ser documentado em um relatório, incluindo a conceituação e configuração do modelo, calibração e análise de sensibilidade, simulações preditivas modeladas e análise de incerteza. Reilly & Harbaugh (2004) recomendaram que pelo menos os seguintes tópicos fossem descritos:

- Os objetivos do modelo hidrogeológico;
- O MGG e o sistema hidrogeológico sob investigação, incluindo todas as fontes de



dados consideradas e como foram avaliadas e obtidas;

- Os métodos matemáticos utilizados e sua adequação ao problema a ser resolvido;
- As condições de contorno usadas nas simulações do modelo;
- A rede discretizada usada (se for o caso) e a justificativa para sua seleção;
- As propriedades do aquífero modeladas;
- Para modelos de estado estacionário, todos os dados de entrada para o modelo de base, incluindo recarga por infiltração, mudanças de estágio fluvial, contribuição de outros aquíferos e descargas via nascentes, evapotranspiração de águas subterrâneas, etc;
- Para modelos transitórios, as condições iniciais usadas nas simulações;
- Critérios de calibração, procedimento e resultados;
- As limitações da representação do modelo do sistema real e o provável impacto que podem ter nos resultados e conclusões apresentados.

Como orientação, sugere-se que o nível de documentação relatado seja suficiente para que outro modelador possa configurar e executar suas próprias simulações do modelo.

Monitoramento

Como o modelo hidrogeológico não é uma solução única e fornece apenas uma indicação razoável dos efeitos de um projeto no meio ambiente, recomenda-se que os relatórios identifiquem um nível adequado de monitoramento que possa ser instalado para verificar se os efeitos reais são semelhantes aos previstos, ou para permitir que mitigações sejam implementadas, se não o tiverem sido. O monitoramento pode incluir:

- Piezômetros: especificar o tipo, localizações, unidades testadas ou nas quais a ponta esteja instalada, frequência de registro (registro do NA e/ou pressões) e método de coleta (medição manual *versus* perfilagem e telemetria automatizadas).
- Nível de água superficial e medidores de vazão para verificar os efeitos em córregos ou outros corpos d'água.
- Principais determinantes da qualidade da água para avaliar se as mudanças impostas resultam na alteração da química das águas subterrâneas.
- Marcas(placas) de recalque: onde, em que solo ou estruturas.



Mitigação

Se os efeitos nas águas subterrâneas forem maiores do que o previsto e potencialmente problemáticos, pode ser desejável iniciar medidas de mitigação. É melhor considerá-las e acordá-las antes que surja a necessidade de sua implementação, pois as mudanças podem continuar mesmo após o término de uma atividade. Medidas típicas de mitigação podem incluir:

- Monitorar e responder.
- Gestão da construção (por exemplo, redução do comprimento e/ou duração de uma escavação a céu aberto).
- Estratégias de projeto (por exemplo, aumentar a profundidade das estacas prancha para aumentar a vedação de águas subterrâneas e reduzir os efeitos do rebaixamento).
- Mitigação ativa (por exemplo, estacas prancha temporárias, recarga, etc.).

THE MODELING PROCESS

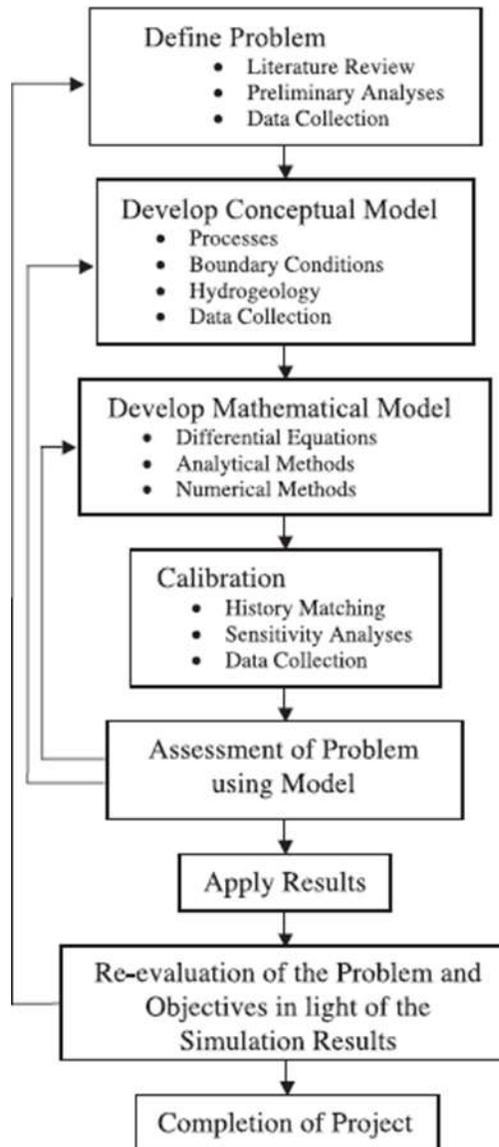


Figura 3.6-1: Protocolo padrão de modelagem de águas subterrâneas segundo Reilly (2001)

Crédito: U.S. Geological Survey

Referências

Anderson, M. P., Woessner, W. W. & Hunt, R. J. (Eds) 2015. *Applied groundwater modeling (Second Edition)*, Academic Press.

Barnett, B., Townley, L. R., Post, V., Evans, R. E., Hunt, R. J., Peeters, L., Richardson, S., Werner, A. D., Knapton, A. & Boronkay, A., 2012. *Australian groundwater modelling guidelines. Waterlines Report No. 82, National Water Commission, Canberra.*



Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. & McDonald, M. G. 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model. User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121p.

Hill, M. C. 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4005, 90p.

Reilly, T. E. 2001. System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B8, 26p.

Reilly, T. E. & Harbaugh, A. W. 2004. Guidelines for evaluating groundwater flow models. USGS Scientific Investigations Report 2004-5038, 30p.

3.7 MGG PARA ESTUDOS DE ESCORREGAMENTOS

Steve Parry

O principal objetivo de um MGG para avaliação de risco de deslizamento é entender os controles geológicos e geomorfológicos sobre a instabilidade e como eles podem impactar o projeto. Em particular, o MGG deve identificar os potenciais tipos de escorregamento, ou seja, não apenas o que ocorreu, mas os que podem ocorrer, bem como suas prováveis magnitudes e frequências. Dependendo dos tipos de escorregamentos, o MGG precisará considerar uma variedade de fatores, desde influência das descontinuidades na determinação do tamanho do bloco para queda de blocos até potenciais taxas de transporte por fluxos de detritos.

O estágio inicial de qualquer estudo deve ser o desenvolvimento de um modelo conceitual focado no risco. Este Modelo Conceitual de Risco (MCR) provavelmente será uma combinação dos dados observacionais limitados com uma estrutura cognitiva conceitual. Dependendo do tipo e magnitude dos deslizamentos anteriores, as evidências de campo podem não ser facilmente observadas. Conseqüentemente, o componente conceitual, baseado no conhecimento e experiência em deslizamentos em terrenos similares, é crítico para garantir que todos os riscos potenciais sejam avaliados.

O objetivo do MCR é avaliar (Lee & Jones 2014):

- O que poderia acontecer – quais são os possíveis tipos de deslizamento?
- Onde poderia acontecer – a suscetibilidade para cada tipo de deslizamento.
- Por que tais eventos podem ocorrer – prováveis gatilhos.
- Quando tais eventos podem ocorrer – frequência de ocorrência e probabilidade de propagação.
- Qual será o impacto de tais eventos – as possíveis conseqüências do deslizamento.

As visualizações do MCR permitem a explicação para não especialistas de processos complexos, muitas vezes interativos. (**Figura 3.7-1**).

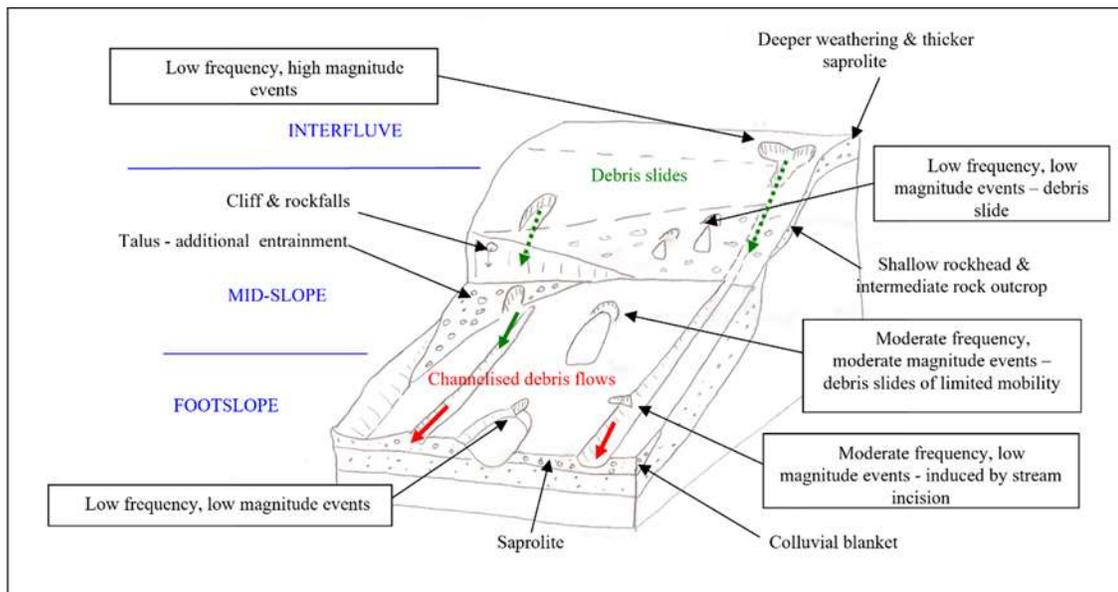


Figura 3.7-1: Exemplo de visualização de um MCR para fins informativos (de Parry & Ng 2010)

O MCR inicial deve ser reavaliado após o mapeamento geológico geotécnico/geomorfológico inicial a partir de dados de sensoriamento remoto. Sendo mapeamento de natureza observacional, ele fornece uma visão fundamental do cenário geomorfológico. Paralelamente ao mapeamento, é desenvolvido um inventário inicial de deslizamentos. O mapeamento e o inventário fornecem uma malha de retroalimentação usada na avaliação do MCR. O MCR fornece alvos para um mapeamento detalhado de campo subsequente e apoia o desenvolvimento inicial de registros de incerteza e risco para o projeto, que devem ser atualizados ao longo das várias etapas do estudo (**Figura 3.7-2**).

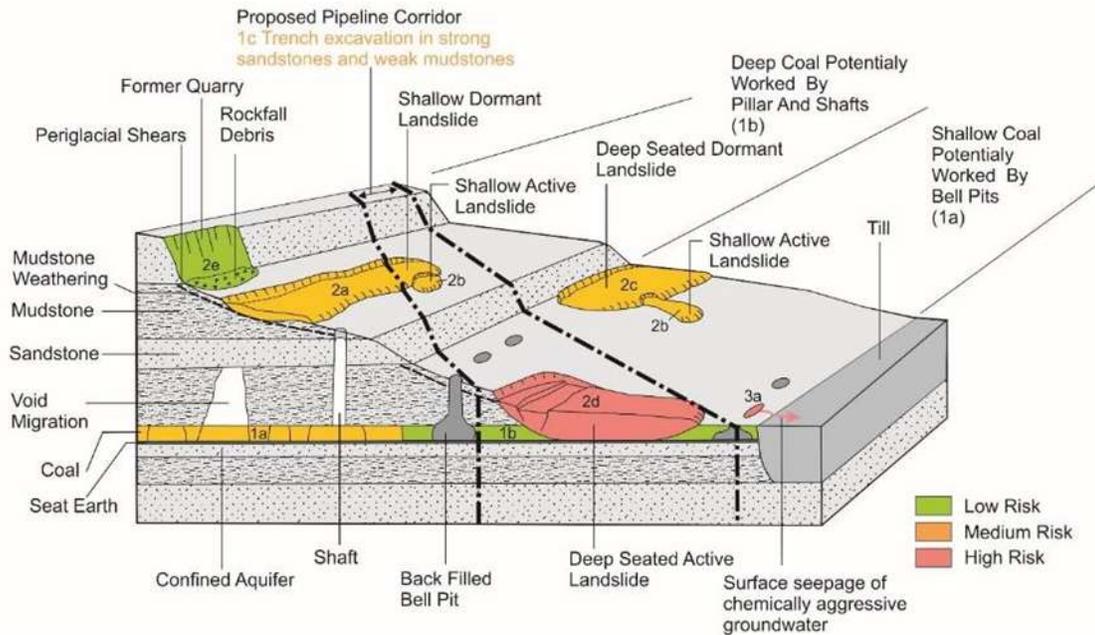


Figura 3.7-2: Exemplo da visualização de possível risco no terreno, incluindo deslizamentos, desenvolvido a partir de um modelo conceitual (Baynes et al. 2021).

Dada a natureza, a escala e as localizações muitas vezes remotas de tais estudos, as investigações do terreno são muitas vezes limitadas e deve haver uma ênfase considerável no mapeamento de campo geológico-geotécnico e geomorfológico detalhado (**Figura 3.7-3**).

O mapeamento de campo só deve ser realizado uma vez que o estudo documental, incluindo o mapeamento baseado em sensoriamento remoto, tenha sido concluído e um MCR esteja desenvolvido. A finalidade do mapeamento de campo é avaliar e testar o MGG, principalmente para:

- avaliar as observações e validar a interpretação do sensoriamento remoto, em especial, o inventário de deslizamentos;
- aumentar as evidências existentes com relação aos processos geomorfológicos que controlam a área, magnitude e frequência dos deslizamentos;
- avaliar e revisar o MCR e gerar uma série de modelos observacionais, incluindo descrições de materiais e avaliação de processos geomorfológicos; e para finalizar qualquer projeto de investigação do terreno.



A investigação do terreno pode ser necessária para complementar o mapeamento de campo. No entanto, o custo pode ser alto, principalmente em locais remotos. Consequentemente, cada ponto de investigação deve ser cuidadosamente selecionado com base no modelo geológico-geotécnico para maximizar as informações a serem fornecidas. O MGG permite também a avaliação antecipada de possíveis soluções de remediação e, quando aplicável, a investigação de campo deve coletar dados para apoiar o projeto dessas soluções.

Dadas as variações espaciais e muitas vezes sutis em depósitos superficiais, trincheiras e escavações experimentais são de grande valia. No entanto, se os pontos de investigação forem descritos apenas de acordo com os padrões nacionais, as variações de textura podem não ser registradas, assim como as litofácies e ambientes de deposição de depósitos superficiais. Isso torna qualquer interpretação subsequente problemática, como por exemplo, distinguir depósitos de corrida de massa de depósitos de inundação. Consequentemente, devem ser usadas abordagens alternativas, como registros sedimentológicos em vez de geotécnicos; por exemplo, dentro dos leques de detritos, os registros pedológicos fornecem descrições mais apropriadas (Sewell et al. 2015).

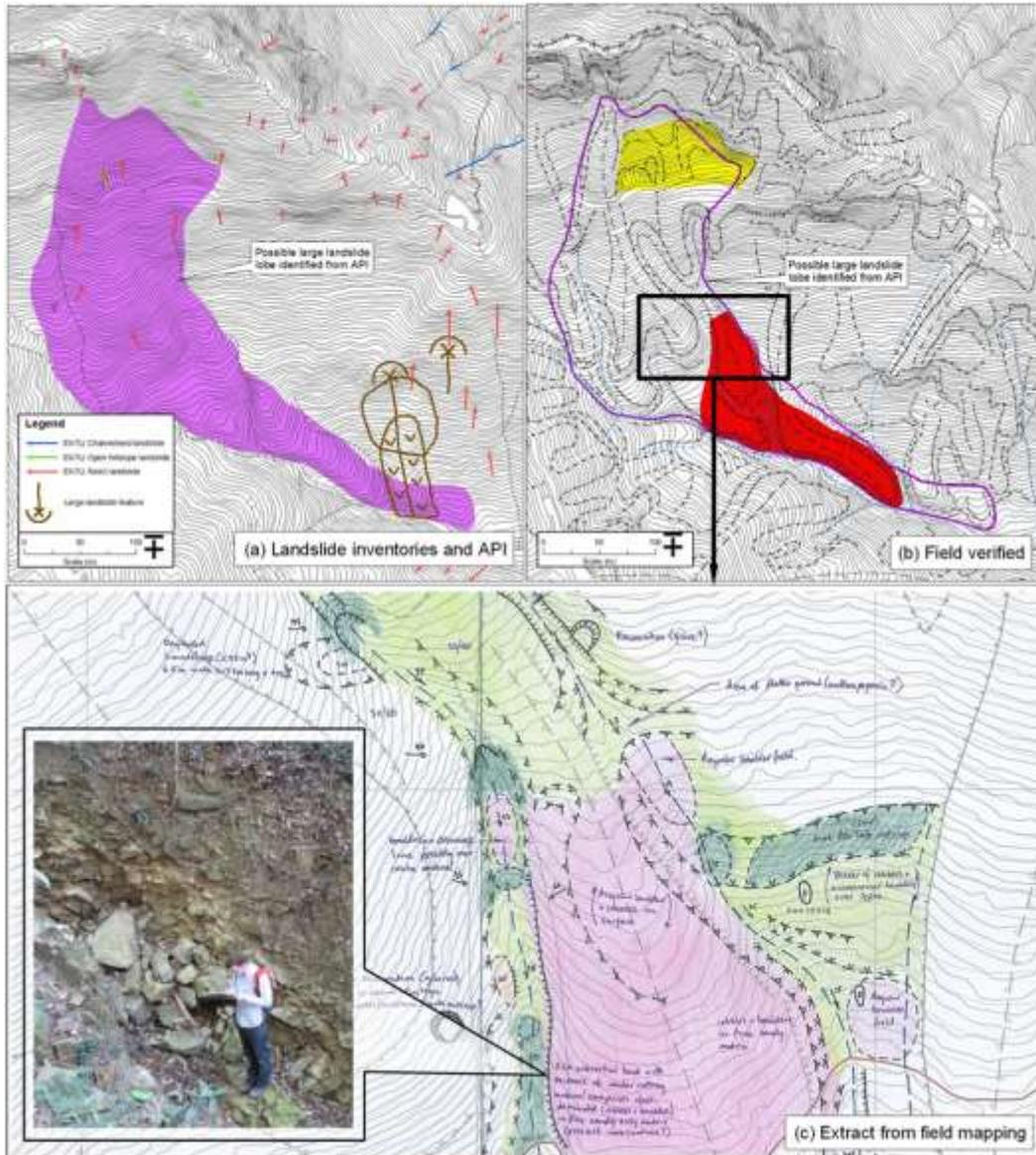


Figura 3.7-3: Mapeamento em Hong Kong, (a) Escorregamentos e um possível grande e degradado delta deposicional de corrida de detritos, identificado a partir da interpretação de fotografia aérea. (b) & (c) O mapeamento de campo indicou que o delta é derivado de múltiplos eventos. Por exemplo, a feição identificada em vermelho consiste em um depósito distinto compreendendo seixos e matacões angulares a subangulares, ligeiramente a moderadamente decompostos, com uma matriz de clastos. Uma depressão (em amarelo) é evidente acima deste lobo. A evidência de campo sugere que o delta pode representar detritos de uma grande avalanche de rochas. De: Mapeamento Geomorfológico: Desenvolvimento de Métodos e Aplicações em Processos Superficiais da Terra, Capítulo 15 A Aplicação de Mapeamento Geomorfológico na Avaliação do Risco de Deslizamentos em Hong Kong. Parry 2011, © 2011 Elsevier.

Os dados observacionais obtidos durante o mapeamento de campo e investigação do

de 'eventos de projeto' para cada unidade de terreno.

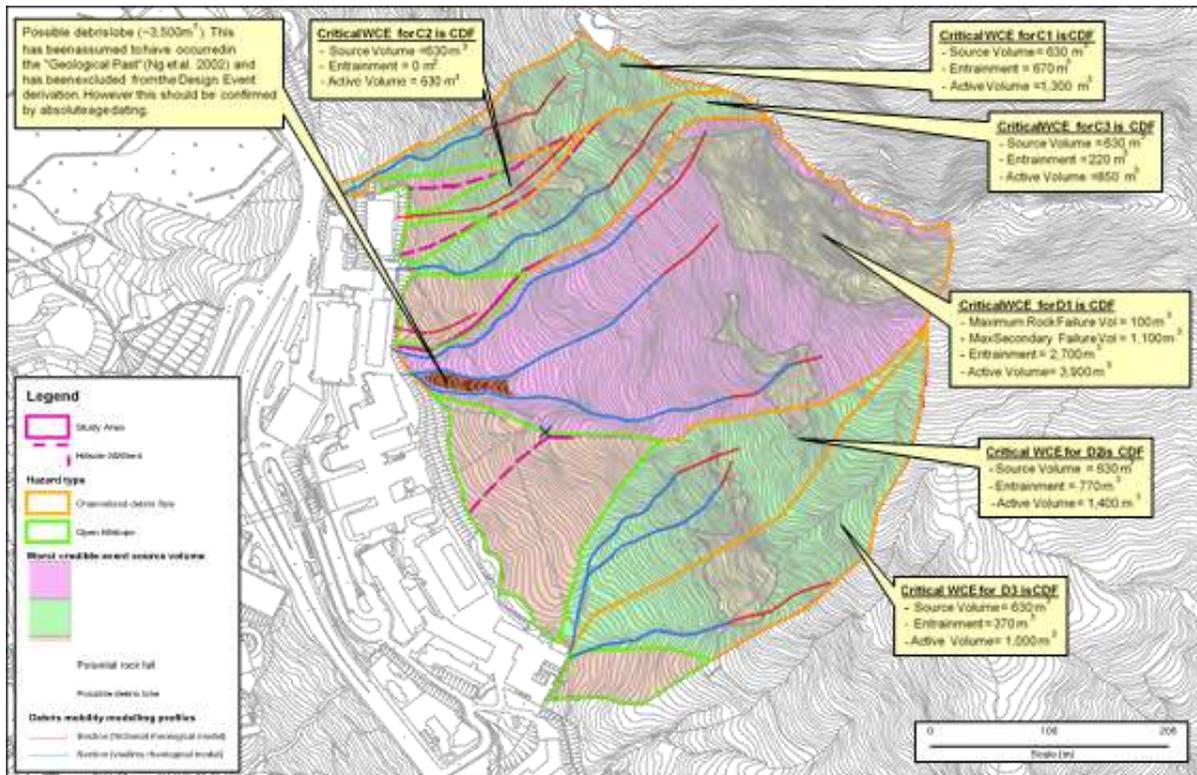


Figura 3.7-5: Eventos de projeto obtidos do Modelo Geológico-Geotécnico (Parry 2011). De: Mapeamento Geomorfológico: Desenvolvimento de Métodos e Aplicações em Processos Superficiais da Terra, Capítulo 15 A Aplicação do Mapeamento Geomorfológico na Avaliação do Risco de Escorregamentos em Hong Kong. Parry 2011, © 2011 Elsevier.

Em resumo, um Modelo Geológico-Geotécnico permite a avaliação lógica do risco de escorregamentos (e riscos subsequentes) (**Figura 3.7-6**) com resultados que incluem modelos conceituais de risco, mapeamento geológico-geotécnico/geomorfológico, inventários de escorregamentos, possíveis tipos de escorregamentos e sua magnitude e frequência associadas, taxas de movimentação, potencial de propagação e a estimativa de parâmetros apropriados para qualquer modelagem analítica, como por exemplo, modelagem de mobilidade de detritos e possíveis velocidades de impacto.

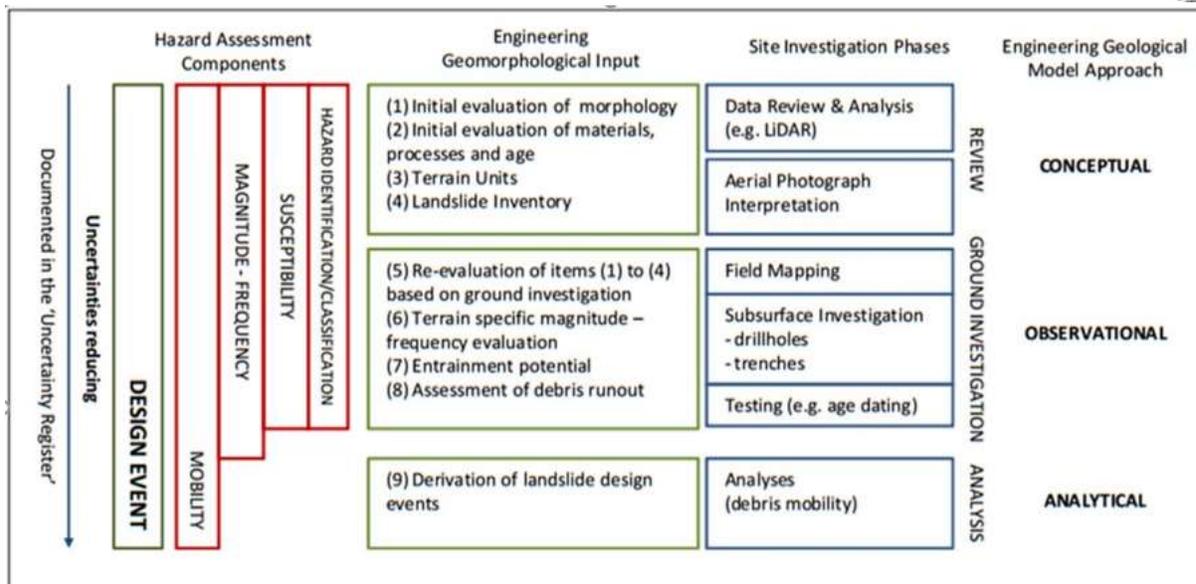


Figura 3.7-6: Uso de Modelos Geológicos-Geotécnicos em Avaliações de Risco de Escorregamentos. De: Anais do 11º Simpósio Internacional sobre Deslizamentos (ISL) e 2º Simpósio Norte Americano sobre Escorregamentos, mapeamento geomorfológico de engenharia de risco de escorregamentos em Hong Kong, Parry & Hart 2012. © 2012 CRC Press.

Reproduzido com permissão de Taylor & Francis Group.

Referências

Baynes, F. J, Parry, S. & Novotný, J. 2021. *Engineering Geological Models, Projects and Geotechnical Risk*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>

Lee, E. M. & Jones, K. C., 2014. *Landslide risk assessment, Second edition*. Thomas Telford. London.

Parry, S. 2011. *The application of geomorphological mapping in the assessment of landslide hazard in Hong Kong*. In Smith, M.J., Paron, P., & Griffiths, J.S., (eds.) *Geomorphological Mapping: Methods and Applications Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, Volume 15, M. J.,P. & J. S.413-441, ISSN 0928-2025, ISBN 9780444534460, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53446-0.00015-X>.

Parry, S. & Ng, K. C. 2010. *The assessment of landslide risk from natural slopes in Hong Kong: an engineering geological perspective*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 43, 307-320. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-012>



Parry, S. & Hart, J. R. 2012. *Engineering geomorphological mapping for landslide hazard assessments in Hong Kong. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides (ISL) and the 2nd North American Symposium on Landslides.*

Sewell, R. J., Parry S, Millis S. W., Wang N., U. Rieser U. & DeWitt R. 2015. *Dating of debris flow fan complexes from Lantau Island, Hong Kong, China: The potential relationship between landslide activity and climate change. Geomorphology* 248 205 –227.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.041>

3.8 MGG PARA ÁREAS CONTAMINADAS

Judith Nathanail & Paul Nathanail

O solo pode ser uma fonte de contaminação natural ou antropogênica, uma via de transmissão de contaminantes, uma barreira para essa transmissão ou um receptor que pode ser impactado negativamente por contaminantes (**Tabela 3.8-1**).

Tabela 3.8-1: Geologia como via fonte/barreira e receptor. © Land Quality Management Ltd reproduzido com permissão.

Componente do Modelo Conceitual da Área	Exemplos de geologia atuando como este componente
Fonte/contaminante	Arsênico, chumbo, níquel, sulfatos
Vias	Areia, arenito, concreções calcáreas, argilito fissurado, canais enterrados, zonas de alta permeabilidade, falhas
Barreiras	Argila, argilito, falha (baixa permeabilidade devido a preenchimento)
Receptores	Concreções calcáreas, arenitos, aquíferos pequenos que podem prover água para consumo ou cursos d'água

Na gestão de risco de áreas contaminadas, dentro de um contexto legal específico, ao menos uma ligação contaminante precisa ser identificada, ou seja, fontes, vias e receptores da contaminação. O Modelo Conceitual da Área (MCA) é a ferramenta central usada para descrever as ligações contaminantes e ajudar na avaliação e gerenciamento do risco de contaminação.

Um MCA é uma “*síntese de todas as informações sobre uma área potencialmente contaminada, com interpretação necessária e reconhecimento de incertezas*” (ISO 21365, 2020). É usado para informar as decisões sobre a necessidade de ação para gerenciar os riscos de contaminação da área para receptores como a saúde humana, águas superficiais e subterrâneas, ecossistemas, edificações, criações e culturas, conforme definido pela legislação vigente.

O nível de detalhe geológico-geotécnico em um MCA varia de simples e abstrato a



altamente detalhado – de genérico a observacional e, ocasionalmente, evolutivo. O MCA destaca os principais aspectos da geologia de uma área para entender a escala, a natureza e o significado legal dos riscos potenciais de solo, água e gás ou vapores contaminados.

Informações não pertinentes podem obscurecer a compreensão das ligações existentes com contaminantes. Embora seções geológicas transversais detalhadas possam ter sido criadas durante um projeto, em um MCA, a geologia é representada em como se fosse fonte, via/barreira ou receptor. O MCA resume e comunica as principais informações relevantes para avaliar os riscos de contaminação que podem estar, ou parecem estar presentes em uma área (**Tabela 3.8-2**).

Os MCAs normalmente compreendem uma planta (**Figura 3.8-1**) e uma seção transversal (**Figura 3.8-2**) mostrando a fonte principal, a via/barreira e as características do receptor no local e na área circundante, juntamente com uma tabela ou diagrama de rede (**Figura 3.8-3**) mostrando as ligações topológicas de contaminantes conhecidas ou suspeitas de estarem presentes e texto de apoio (**Tabela 3.8-2**). Um MCA ajuda e captura a compreensão do risco de contaminação em uma área, que é expresso como ligações com contaminantes.

Tabela 3.8-2: Informações que devem constar em um MCA. © Land Quality Management Ltd reproduzida com permissão.

Informação	Comentário
Contexto legal	Estabelece receptores de preocupação e nível de gatilho para ação de gestão de risco
Uso atual/previsto da área e arredores	Estabelece a provável natureza e comportamento das pessoas no local e nas proximidades
Estágio de gestão de riscos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Avaliação de risco preliminar ou quantitativa (genérica ou detalhada); 2. Avaliação das opções de remediação; 3. Projeto, implementação ou verificação de remediação
Uso histórico do solo no local e nas proximidades	Estabelece potencial de contaminação histórica
Contexto ambiental	Estabelece a natureza do terreno e potenciais receptores ambientais
Geologia da área, incluindo geologia de engenharia, geoquímica, geomicrobiologia, hidrogeologia, sismicidade, processos em andamento	Geologia como fonte de contaminação, via/barreira de migração ou receptor (como águas subterrâneas); a geologia de engenharia pode influenciar a transmissão de contaminantes e a estratégia de remediação sustentável
Contaminação real/potencial	Composição, escala, distribuição, destino e transporte, toxicidade
Natureza e localização de fontes, vias/barreiras e receptores relevantes de contaminantes	Cada componente é necessário se houver risco
Ligações com contaminantes de fontes, vias e receptores conectados	As ligações impulsionam o risco
Suposições e incertezas	Se estas influenciarem decisão, elas devem ser reduzidas por meio da coleta de mais informações

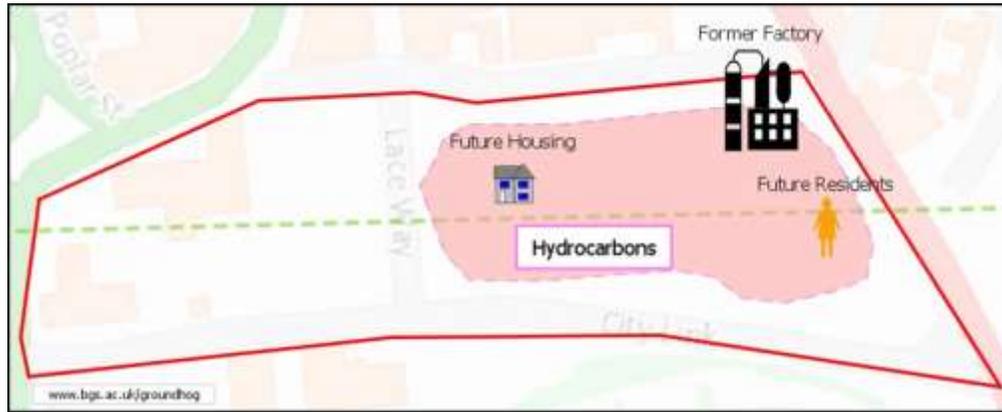


Figura 3.8-1: MCA na APR (Avaliação Preliminar de Risco) – Planta – mostra a localização de fontes e receptores; a linha verde tracejada indica a seção transversal na **Figura 3.8-2**. © Land Quality Management Ltd. Reproduzido com permissão.

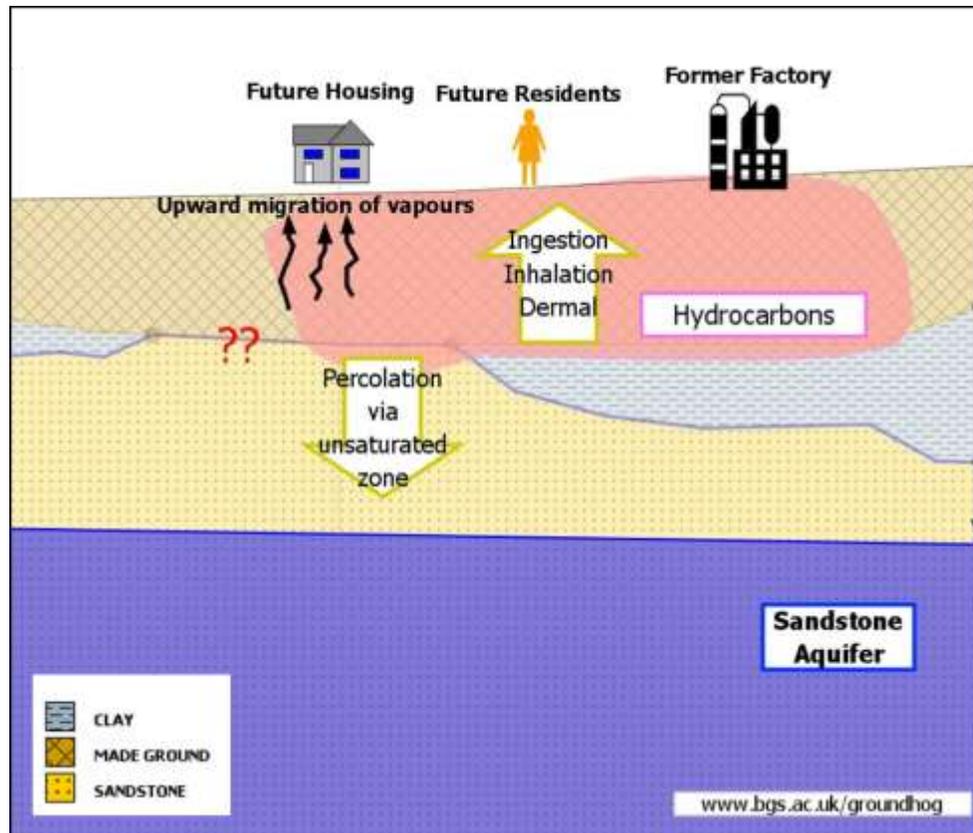


Figura 3.8-2: MCA na APR – Seção Transversal – mostra fontes, vias e receptores em relação à geologia. Neste exemplo, a continuidade da camada de argila é incerta. © Land Quality Management Ltd. Reproduzido com permissão.

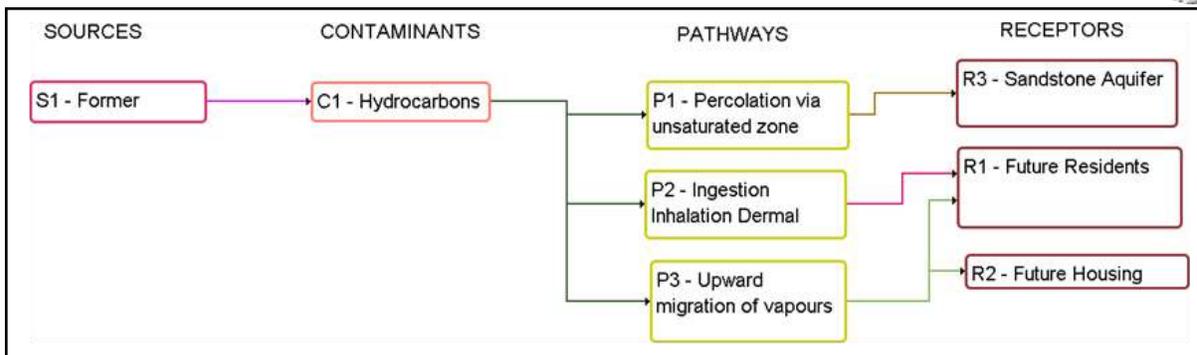


Figura 3.8-3: MCA na APR – Diagrama de Rede – mostra potenciais ligações contaminantes.

O MCA é usado para determinar a necessidade de mais informações para reduzir a incerteza, avaliar o risco e a necessidade de remediação, identificar estratégias de remediação viáveis e demonstrar que a remediação eliminou com sucesso todas as ligações contaminantes (**Tabela 3.8-3**).

Tabela 3.8-3: Usos de um MCA em gestão de áreas contaminadas com base em risco © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.

Fase	Uso
Avaliação preliminar de risco	Decidir se deve ser feita uma investigação intrusiva da área para caracterizar a contaminação ou alimentar uma avaliação de risco quantitativa
	Identificar a localização provável de perigos potenciais contaminação em uma área.
	Avaliação qualitativa de potenciais ligações contaminantes em uma área
	Projetar uma estratégia analítica e de amostragem de solo, gás subterrâneo e água subterrânea
Avaliação quantitativa de risco	Seleção de avaliação de risco e critérios de avaliação genéricos ou específicos da área
	Interpretação dos resultados do monitoramento
Avaliação de opções de remediação	Escolha da estratégia de remediação
Projeto de remediação	Recuperação e engenharia de valor da estratégia de remediação selecionada
Verificação de remediação	Demonstrar que a remediação foi eficaz em eliminar todas as ligações contaminantes
Do início ao fim	Prever o impacto de eventos futuros, como mudanças climáticas ou mudanças no uso do solo
Todas as fases	Comunicar-se com as partes interessadas em todas as fases da gestão de riscos de contaminação do solo

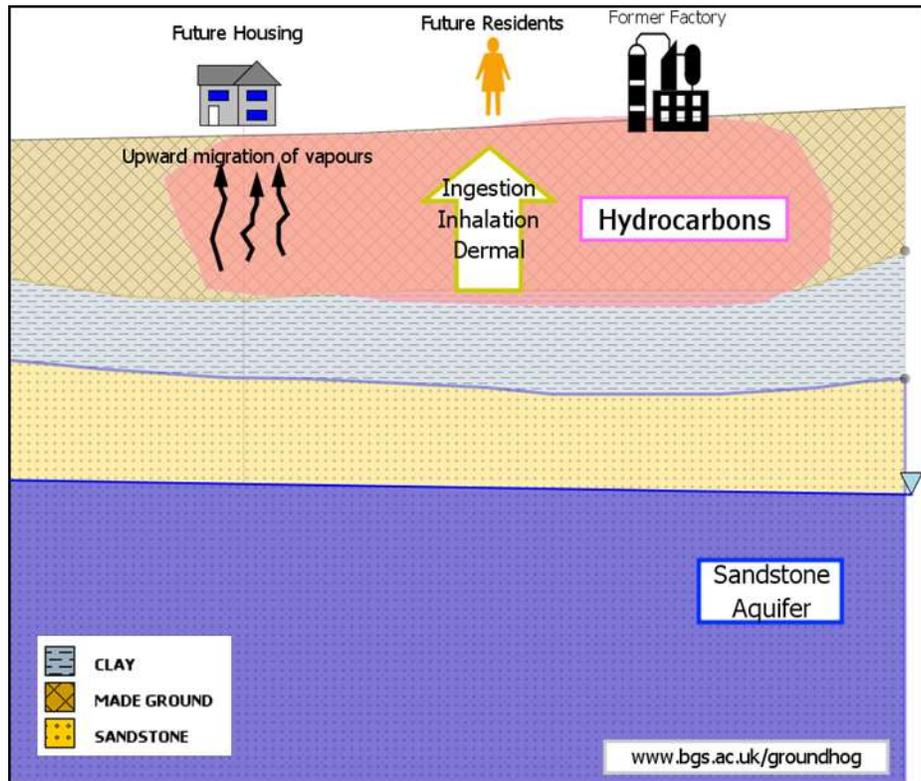


Figura 3.8-4: MCA com base nos resultados da investigação intrusiva da área e análise quantitativa de risco – Seção transversal. Neste exemplo, a investigação da área comprovou que a camada de argila é contínua. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.

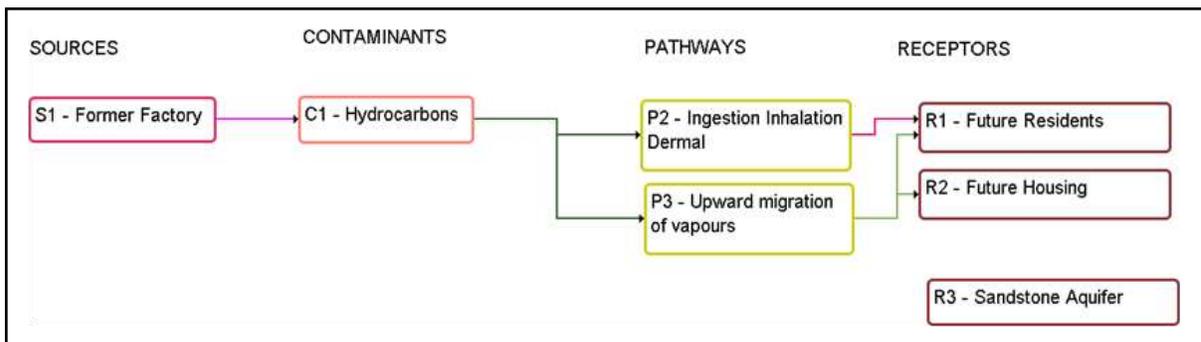


Figura 3.8-5: MCA baseado nos resultados da investigação intrusiva da área e desenvolvido durante a análise quantitativa de risco – diagrama de rede - Neste exemplo, a ligação envolvendo o Aquífero Arenítico não está mais presente, mas os riscos para futuros residentes e futuras habitações permanecem. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.

A **Figura 3.8-4** e a **Figura 3.8-5** mostram como o MCA é atualizado com as informações da investigação da área e da avaliação de risco, abordando algumas das incertezas na APR (neste exemplo, a planta é a mesma que a da Avaliação Preliminar de Risco - APR, por isso não foi repetida).

O MCA resume sucintamente as características relevantes da área para a gestão do risco de contaminação do solo: fontes de contaminantes, vias/barreiras e receptores, conectados em ligações contaminantes.

O MCA ajuda a avaliar, comunicar e controlar riscos em áreas afetadas por contaminação. É uma aproximação testável das condições e processos ambientais em um local e sua vizinhança. Um MCA captura o que é conhecido e o que é desconhecido ou incerto. Ele é atualizado à medida que mais informações se tornam disponíveis. Usado corretamente, o MCA deve orientar a avaliação de risco e informar as medidas de remediação. O ponto final da gestão de risco de contaminação do solo é um MCA mostrando que todas as ligações contaminantes foram comprovadamente eliminadas (**Figura 3.8-6**, **Figura 3.8-7** e **Figura 3.8-8**).

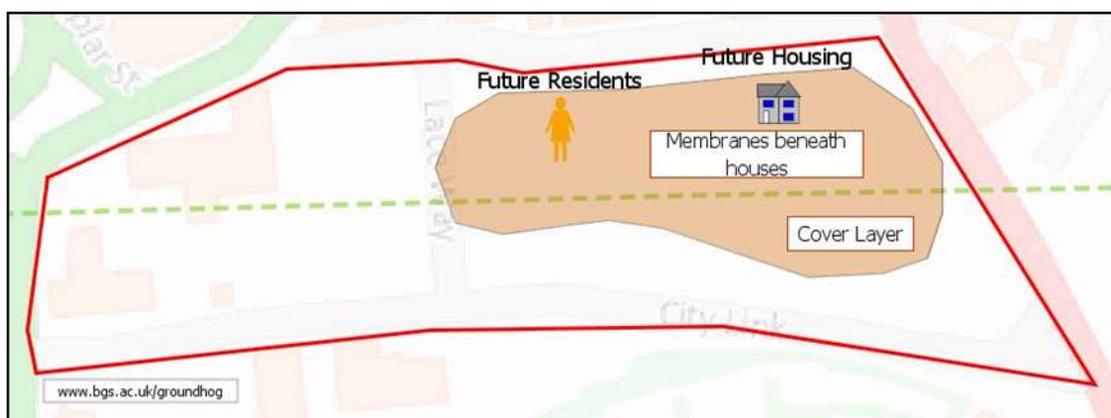


Figura 3.8-6: MCA pós-remediação – Planta – ligação restante eliminada pela colocação de camada de cobertura e membranas abaixo das casas. © Land Quality Management Ltd.

Reproduzida com permissão.

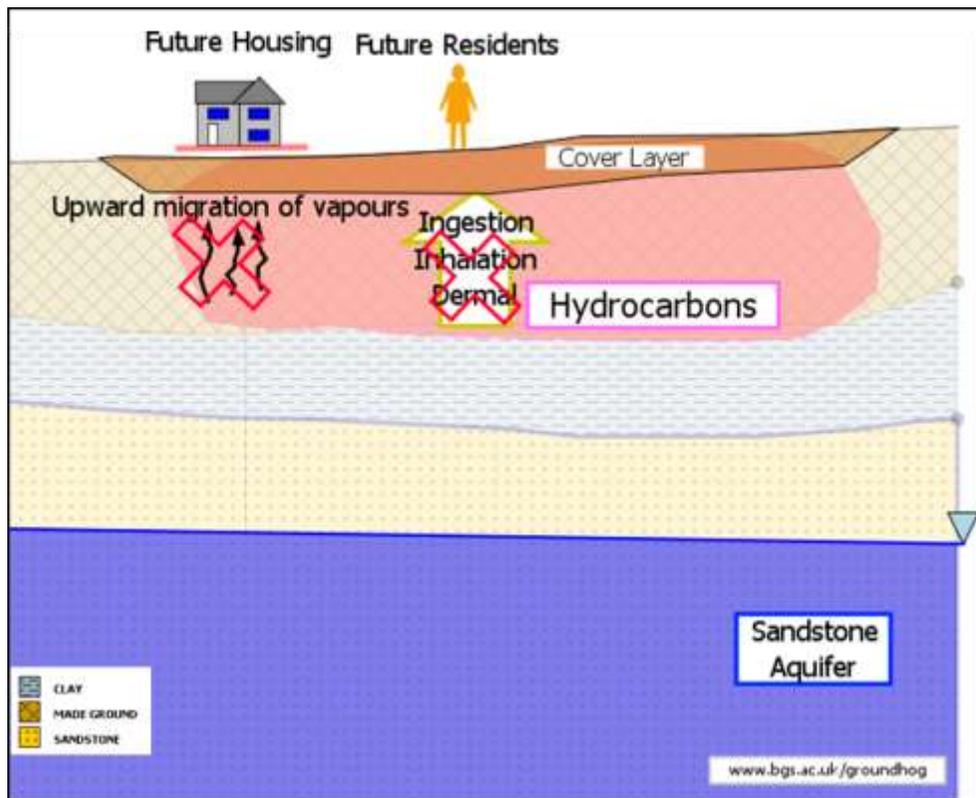


Figura 3.8-7: MCA pós-remediação – Seção Transversal – neste exemplo, a remediação com uma camada de cobertura e membranas abaixo das casas comprovadamente elimina as ligações contaminantes relevantes restantes. © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.

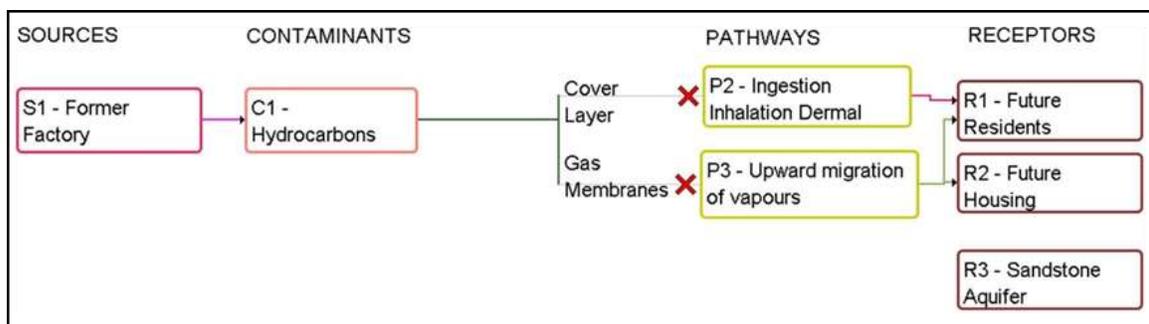


Figura 3.8-8: MCA pós-remediação - Diagrama de Rede - neste exemplo, todas as ligações contaminantes relevantes restantes são mostradas como eliminadas, com os motivos. (A investigação da área e a análise quantitativa de risco demonstraram que P1 não estava presente no local). © Land Quality Management Ltd. Reproduzida com permissão.

3.9 *MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉNICOS PARA ESTUDOS OFFSHORE*

David Waring

Introdução

O MGG em áreas offshore tem sido historicamente impulsionados pela exploração e extração de hidrocarbonetos. Mais recentemente, eles estão sendo impulsionados pela transição energética e pelo desenvolvimento de energias renováveis offshore e sua infraestrutura de apoio.

O desenvolvimento de modelos geológicos-geotécnicos offshore é desafiador, dada a diferença fundamental com as áreas onshore, onde geralmente é possível “ver” o terreno. Isso coloca uma maior ênfase nos dados que serão coletados por meio de técnicas indiretas e uma maior confiança na conceituação.

MGGs offshore geralmente cobrem áreas de interesse maiores em comparação com áreas onshore. Dadas as implicações para a coleta de dados (discutidas abaixo), as distâncias entre furos exploratórios tendem a ser maiores, portanto, a confiança em métodos geofísicos é mais significativa. Isso pode ser considerado de forma oposta para uma área onshore; no entanto, sempre há exceções à regra para áreas onshore e offshore. Exemplos disso são (i) locais onshore com acesso livre e irrestrito (por exemplo, salina em ambientes desérticos interiores) e (ii) local offshore para uma única instalação de petróleo e gás. A dependência de técnicas geofísicas para desenvolver o modelo é um fator diferenciador para MGG offshore.

Estudo de caso

Um exemplo de como os dados sísmicos podem ser usados para interpolar/extrapolar os dados geotécnicos é ilustrado na **Figura 3.9-1**. A figura mostra um emparelhamento de ensaio de penetração de piezocone (131 e 132CPT1) realizado em dois locais na vizinhança do site A e junto com dados sísmicos mostrando estratigrafia clara do tipo

“camadas de bolo” até 60m abaixo da camada de lama¹¹ (fundo do mar).

A interpretação das constatações parece mostrar uma expansão da sequência estratigráfica entre os dois ensaios CPT. No entanto, não parece haver diferença significativa nos perfis CPT, que têm perfis de resistência ao cisalhamento semelhantes aumentando com a profundidade. A sequência estratigráfica entre 131 CPT1 e o Site A parece consistente, indicando que os dados CPT podem ser extrapolados para o Site A sem a coleta de mais dados geotécnicos profundos.

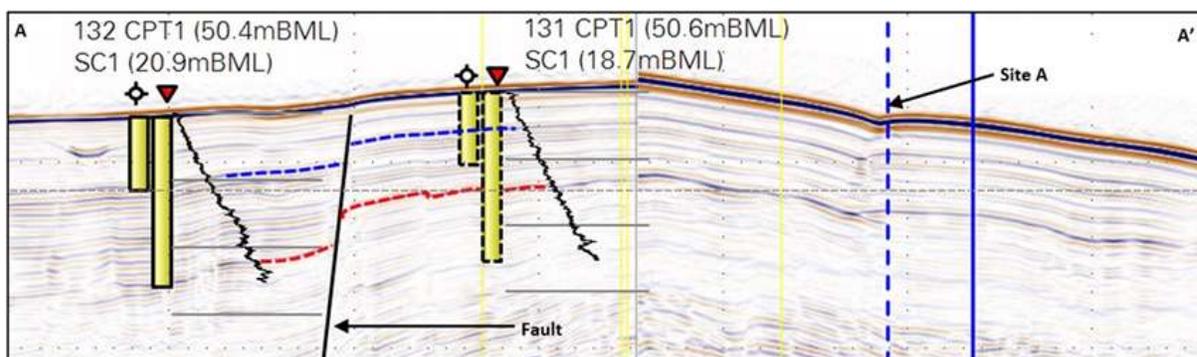


Figura 3.9-1: MGG offshore simples utilizando furos geotécnicos e dados sísmicos. Nota: BML interpretado como abaixo da superfície de lama.

Reunião de Dados de Modelo do Terreno

Os MGGs offshore precisam considerar vários fatores que afetam a coleta de dados, incluindo:

- Colunas d'água variáveis.
- Condições meteoceanográficas, tais como ondas, correntes e ventos.
- Escala e quão remota é a área.
- Restrições de acesso.

Os desafios listados acima têm um impacto significativo no custo e cronograma e requerem considerações ambientais, de saúde e segurança.

¹¹ Nota do tradutor: BML – below mud line

É necessária uma estratégia clara antes de embarcar em uma campanha cara e demorada. É necessário garantir que a abordagem esteja alinhada às necessidades do projeto e, portanto, totalmente otimizada. Um exemplo de uma abordagem otimizada é fornecido na **Figura 3.9-2**.

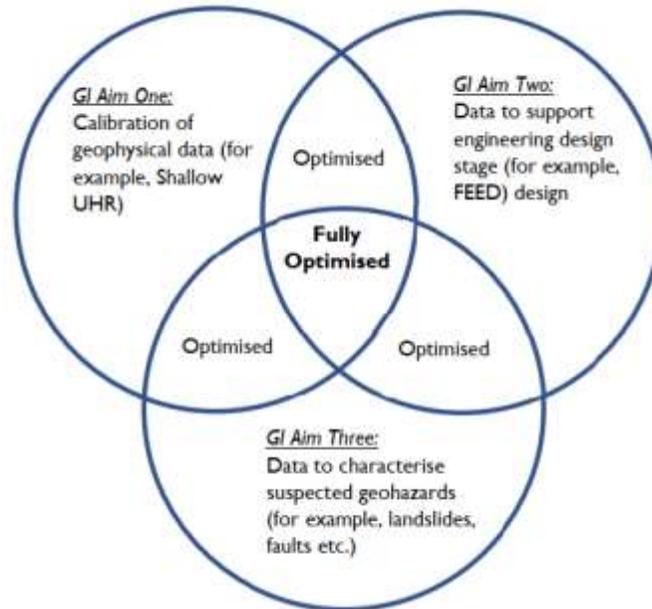


Figura 3.9-2: Alinhamento da abordagem com as necessidades do Projeto.

A coleta de dados offshore geralmente requer uma abordagem multidisciplinar para entender as complexidades de engenharia associadas à morfologia, geomorfologia e geologia. Os MGG devem levar em consideração:

- Leito marinho (por exemplo, se acidentado ou não, mobilidade e dureza).
- Processos geomorfológicos ativos.
- Dados geológicos históricos.
- Perigos e riscos geológicos.
- Solos difíceis e incomuns (por exemplo, areias glauconíticas, lamas carbonáticas).

Também é necessário levar em consideração os efeitos que não são comumente associados a MGGs onshore, como (mas não se limitando a) gás raso, hidratos de gás, estruturas de sal, correntes de turbidez e surgências de hidrocarbonetos.

A coleta de dados para dar suporte ao desenvolvimento de MGG pode ser realizada por meio de uma variedade de métodos e pode ser influenciada pela disponibilidade de embarcações e equipamentos de pesquisa, custo e requisitos técnicos. O levantamento pode normalmente ser dividido em duas fases: levantamentos geofísicos e investigação geotécnica, sendo esta última normalmente usada para calibrar dados geofísicos e fornecer um entendimento específico da área.

Os levantamentos geofísicos em águas profundas são normalmente realizados utilizando veículos subaquáticos autônomos (AUVs) para permitir a aquisição de dados batimétricos de eco sonda multifeixe (MBES), imagens de sonar de varredura lateral e perfiladores de subfundo de alta frequência (também conhecidos como perfiladores chirp). Em águas rasas, sensores geofísicos montados no casco ou rebocados podem ser preferidos devido às complicações operacionais dos AUVs. Os levantamentos geofísicos também podem ser realizados por meio de uma embarcação rebocando um arranjo de sensores, a partir do qual as ondas são propagadas pelo uso de uma fonte de energia apropriada. Em escala regional, dados sísmicos de exploração 3D (3DX) e dados sísmicos de altíssima resolução (UHR) 2D podem ser utilizados; o reprocessamento de dados sísmicos de exploração 3D pode aumentar sua utilidade para interpretação de subsuperfície rasa e análise do leito marinho. Por meio dessas técnicas, dados de imagem do leito marinho e subsuperfície rasa (c60m) são coletados para embasar o desenvolvimento do MGG.

As investigações geotécnicas são normalmente projetadas para embasar a compreensão dos depósitos do leito marinho raso e/ou dos depósitos geológicos mais profundos. Investigações rasas usando uma variedade de ferramentas (por exemplo, caixas amostradoras, amostradores por gravidade ou pistão, testes de penetração de piezocone (PCPTs), amostradores vibratórios, amostragem rápida) são realizadas para dar suporte à avaliação de perigos e riscos geológicos, mas também como uma entrada de dados para projeto de fundações rasas, tubulações etc. Os furos são normalmente usados para ensaios in situ, amostras para perfilagem e testes de laboratório. Há diversos sistemas disponíveis para isso.



Dependendo do desenvolvimento offshore proposto, normalmente há duas abordagens que podem ser adotadas:

- 1) uso da geofísica para caracterizar amplamente uma maior área através de diferentes técnicas intrusivas para complementar essa interpretação.
- 2) técnicas intrusivas específicas da área em locais onde podem ser necessárias fundações individuais conhecidas (por exemplo, um projeto de parque eólico, utilizando monoestacas para turbinas eólicas individuais).

Combinações variadas das duas opções são comuns, dependendo dos desafios descritos acima, bem como do tipo de desenvolvimento proposto.

Desenvolvimento e Interpretação do MGG

O MGG é normalmente desenvolvido de forma semelhante ao de um MGG onshore. Terá uma série de dados de entrada, incluindo:

- Dados ambientais e geológicos regionais
- Dados geofísicos
- Dados geotécnicos

Por meio da interpretação, calibração e mapeamento detalhado desses dados, os seguintes dados de saída são normalmente desenvolvidos/identificados:

- Cota do leito marinho;
- Processos geológicos;
- Estratigrafia sísmica;
- Identificação e avaliação de perigos e riscos geológicos;
- Províncias preliminares de solo/rocha.

Os resultados desejados incluem:

- Unidades de terreno (contexto geológico específico, com dados deposicionais históricos e formas e processos geológicos semelhantes).
- Perigos e riscos geológicos (por exemplo, presença de deslizamentos e sua

influência nas unidades de terreno).

- Províncias de solo/rocha (estritamente ligadas a unidades de terreno; áreas do leito marinho e subsuperfície que têm características e propriedades geotécnicas amplamente semelhantes).
- Unidades de solo/rocha (camadas de solo/rocha e estratos dentro de cada província de solo/rocha).
- Presença de materiais antropogênicos (navrágios, detritos do leito marinho, materiais bélicos não detonados, etc.)
- Parâmetros geotécnicos.

Para permitir a comunicação e o compartilhamento das informações, os dados são normalmente apresentados em modelos de blocos 3D, além de serem incorporados a um formato GIS. Mais recentemente, pacotes de software mais tradicionalmente usados para modelar situações geológicas complexas para fins de exploração vêm sendo usados para desenvolver modelos geológicos interativos em 3D para uso em engenharia. Um exemplo de um diagrama de fluxo de trabalho é apresentado na **Figura 3.9-3**.

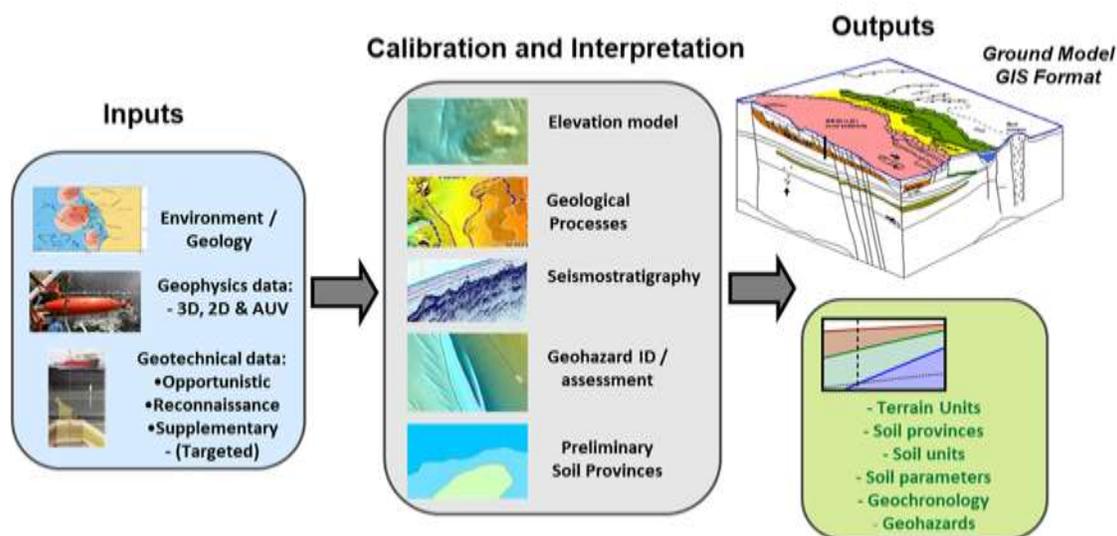


Figura 3.9-3: Diagrama de fluxo de trabalho para desenvolvimento de MGG em ambiente offshore. © BP 2022.



FIM DAS DIRETRIZES