



ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE (IAEG)

PUBLICAÇÃO Nº 1 DA COMISSÃO 25 DA IAEG

Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

Autores principais

Fred Baynes e Steve Parry

Editores principais

Martin Culshaw e Jim Griffiths

Autores e editores colaboradores

Wayne Barnett, Jorge Bejerman, 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. 2024. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. Version 2.0. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 82 pp.

Download do original em inglês pode ser feito em <https://www.iaeg.info/C25EGMGuidelines/>

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

&

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
Luiz Alberto Minicucci
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
Diretrizes Modelo Geológico-Geotécnico IAEG C25 v2.0.pdf	9 de agosto de 2024	Diretrizes v2.0	Fred Baynes & 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**, revisada em agosto de 2024 (v2.0) 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 peculiaridades 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: Ameaças Geológicas
- . Geological Risks ou Georisks: Riscos Geológicos
- . Failure: Ruptura
- . Fault: Falha

As figuras compostas por fluxograma de caixas de textos foram também traduzidas, entretanto, com o objetivo de manter a estrita essência das informações, as demais figuras 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 DISPOSIÇÕES CONSULTIVAS	12
1.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO (MGG)	13
1.1.1 Definições	13
1.1.2 Princípios fundamentais	15
1.2. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	20
1.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento	20
1.2.2 Escolha do nível de desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico	21
1.2.3 Detalhes do processo de desenvolvimento	24
1.2.4 MGG e Eurocode	35
1.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	36
1.3.1 Introdução	36
1.3.2 Resumo para documentação dos componentes do MGG	36
1.3.3 Implicações na contratação de projeto	37
1.3.4 Relatórios Informativos do Modelo Geológico	39
1.3.5 Criando e visualizando um modelo digital 3D	42
1.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	47
1.4.1 Introdução	47
1.4.2 Fontes de incerteza	48
1.4.3 Avaliação holística da confiabilidade do Modelo Geológico-Geotécnico	48
1.4.4 Outros métodos de avaliação da incerteza e confiabilidade do MGG	49
1.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	51
1.5.1 Verificação da qualidade do processo de desenvolvimento do MGG	51
2 COMENTÁRIOS	53
2.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO	54
2.1.1 Definições	54
2.1.2 Princípios fundamentais	54
2.2. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MGG	55
2.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento	55
2.2.2 Escolha do nível de desenvolvimento do Modelo Geológico-Geotécnico	62



2.2.3 Detalhes do processo de desenvolvimento	63
2.2.4 MGG e Eurocode	78
2.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	79
2.3.1 Introdução	79
2.3.2 Resumo para documentação dos componentes do MGG	79
2.3.3 Implicações de aprovisionamento do projeto	79
2.3.4 Relatórios de MGG	79
2.3.5 Criando e visualizando um modelo digital 3D	86
2.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MGG	102
2.4.1 Introdução	102
2.4.2 Fontes de incerteza	105
2.4.3 Avaliação holística do Modelo Geológico-Geotécnico	107
2.4.4 Outros métodos de avaliação da incerteza e confiabilidade do Modelo Geológico-Geotécnico	107
2.5 GARANTINDO A QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	114
2.5.1 Objetivos gerais de qualidade do Modelo Geológico-Geotécnico	114
2.5.2 Verificando a qualidade do processo de desenvolvimento do MGG	114
2.6 MODELOS GEOLÓGICOS E ENGENHARIA DE PROJETOS	116
2.6.1 Descrição Geral	116
2.6.2 Descrição geral do MGG e das etapas do projeto	116
2.6.3 Modelo Geológico-Geotécnico e as investigações no local	116
2.6.4 Modelo Geológico-Geotécnico em análise e projeto	122
2.6.5 Modelo Geológico em gestão de obras	123
2.7 REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE A - COLABORADORES	129

Índice de Figuras

Figura 1-1: Visualização esquemática do desenvolvimento do MGG 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: Estabelecendo unidades geológico-geotécnicas e a base do Modelo Geológico.	31
Figura 1-4: Processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D.	44
Figura 1-5: Abordagem para avaliar a confiabilidade do componente conceitual do MGG.	50
Figura 2-1: Processo de desenvolvimento do MGG.	55
Figura 2-2: O processo de desenvolvimento do MGG para engenharia de taludes rochosos (de Eggers, M., MGGs para projetos de engenharia de rochas em Baynes & Parry 2022).	56
Figura 2-3: O processo de desenvolvimento de MGG para estudos offshore (de Waring, D., MGGs para estudos offshore em Baynes & Parry 2022).	57
Figura 2-4: O processo de desenvolvimento de MGG para engenharia de solos (de Shipway, I., MGGs para estudos de engenharia de solo em Baynes & Parry 2022).	58
Figura 2-5: O processo de desenvolvimento do MGG para pequenos projetos (de Shipway, I., MGGs para pequenos projetos em Baynes & Parry 2022).	59
Figura 2-6: 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.	64
Figura 2-7: Características típicas do granito. Reproduzido de Fookes et al. 2015. Geomodels in engineering geology – an introduction. © Whittles Publishing 2015.	71
Figura 2-8: Estruturas associadas com dobras abertas (baseado em Price & Cosgrove, 1990).	72
Figura 2-9: Modelo genérico de frequência de magnitude de deslizamento (Moon et al, 2005). Reproduzido com permissão dos autores.	73
Figura 2-10: Visualização após um estudo de revisão bibliográfica do componente conceitual de um MGG para um duto que cruza terreno instável afetado por atividades de mineração e escorregamentos (Baynes et al. 2021).	75
Figura 2-11: Convenções de traçado de contatos geológicos.	81
Figura 2-12: Arquitetura SIG para um Modelo Geológico-Geotécnico.	82
Figura 2-13: Visualização explícita da geologia da fundação de uma barragem em concreto gravidade, incluindo andesitos de mergulho suave e zonas de falha atravessadas por diques félsicos tardios (imagem fornecida por Richard Brehauss e reproduzida com sua permissão).	90
Figura 2-14: 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).	92



Índice de Tabelas

Tabela 1-1: <i>Etapas essenciais no processo de desenvolvimento de MGG</i>	20
Tabela 1-2: <i>Níveis de desenvolvimento do MGG de acordo com o projeto e complexidade geotécnica*</i>	22
Tabela 1-3: <i>Orientação sobre necessidades para os níveis de desenvolvimento do MGG*</i>	23
Tabela 1-4: <i>Resumo para documentação dos componentes do MGG.</i>	38
Tabela 1-5: <i>Checklist para avaliação de modelos digitais 3D.</i>	46
Tabela 1-6: <i>Processo de checklist de QA/QC do MGG</i>	52
Tabela 2-1: <i>Fontes para um estudo documental (Shilston et al. 2012).</i>	65
Tabela 2-2: <i>Comparação entre modelos explícitos e implícitos.</i>	94
Tabela 2-3: <i>Incerteza relacionada às informações disponíveis</i>	109
Tabela 2-4: <i>Confiabilidade do modelo geológico e geotécnico em projetos de túneis usando o R-Index (modificado de Dematteis e Soldo 2015).</i>	111
Tabela 2-5: <i>Padronização de entrada de dados.</i>	115



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 ameaças e riscos geológicos, estudos *offshore*, planejamento e 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 (MGG) 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, 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.

Pretende-se que estas Diretrizes sejam traduzidas para outros idiomas para divulgação dentro da comunidade internacional de geologia de engenharia. As Diretrizes continuarão a ser avaliadas e revisadas em resposta ao *feedback* de seu uso em diferentes partes do mundo.

As Diretrizes estão estruturadas em duas 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.

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 para um projeto de engenharia tenha sido, provavelmente, o primeiro modelo geológico-geotécnico. 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 MGG ainda não foi incorporada a Normas Nacionais e Internacionais.

Baynes et al. (2021) expandiram o relatório provisório C25 e enfatizaram que o Modelo Geológico-Geotécnico (MGG) é uma estrutura congênita que pode ser usada para entender e comunicar tudo o que se sabe sobre a geologia e condições 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 2021.

A versão 1.0 das Diretrizes para elaboração de MGG da IAEG C25 foi disponibilizada em pdf para download gratuito no site do IAEG, a partir de 14 de dezembro de 2022.

Em 2024, as Diretrizes foram revisadas em resposta aos comentários recebidos e os exemplos que estavam incluídos na versão 1.0 foram removidos. Contudo, algumas figuras dos exemplos foram mantidas em Comentário.

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



Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos

1 DISPOSIÇÕES CONSULTIVAS

1.1 PRINCÍPIOS DE DESENVOLVIMENTO DO 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 Ameaças Geológico-Geotécnicas são dados de saída da estrutura cognitiva do MGG.
- Modelo Conceitual – Um modelo baseado principalmente em conceitos e interpretações de geologia de engenharia e no conhecimento de que certas condições e processos geológicos provavelmente terão determinadas características de engenharia. Um modelo conceitual temporal (por vezes chamado de modelo evolucionário) ilustra como as condições do terreno podem ter evoluído ao longo dos tempos recente e geológico.
- 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.

¹ Nota do tradutor: também referido como Unidades Geotécnicas

- Mapeamento Geológico de Engenharia² - Preparação de um mapa descrevendo a 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 documenta 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 Geológico e 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.
- Ameaças Geológicas - processos ou fenômenos geológicos e geomorfológicos que podem impactar adversamente um projeto, por exemplo: desenvolvimento cárstico,

² Nota do tradutor: também referido como Mapeamento Geotécnico

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”.

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 naturais, avaliações regionais de ameaças geológicas 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, geomorfológicas e hidrogeológicas 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, geomorfológicas e hidrogeológicas 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 Ameaças Geológicas.

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, geomorfológicas e hidrogeológicas 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.

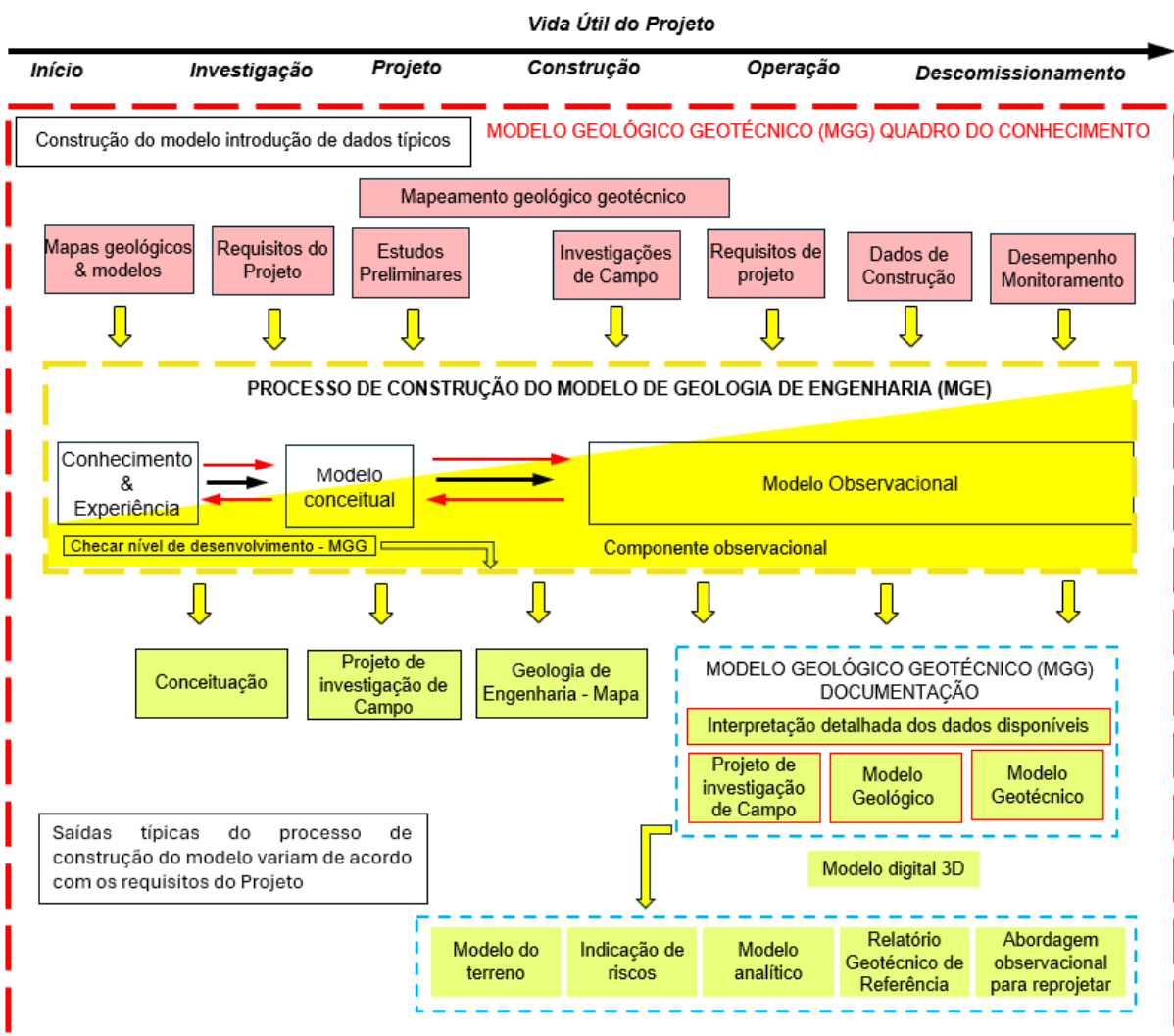


Figura 1-1: Visualização esquemática do desenvolvimento do MGG ao longo do ciclo de vida do projeto.

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.

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

O desenvolvimento do MGG deverá ser iniciado desde a concepção do projeto e revisado periodicamente ao longo da vida útil de um referido projeto ou obra, mesmo que eventualmente ocorram vários sucessores, proprietários, concessionários⁴ e consultores, e fornecendo 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".

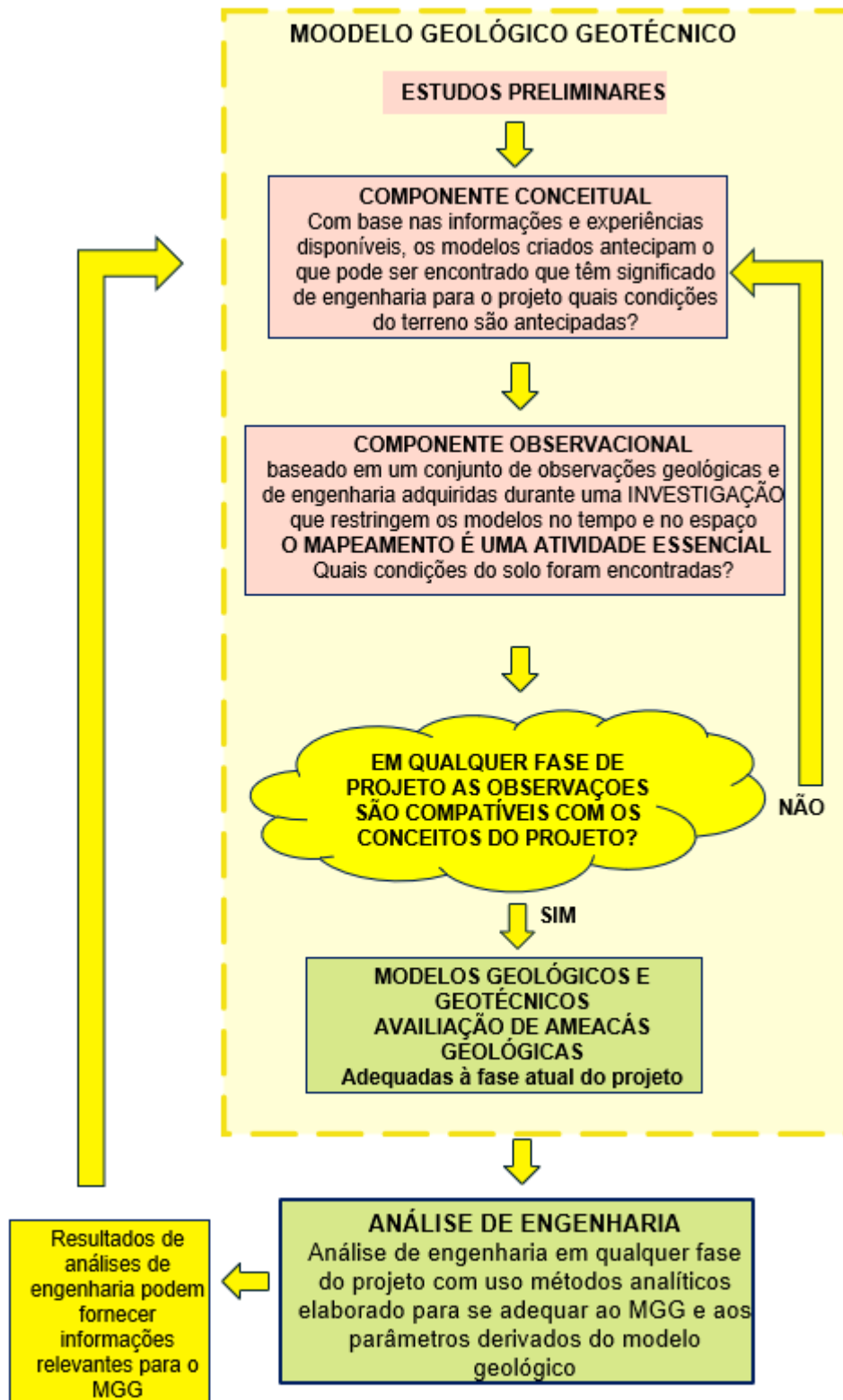


Figura 1-2: A análise de engenharia deve prosseguir quando as observações forem compatíveis com os conceitos.

1.1.2.5 *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.

1.1.2.6 *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 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 MGG

1.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento

1.2.1.1 O processo de desenvolvimento

O processo de desenvolvimento do MGG envolve as etapas essenciais listadas na Tabela I-1, geralmente com interações repetidas entre a maioria delas:

Tabela 1-1 Etapas essenciais no processo de desenvolvimento de MGG

1. Montar equipe, definir escopo e objetivo. Estabelecer o nível de desenvolvimento provável do MGG.
2. Reunir as informações de engenharia e geologia de engenharia de importância para o projeto em um estudo documental. Se possível, realizar um mapeamento de reconhecimento inicial por um geólogo de engenharia competente.
3. Conceituar as prováveis condições geológicas com base no conhecimento e 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. Confirmar o nível de desenvolvimento do MGG.
4. Identificar e documentar as principais ameaças e incertezas em um registro inicial de riscos. Este registro é utilizado durante todo o ciclo de vida do projeto e precisa ser atualizado regularmente.
5. Adquirir observações por meio de investigações (que podem incluir, mas não se limitar a, sensoriamento remoto, mapeamento, geofísica, furos de sondagem exploratórios, amostragem e ensaios); a importância do mapeamento geológico-geotécnico nas investigações não pode ser subestimada.
6. Combinar as observações e os conceitos para desenvolver uma interpretação das condições do local; definir unidades geológicas, interpretar sua distribuição e gerar o Modelo Geológico. Se necessário, reavaliar o modelo conceitual.
7. Caracterizar as unidades geológicas, as condições hidrogeológicas e os processos geológicos utilizando parâmetros geotécnicos desenvolvidos a partir do estudo documental, das investigações e da experiência, gerando um Modelo Geotécnico e onde necessário, uma Avaliação de Ameaças Geológicas.
8. Identificar quaisquer outras ameaças, incertezas, lacunas e discrepâncias significativas dentro da estrutura cognitiva; estes são riscos potenciais para o projeto e devem ser adicionados ao registro de riscos.
9. Avaliar os riscos e, se necessário, realizar investigações adicionais para melhorar a estrutura cognitiva, minimizar incógnitas e reduzir riscos ou considerar opções alternativas de engenharia para reduzir os riscos a níveis aceitáveis.

10. Documentar tudo o que está acima em uma série de relatórios sistemáticos com um conteúdo gráfico significativo.

1.2.1.2 *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 ameaças geológicas 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.

1.2.2 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 **Tabelas 1-2** e **1-3**. O nível de desenvolvimento deve ser revisto se a investigação indicar que a complexidade geológico-geotécnica for maior do que aquela prevista.

Tabela 1-2: Níveis de desenvolvimento do MGG de acordo com o projeto e complexidade geotécnica*

Complexidade do Projeto##	Complexidade geotécnica do terreno que pode influenciar o projeto - conforme indicado pelo modelo conceitual desenvolvido de acordo com estas Diretrizes		
	SIMPLES/UNIFORME Estratos horizontais ou de mergulho suave, solos homogêneos, sem ameaças geológicas, 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, ameaças geológicas significativas, como grandes deslizamentos, rupturas ativas, carste ou potencial de magnitude e/ou frequência de ameaças geológicas serem aumentadas 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 1-3: Orientação sobre necessidades para os níveis de desenvolvimento do MGG*

	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Estudos especializados	Nenhum	Nenhum	Estudos separados de ameaça geológica (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 combinado simples, de dados interpretativos	Documentação do MGG em relatórios de dados e interpretativos	Documentação do MGG em relatórios de dados e 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 informações novas. 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 ameaça geológica 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. Às vezes, é útil desenvolver um modelo conceitual temporal para ilustrar como as condições do terreno podem ter evoluído ao longo do tempo recente e do tempo geológico.

Durante a conceituação, os seguintes aspectos do local 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 ameaças 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. 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.

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.

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 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 descontinuidades dentro delas, sua origem, geometria, espaçamento, persistência e 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 ameaças geológicas ativas ou potencialmente reativadas, 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 riscos 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 Inicial 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 ameaças geológicas 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 sistemático na campanha de investigações em qualquer projeto. O mapeamento deve incluir observações críticas e assertivas sobre toda a área do projeto e interpretações bem fundamentadas dessas observações. 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 inclua a validação 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. 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.

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 determinar quais áreas de incerteza e quais riscos ainda precisam ser avaliados 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 ameaças geológicas futuras.

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.

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.

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. Unidades litoestratigráficas 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 1-3** 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.

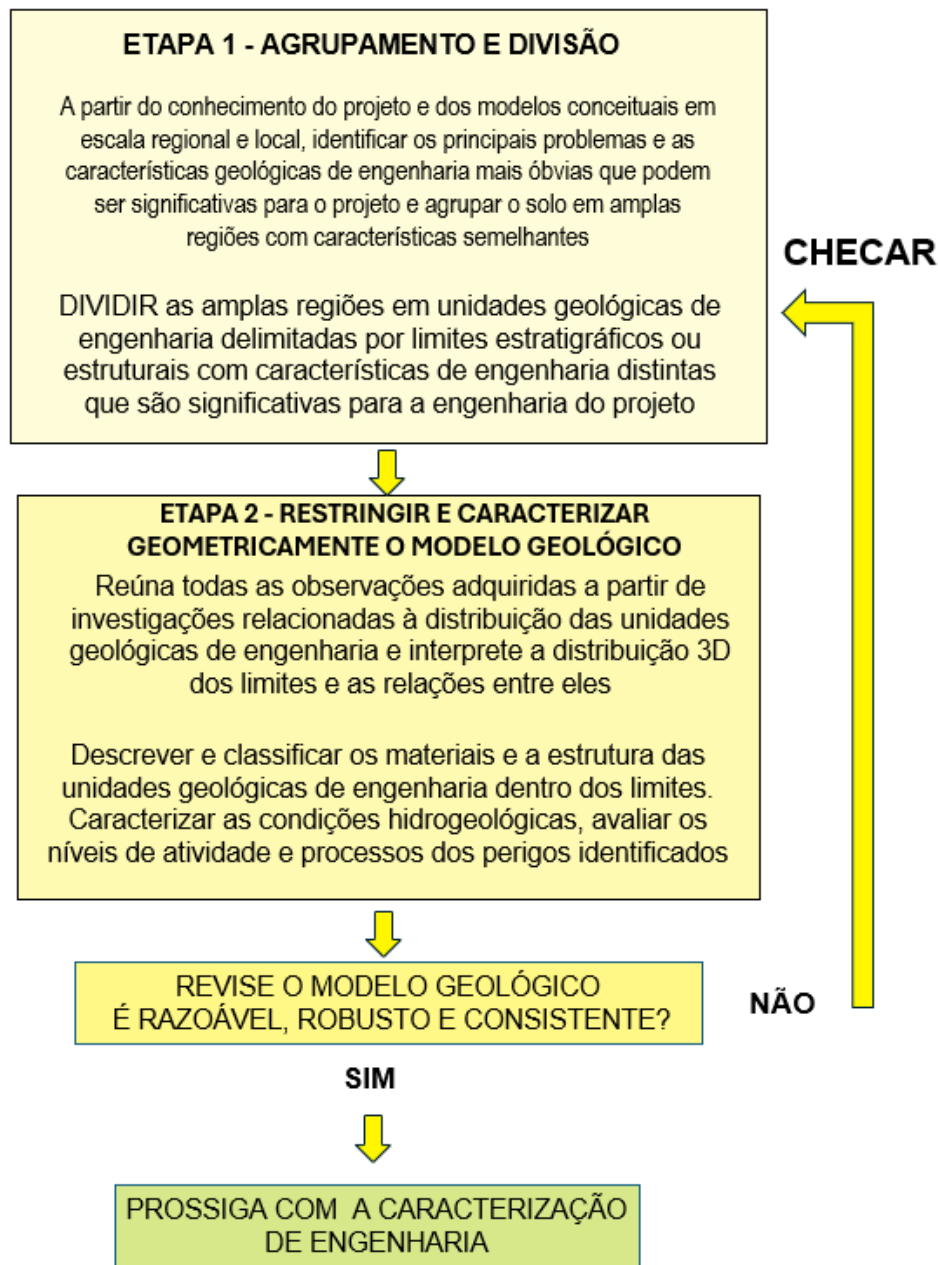


Figura 1-3: Estabelecendo unidades geológico-geotécnicas e a base do Modelo Geológico.

1.2.3.6.1 Complexidade geotécnica

Em áreas geotecnicamente complexas, as propriedades 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 geológicas, e ilustrar a potencial complexidade por meio de uma visualização do modelo conceitual.

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 desenvolve 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, portanto, melhorar a caracterização das unidades geológico-geotécnicas e reduzir a incerteza, e provavelmente serão um aprimoramento 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 possíveis 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 zonar 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 nestas Disposições Consultivas é um processo abrangente adequado 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 é mencionado.

Consulte a Seção Comentário “[2.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO](#)” para mais informações.

1.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

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 considerados no 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 1-4** 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 pode ser projetada usando um MGG, mas após a conclusão da investigação, o requisito contratual pode ser apenas a produção de um Relatório de Dados. O resultado será que a documentação do MGG estará incompleta, porque faltará um conteúdo interpretativo e isso deve ser reconhecido e documentado 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 de Dados e Interpretativos. Nessas circunstâncias, os documentos do Edital de Licitação 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 apropriado 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 1-4: 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 de Dados 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 documente a distribuição no espaço 3D das unidades geológicas, 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 ameaças geológicas, 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 de dados e observações.
- Interpretações, incluindo conceituações.
- Discussões.

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

1.3.4.1 Relatório de Dados

Um relatório de dados deve incluir, sem se limitar, as seguintes informações:

- 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 de Dados, 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.

1.3.4.2Relatório Interpretativo

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

- Referência aos dados em que se baseia a interpretação (os dados ou um relatório de dados).
- 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 documente 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 ameaças 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 ameaças geológicas, 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 - RGR (*GBR - Geotechnical Baseline Report*) para alocar os riscos associados ao terreno entre a contratante e a contratada. A estrutura cognitiva do MGG apoia o desenvolvimento de “referências numéricas”, “valores característicos” e “condições de referência do terreno”, que são todos componentes dos RGRs (GBRs) vinculados às cláusulas contratuais.

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 inter-operabilidade da estrutura cognitiva do MGG com outras disciplinas. Um processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D é mostrado na **Figura 1-4**, a seguir.

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.

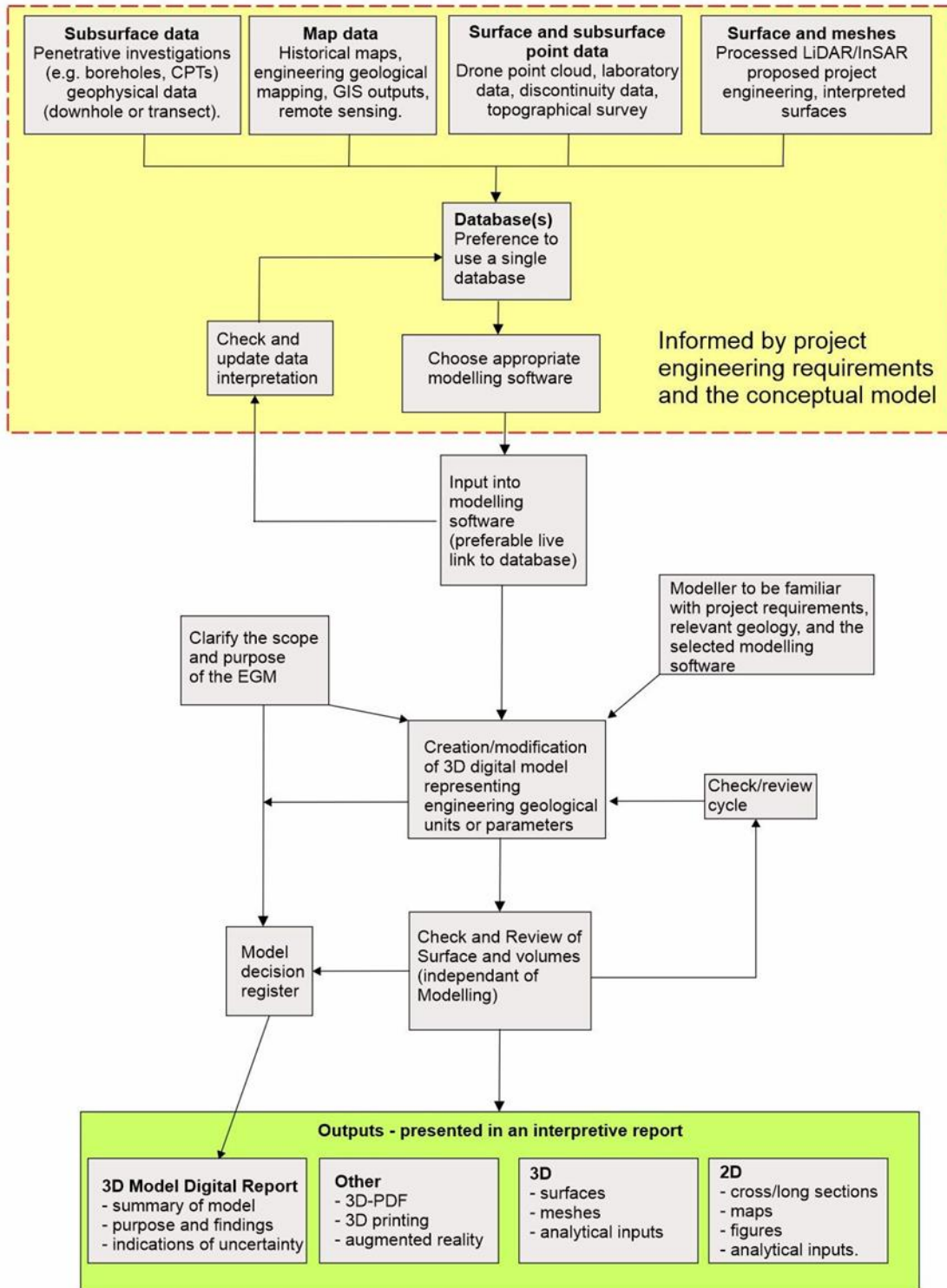


Figura 1-4: Processo típico de desenvolvimento de modelo digital 3D.

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 sem o uso de *softwares*. Plantas e seções ilustrativas são úteis para detectar "irregularidades" geológico-geotécnicas no modelo.

O checklist na **Tabela 1-5** fornece itens específicos para consideração durante a avaliação e verificação de um modelo digital 3D.

Tabela 1-5: 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 a Seção Comentário “[2.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO](#)” para mais informações.

1.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

1.4.1 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.

1.4.2 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.

1.4.3 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. – **Tabelas 1-2 e 1-3**).

- 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.

1.4.4 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.

1.4.1.1 Avaliação da confiabilidade do componente conceitual

Uma abordagem para a avaliação do componente conceitual do MGG é ilustrada na **Figura 1-5**. Esta abordagem deve ser adotada em todas as fases do projeto pelos desenvolvedores do MGG, por revisores e por painéis de especialistas.

No entanto, verificações qualitativas básicas da confiabilidade conceitual de um MGG

também devem ser feitas pelas pessoas envolvidas à medida que ele for desenvolvido. Sempre que for realizada uma auto verificação ou uma verificação interna, os resultados devem ser documentados.

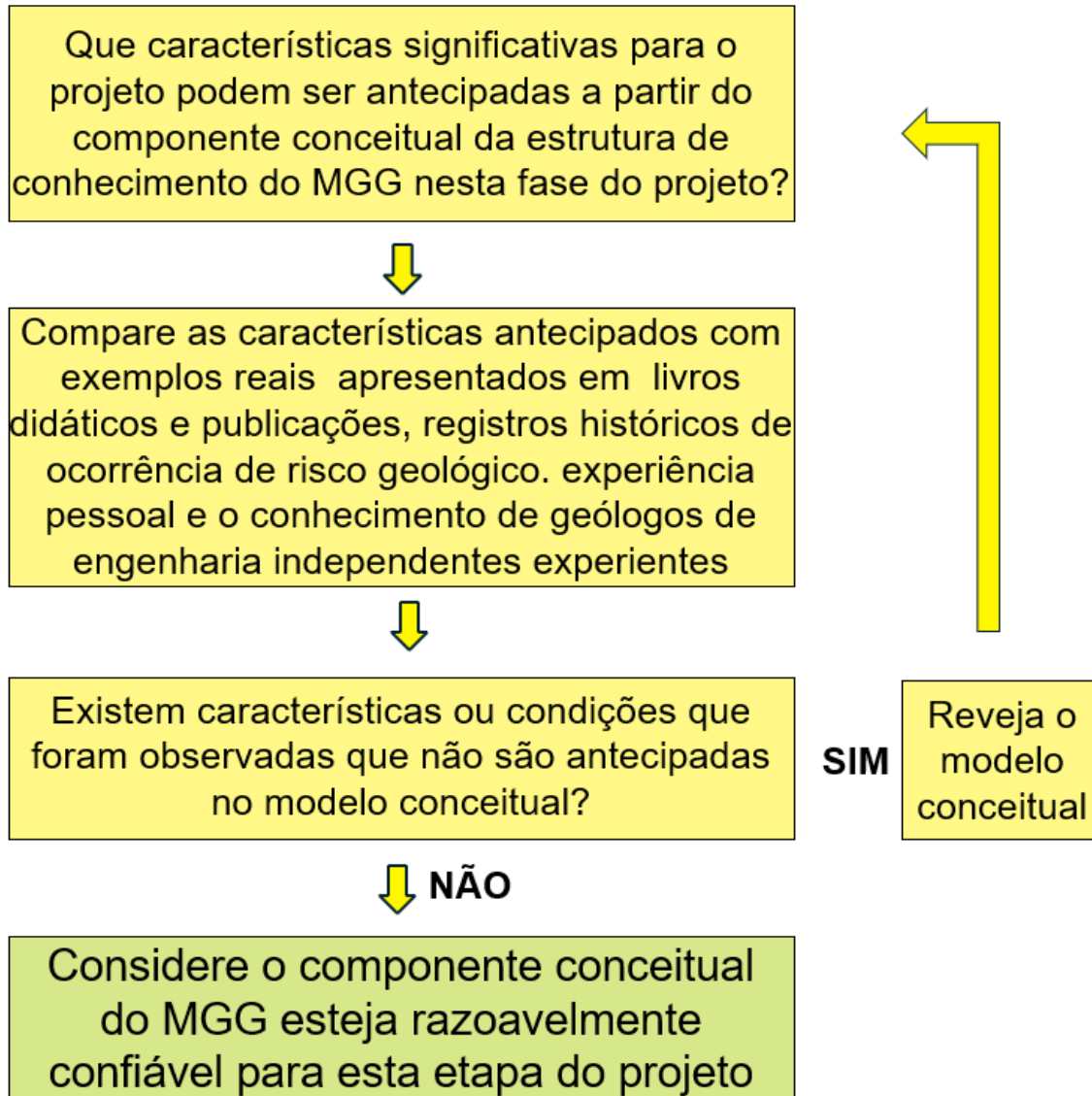


Figura 1-5: Abordagem para avaliar a confiabilidade do componente conceitual do MGG.

1.4.1.2 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.

1.4.1.3 Avaliação da confiabilidade do componente observacional - abordagens semiquantitativas

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.

1.4.1.4 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 a Seção Comentário “2.4 ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO” para mais informações.

1.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

1.5.1 Verificação da qualidade do processo de desenvolvimento do MGG

É possível obter um MGG de qualidade apropriada se estas Diretrizes forem implementadas. A **Tabela 1-6** apresenta um checklist de QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*) para verificação da aderência a estas Diretrizes.

Tabela 1-6: Processo de 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?	
Um modelo conceitual foi documentado e razoavelmente baseado no estudo documental?	
A investigação do terreno foi projetada para reduzir as incertezas identificadas no modelo conceitual?	
As observações foram obtidas através de investigações e foram documentadas com dados?	
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 ameaça geológica?	
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 (claim)?	
Se um modelo digital 3D foi desenvolvido, o checklist na Tabela 1-5 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 a Seção Comentário “2.5 GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO” para informações adicionais.



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

2.2.1 Descrição geral do processo de desenvolvimento

Uma visão geral do processo de desenvolvimento do MGG é fornecida na Figura 2-1.

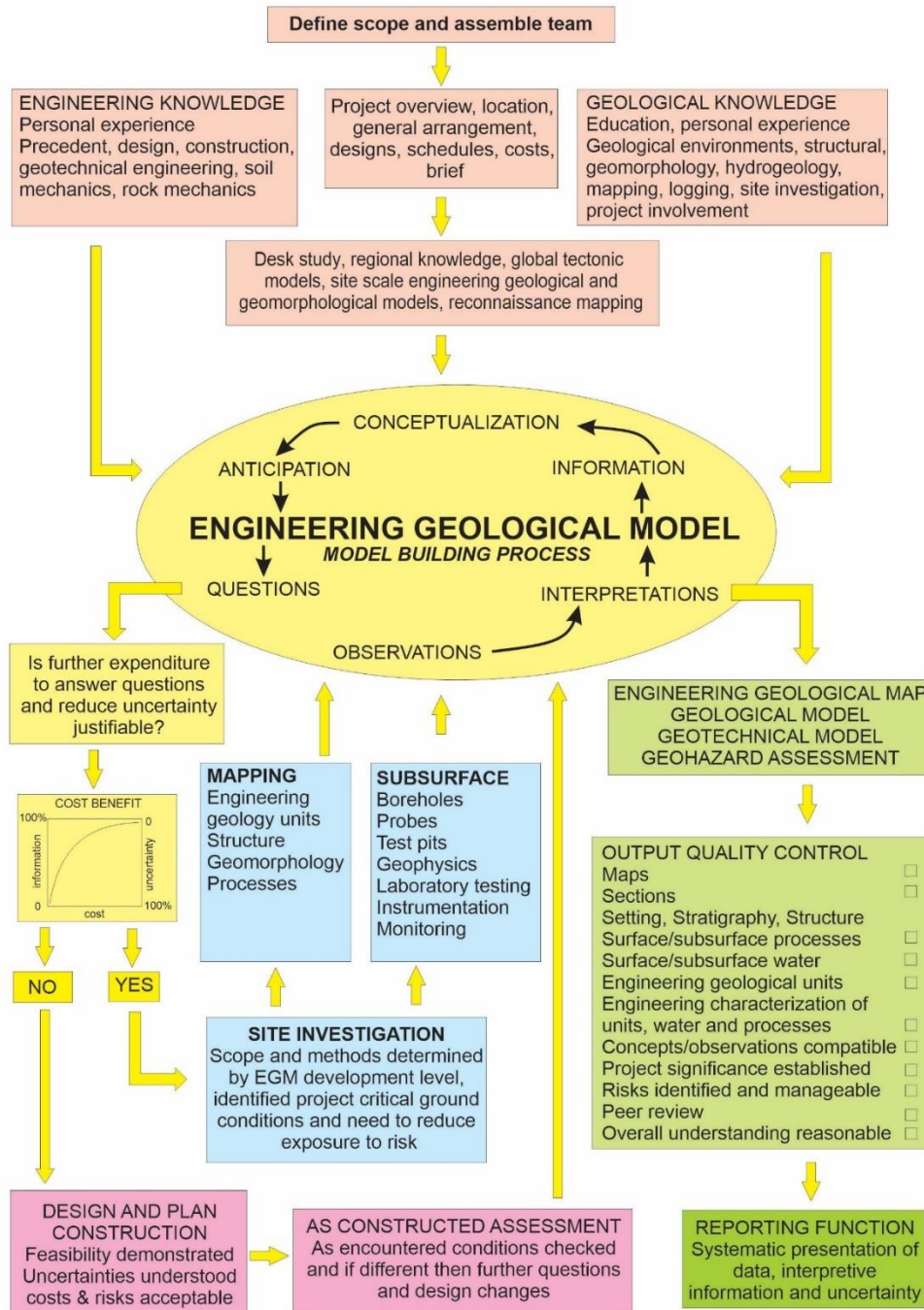


Figura 2-1 Processo de desenvolvimento do MGG.

Uma visão geral do processo de desenvolvimento do MGG para a engenharia de taludes rochosos é fornecida na Figura 2-2.

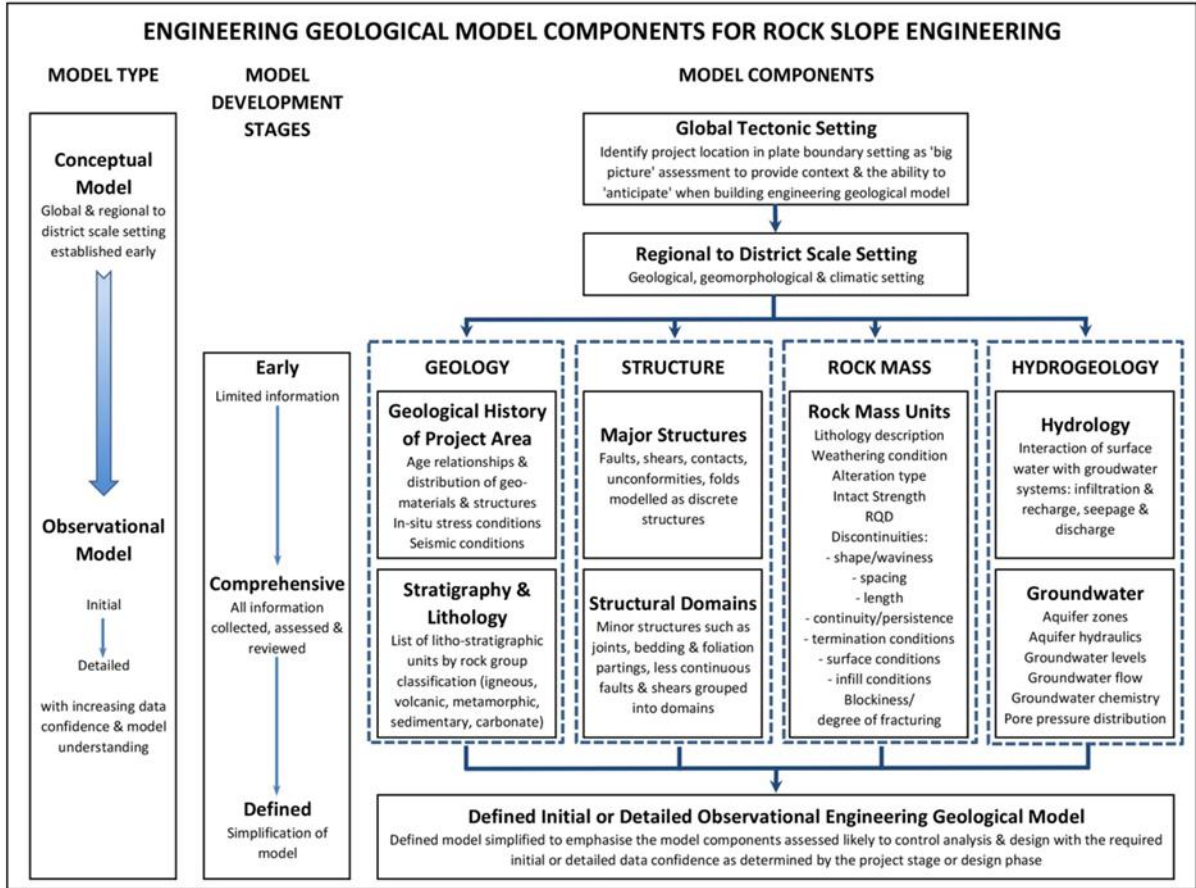


Figura 2-2 O processo de desenvolvimento do MGG para engenharia de taludes rochosos (de Eggers, M., MGG para projetos de engenharia de rochas em Baynes & Parry 2022).

Uma visão do processo de desenvolvimento do MGG para engenharia em alto mar (offshore) é fornecida na Figura 2-3.

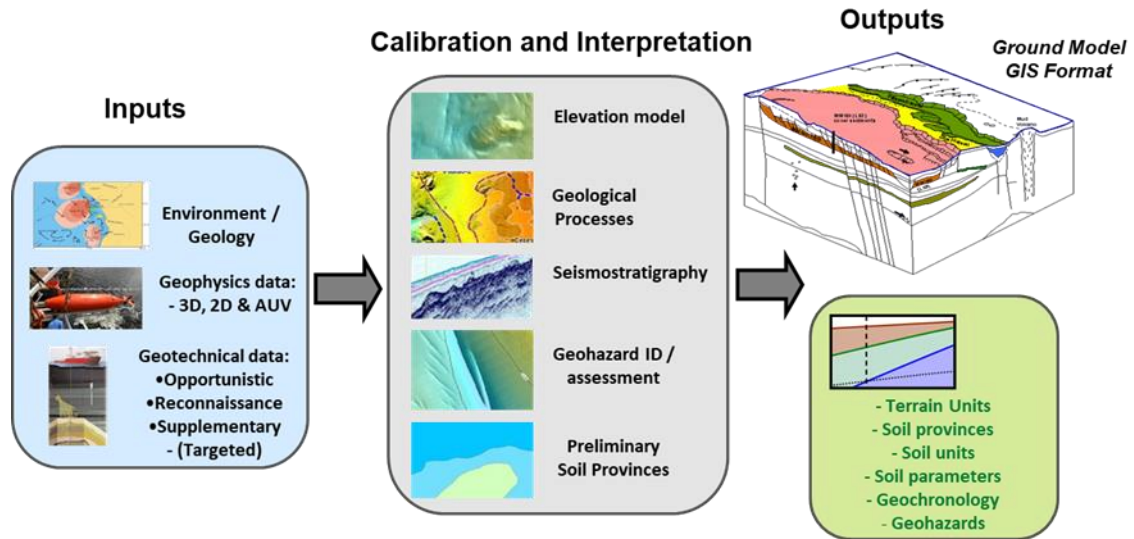


Figura 2-3 O processo de desenvolvimento de MGG para estudos offshore (de Waring, D., MGG para estudos offshore em Baynes & Parry 2022).

Uma visão do processo de desenvolvimento do MGG para engenharia de solos é fornecida na Figura 2-4.

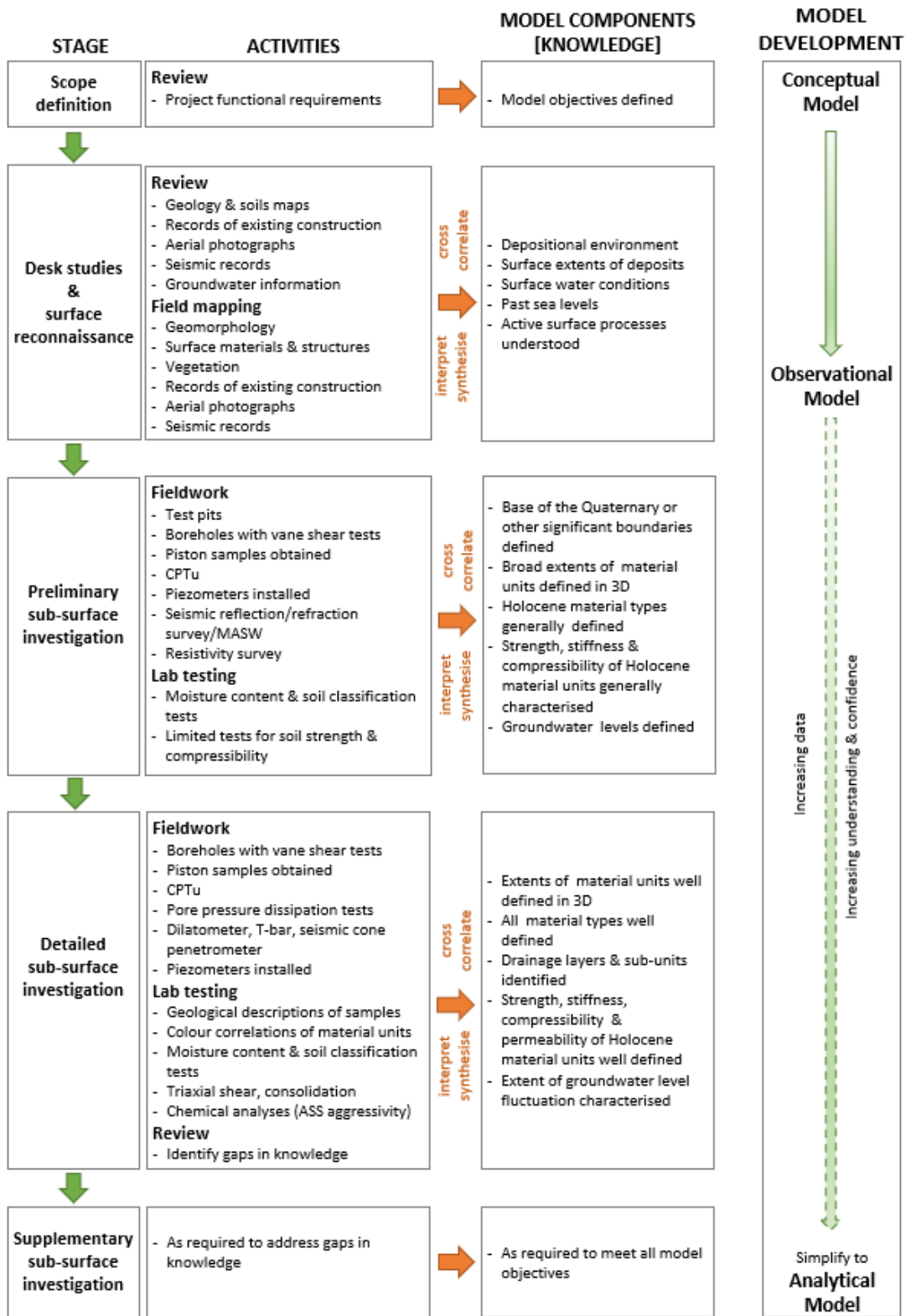


Figura 2-4 O processo de desenvolvimento de MGG para engenharia de solos (de Shipway, I., MGGs para estudos de engenharia de solo em Baynes & Parry 2022).

Uma visão do processo de desenvolvimento do MGG para pequenos projetos é fornecida na Figura 2-5.

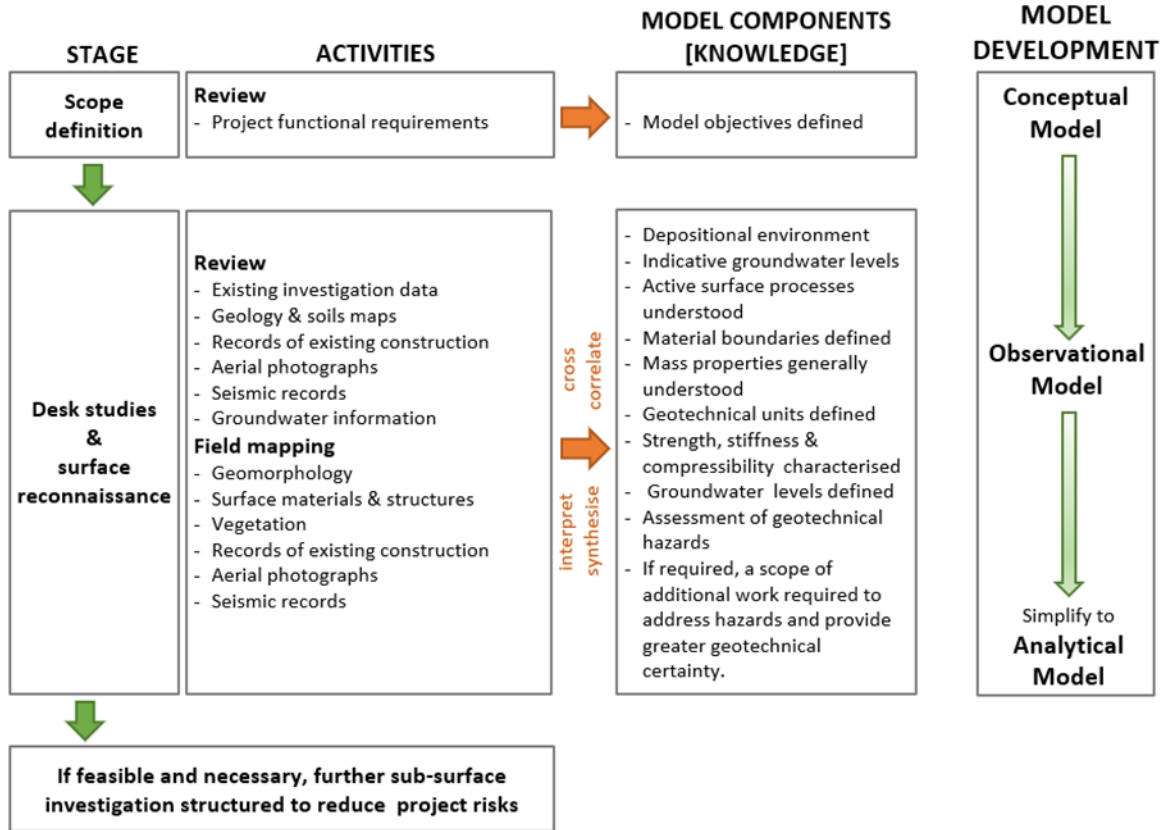


Figura 2-5: O processo de desenvolvimento do MGG para pequenos projetos (de Shipway, I., MGG para pequenos projetos em Baynes & Parry 2022).

2.2.1.1 Processo de desenvolvimento

Nenhum comentário.

2.2.1.2 Etapas iniciais

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 de engenharia, 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, ameaças 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 2-6** 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).

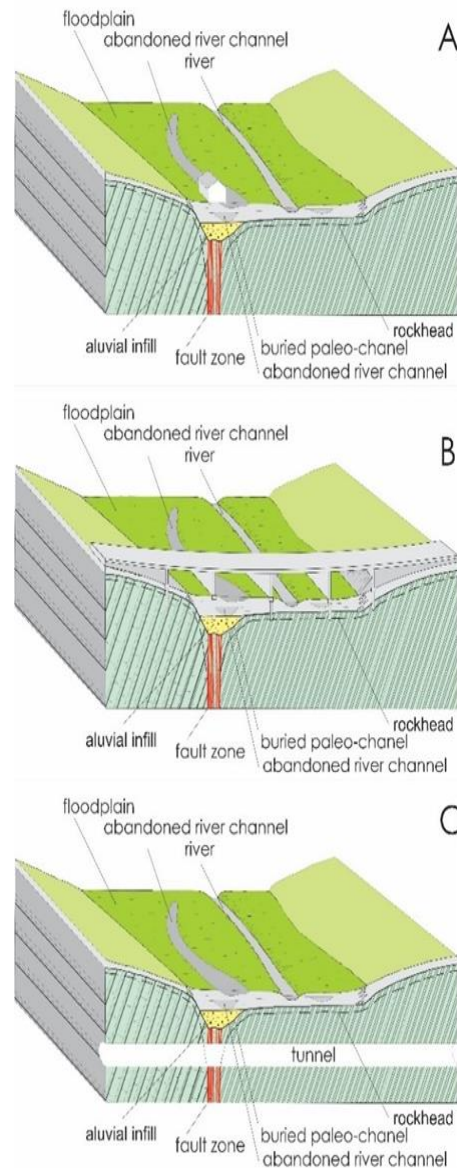


Figura 2-6: Influência do tipo de projeto no Modelo Geológico-Geotécnico. Reimpresso com permissão da *Springer Nature*. Boletim de Geologia de Engenharia e Ambiental. Parry *et al.* 2014, Modelos Geológico-Geotécnicos – uma introdução: Comissão 25 da IAEG.

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).

Tópico	Exemplos de fontes de informação
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, ameaças geológicas 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 passivas e ativas (Radar e Light Detection and Ranging), mapas de planejamento e uso do solo, relatórios de investigação do local do projeto, propriedades geotécnicas e ameaça geológica, bancos de dados, dados InSAR, mapeamento de construções anteriores
Visita inicial e reconhecimento	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeção do local e seus arredores por uma visão especializada - Inspeção detalhada do local e adjacências - Exploração para verificação do terreno
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 e apropriadamente documentados 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, eólicos, 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 (light detection and ranging) 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. Conseqüentemente, 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 Configuração 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 2-7** mostra as condições que podem ser previstas em terrenos graníticos que foram submetidos a intemperismo químico profundo.

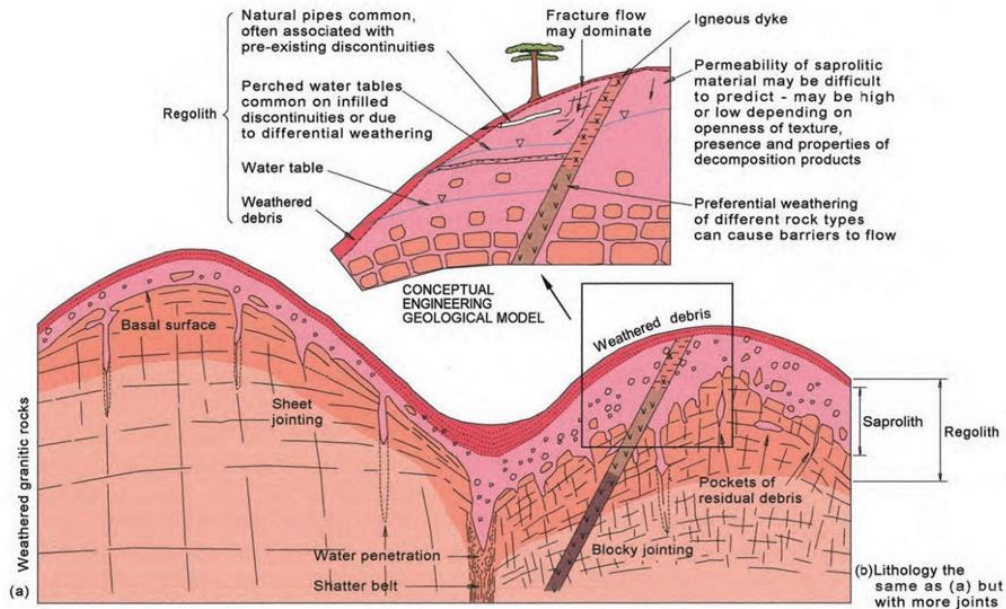


Figura 2-7: Características típicas do granito. Reproduzido de Fookes *et al.* 2015. Geomodels in engineering geology – an introduction. © Whittles Publishing 2015.

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 2-8**.

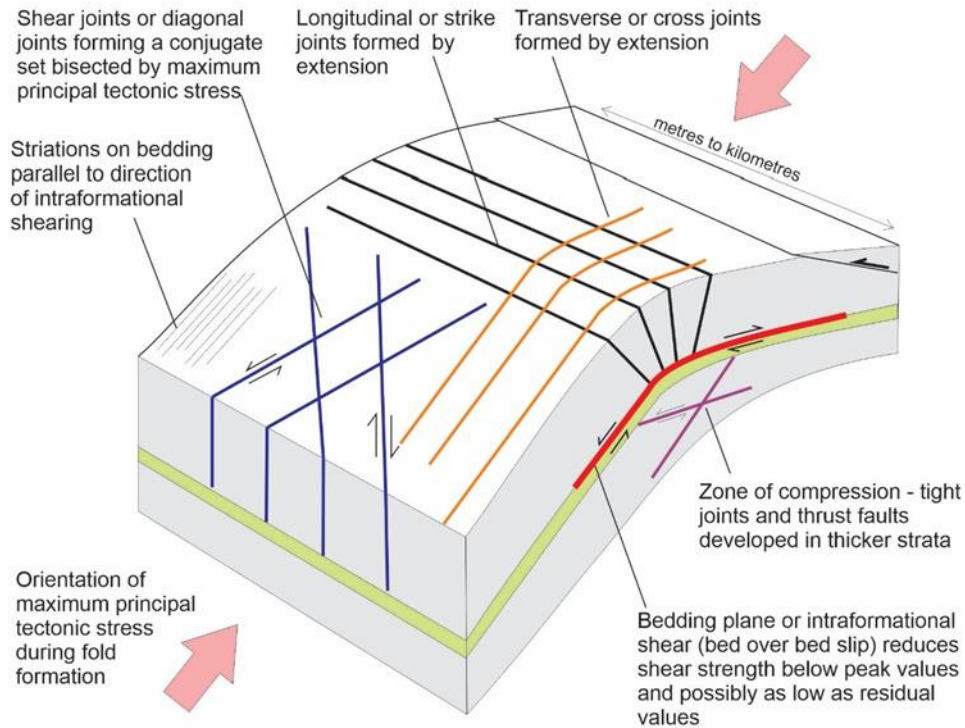


Figura 2-8: Estruturas associadas com dobras abertas (baseado em Price & Cosgrove, 1990).

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 ameaça é mostrado na **Figura 2-9**.

O conceito de palimpsesto⁶ deve ser considerado em qualquer investigação da paisagem. A maioria das paisagens é uma combinação de componentes reliquias, 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.

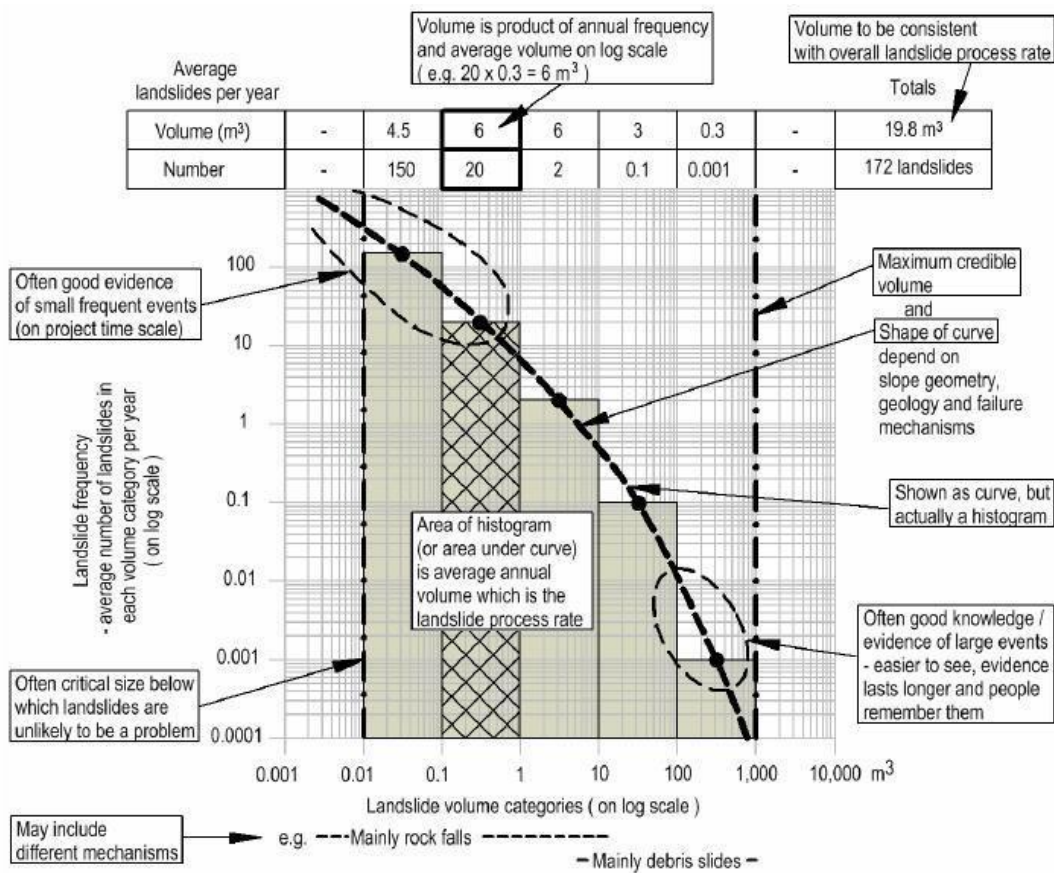


Figura 2-9: Modelo genérico de frequência de magnitude de deslizamento (Moon *et al*, 2005).

Reproduzido com permissão dos autores.

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

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. Os modelos conceituais genéricos podem ajudar na criação de modelos conceituais específicos do local. Eles também fornecem um checklist do tipo de feições e ameaças geológicas 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 2-10**.

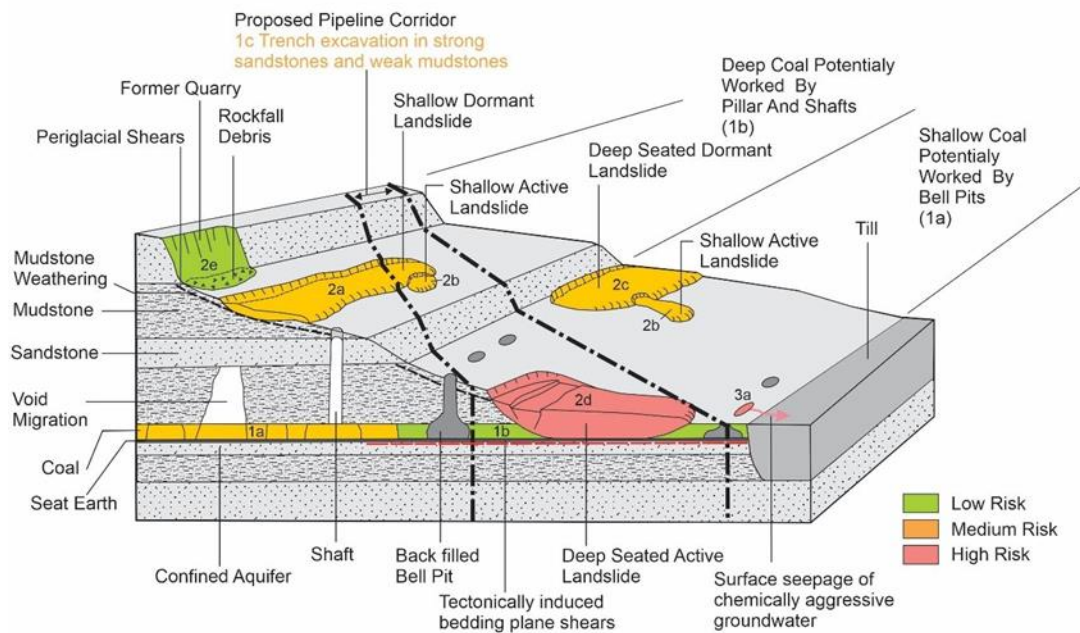


Figura 2-10: Visualização após um estudo de revisão bibliográfica do componente conceitual de um MGG para um duto que cruza terreno instável afetado por atividades de mineração e escorregamentos (Baynes *et al.* 2021).

2.2.3.4 Aquisição de observações da área do projeto por meio de investigações

Registros de dados 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.

Observadores devem interpretar o que estão observando e devem 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 observador receber o MGG antes de fazer observações adicionais, a probabilidade de ser feita uma interpretação correta aumenta significativamente. Além disso, valores atípicos ou anomalias são mais fáceis de reconhecer, documentar e avaliar.

Note 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.

⁷ Nota do tradutor: Ver também Diretrizes Normativas da ABGE

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.

2.2.3.5 Combinando modelos conceituais e modelos observacionais no MGG

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 verificada no campo.

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.

2.2.3.6 Definindo e caracterizando unidades geológico-geotécnicas

Nenhum comentário.

2.2.3.6.1 Complexidade geotécnica

Nenhum comentário.

2.2.3.7 Caracterização de engenharia

Nenhum comentário.

2.2.3.7.1 Zoneamento

Nenhum comentário.

2.2.3.8 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), o qual inclui geologia e a 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 ameaças geológicas no mar, 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.

Retorne à Seção “[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 provisionamento do projeto

Nenhum comentário.

2.3.4 Relatórios 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 de dados e um interpretativo. Os Relatórios de Dados 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 de Dados

Em alguns casos, os contratantes optam por emitir apenas informações de "dados" (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 de dados, 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

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

seus impactos nos contratos são normalmente arbitrados por uma parte independente durante as obras. O GBR pode incluir vários relatórios que são desenvolvidos progressivamente durante as negociações do contrato.

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 2-11**. Ao desenvolver mapas digitais, os contatos observados, projetados e interpretados devem ser diferenciados de maneira semelhante

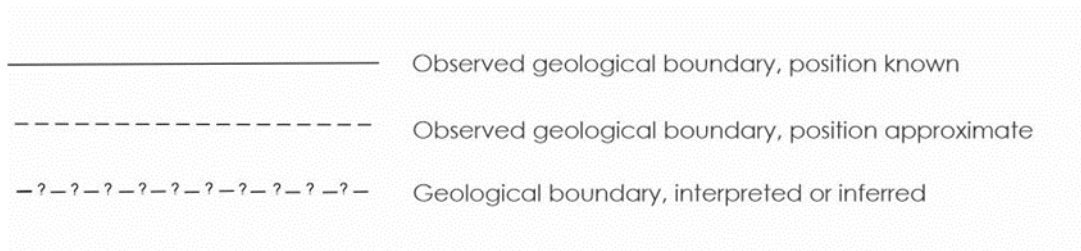


Figura 2-11: Convenções de traçado de contatos geológicos.

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. Notar que 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 2-12**.

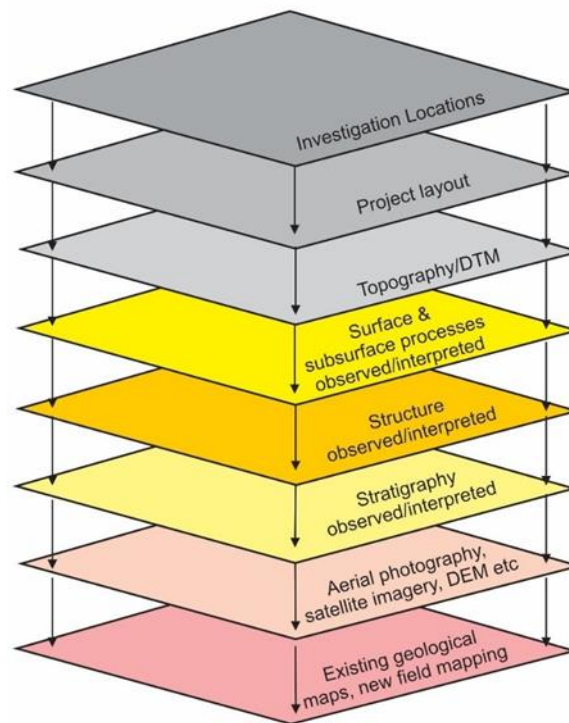


Figura 2-12: Arquitetura SIG para um Modelo Geológico-Geotécnico.

2.3.4.4.2 Seções 2D

Além de mapas, 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 /dados disponíveis para dar suporte à interpretação das unidades geológicas. Os locais das seções podem ser escolhidos pelos projetistas para explorar os efeitos de 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 em superfícies, 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 sobre a extensão espacial e escala

A extensão espacial dos mapas e plantas que documentam a estrutura de cognitiva do MGG deve considerar a área do terreno que poderá ser afetada pelo projeto (por exemplo, a área que poderia responder ao carregamento por uma estrutura), assim como a área do terreno que pode afetar o projeto (por exemplo, uma área onde um escorregamento externo possa se originar e que teria impacto no projeto). Conseqüentemente, estes podem variar 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.

2.3.4.4.4 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 - que 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 Modelagem em CAD

Métodos de desenho assistido por computador (*Computer Aided 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 2-13**.

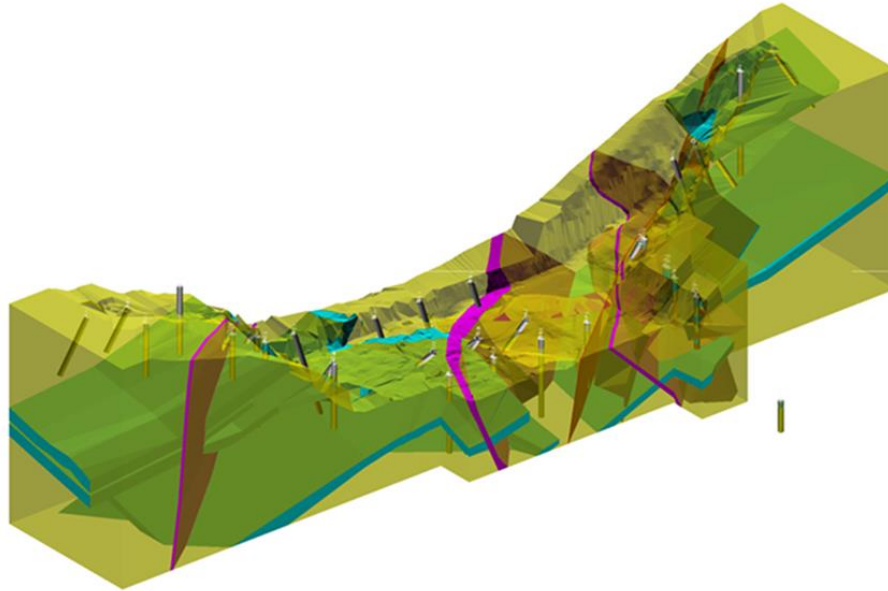


Figura 2-13: Visualização explícita da geologia da fundação de uma barragem em concreto gravidade, incluindo andesitos de mergulho suave e zonas de falha atravessadas por diques félsicos tardios (imagem fornecida por Richard Brehauss e reproduzida com sua permissão).

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 2-14**.

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.

Fig. 2.14

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.

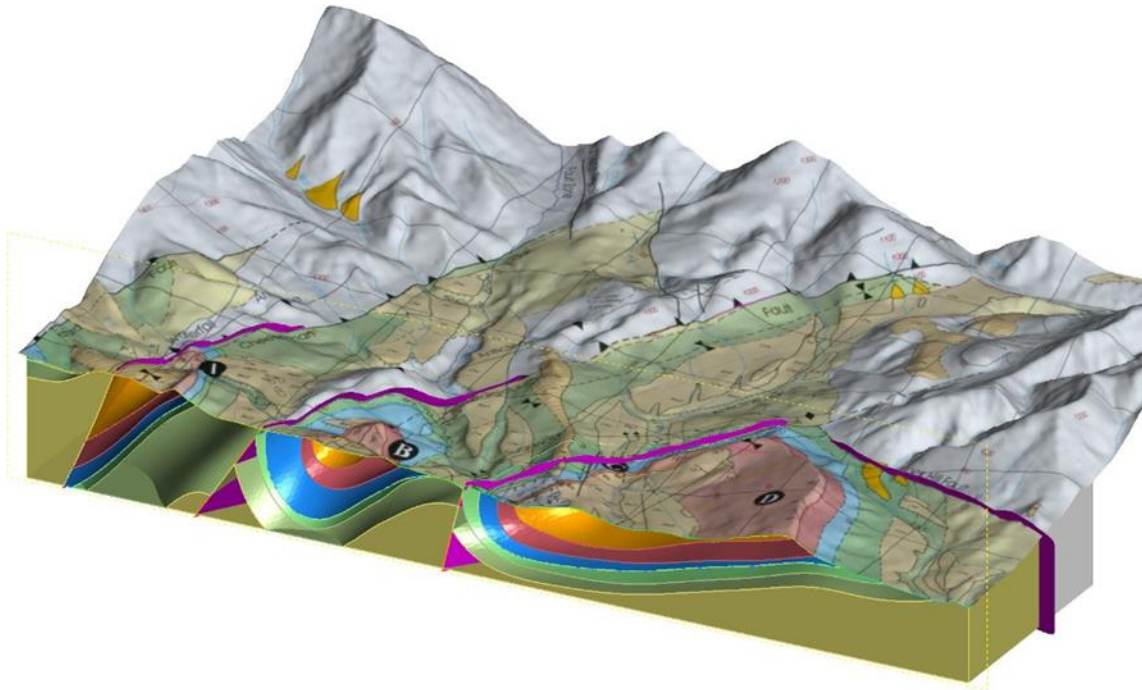


Figura 2-14: Modelo implícito desenvolvido a partir de observações de superfície usando algoritmos para definir limites em subsuperfície (imagem fornecida por Pat McLarin e reproduzida com sua permissão).

2.3.5.1.6 Modelagem 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 DFNs 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 isovalores /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, de contaminantes e de 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 observacionais 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, dados/informações que não são sujeitos 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/informações 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 de Dados impressos, ou modelos de captura de dados de planilhas/banco de dados (proforma).
- **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.
- A natureza das 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).

Retorne à Seção “1.3 MONTAGEM E COMUNICAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO -GEOTÉCNICO”.

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 2-15**).

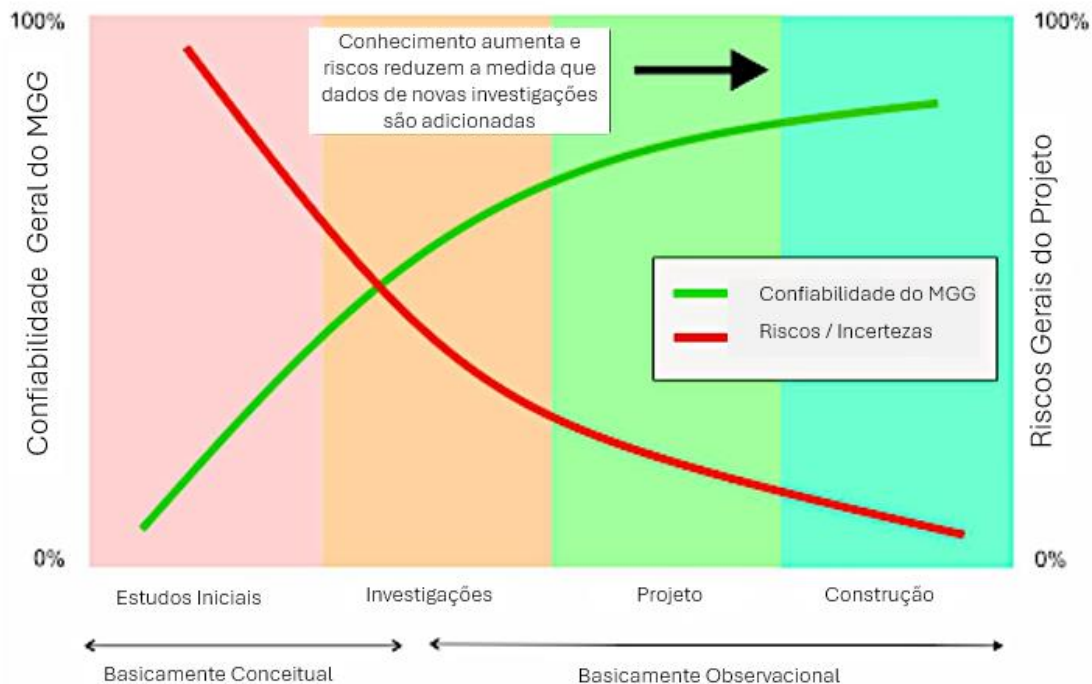


Figura 2-15: Melhorias idealizadas na confiabilidade do Modelo Geológico-Geotécnico conforme o projeto avança.

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 & Marinós 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 2-16**) 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.

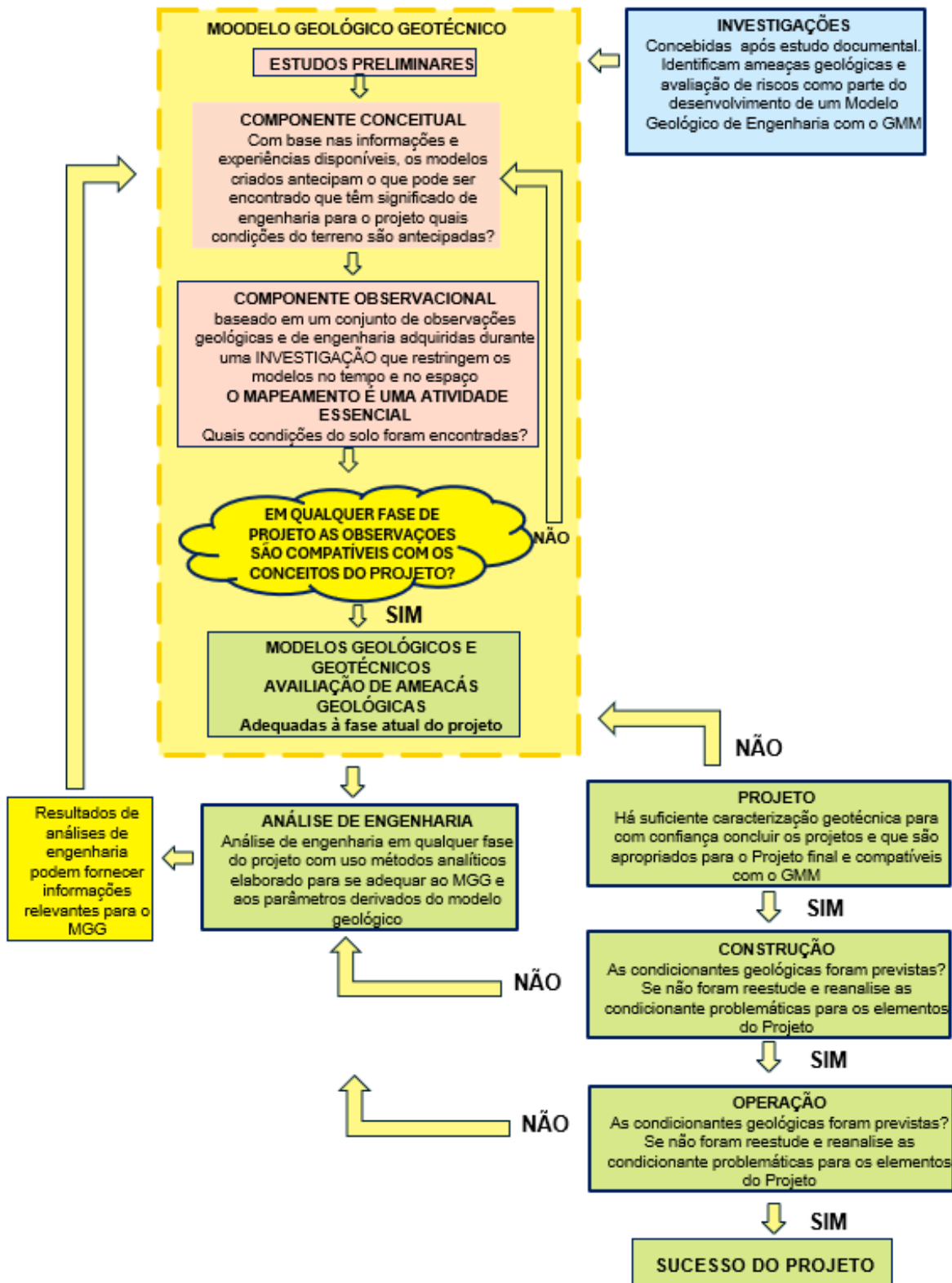


Figura 2-16: Ciclos de retroalimentação para progressivamente atualizar o Modelo Geológico-Geotécnico durante o ciclo de vida do projeto.

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.

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 como 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 auto verificado 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 auto verificação 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 2-17** mostra um diagrama de confiabilidade na forma de um mapa de calor como um exemplo de como comunicar graficamente a incerteza nas observações.

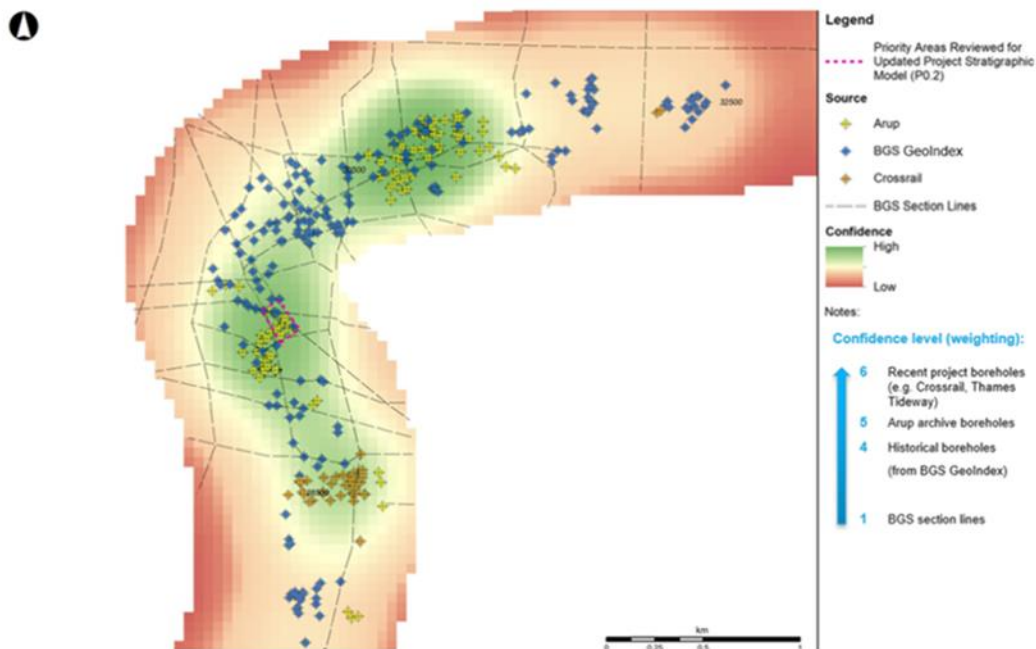


Figura 2-17: Mapa de confiança de calor para níveis estratigráficos (de Ting *et al.* 2020).

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 2-3**).

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 \pm 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 \pm 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 \pm 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.

Retornar para a Seção 1,4 “**ADMINISTRANDO A INCERTEZA DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**”.

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 2-5** 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)

Retornar à Seção 1.5 “**GARANTIA DA QUALIDADE DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**”.

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 e, quando necessário, avaliação inicial de Ameaças Geológicas existentes.
- 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.
- 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 e avaliação das Ameaças Geológicas
- 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 e Avaliação de Ameaças Geológicas 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 dos Modelos Geológico e Geotécnico e Avaliação de Ameaças geológicas confiáveis.

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 conforme construído (as built) das condições encontradas.
- Integração com o BIM.

2.6.3 Modelo Geológico-Geotécnico e as investigações no local

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 ameaças 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 2-18** mostra um diagrama de processo genérico sobre como usar a estrutura cognitiva do MGG para planejar e executar investigações no local do projeto.

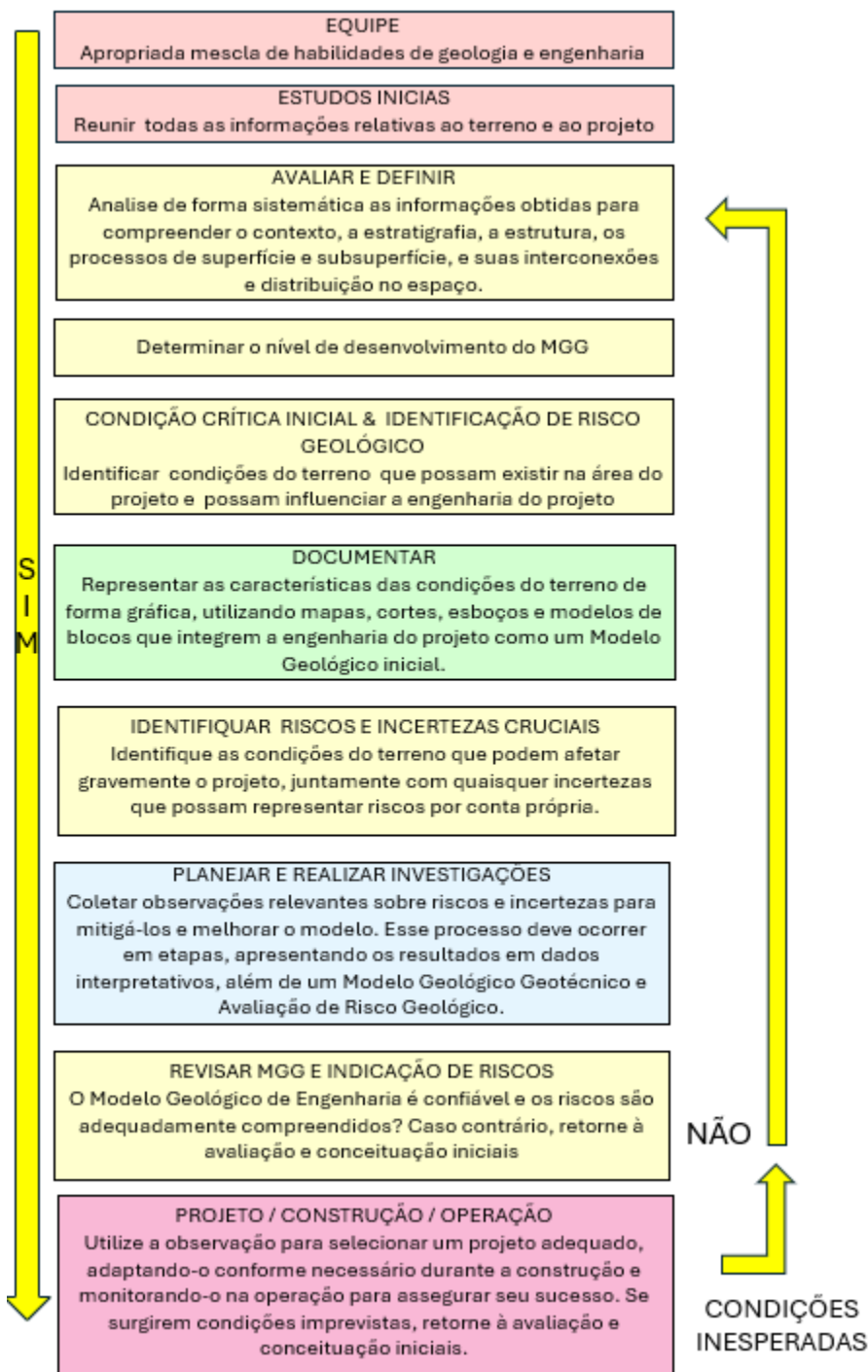


Figura 2-18: Componentes do MGG e investigação no local (segundo Baynes *et al.* 2021)

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.

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 2-19**).

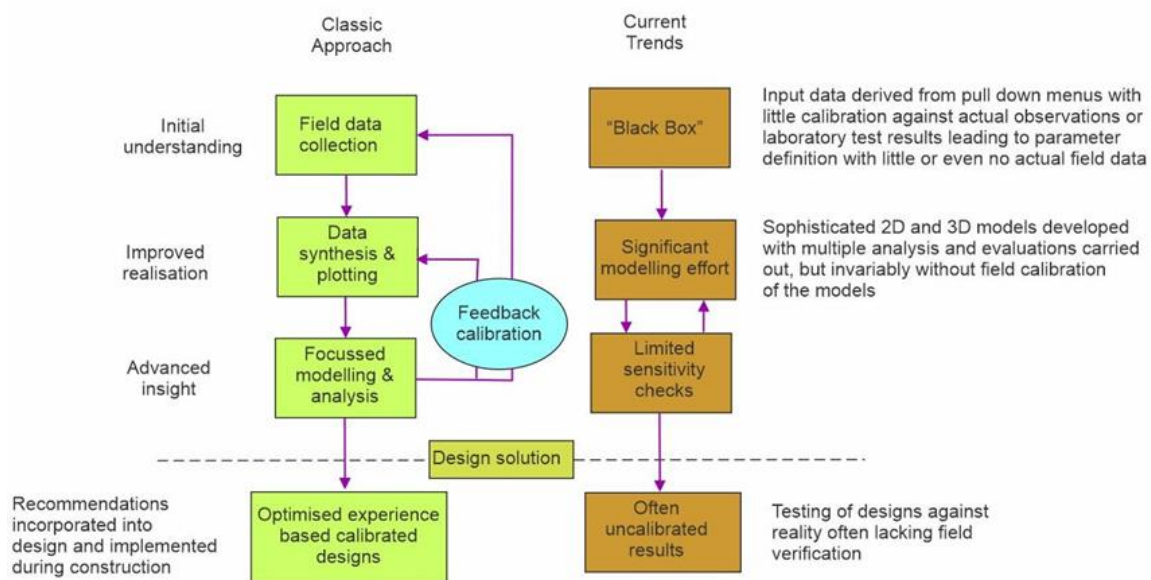


Figura 2-19: Comparação entre a abordagem clássica com a prática de projeto atual (segundo Carter 2015).

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>.

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.

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/qjgegh2020-018>

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, Shakoar, 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/qjgegh2020-029>

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.



MGG Desenvolvimentos e Aplicações August 2024

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
Lead Author	Fred Baynes	Australia
Lead Author	Steve Parry	United Kingdom
Lead Editor	Martin Culshaw	United Kingdom
Lead Editor	Jim Griffiths	United Kingdom
IAEG Editors	Yogendra Deva	India
IAEG Editors	Antonio Dematteis	Italy
IAEG Editors	Erik Wunder	Brazil
IAEG Editors	Jorge Bejerman	Argentina
IAEG Editors	Jia-Jyun Dong	Taiwan
IAEG Editors	Bill Haneberg	USA
IAEG Editors	Doug Stead	Canada
IAEG Editors	Ann Williams	New Zealand
IAEG Editors	Anthony Bowden	Australia
Contributors	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
	Eric	Wunder	Brazil
BECA provided a specific contribution to Section 3	Ann	Williams	New Zealand
	Joe	Cant	New Zealand
	David	Dobson	New Zealand
	Christoph	Kraus	New Zealand
	Alicia	Newton	New Zealand
IAEG C28 provided a specific contribution to Section 4	Antonio	Dematteis	Italy
	Wayne	Barnett	Canada
	Trevor	Carter	Canada
	Diego	Dicurzio	Italy
	Giovanna	Vessia	Italy

