3 Caracterização e classificação do maciço em estudo

Este capítulo tem por finalidade caracterizar a área de estudo e as obras de escavação a serem realizadas e classificar o maciço rochoso a ser modelado. Pretende-se primeiro contextualizar o leitor nas características da área de estudo e do projeto a ser implantado, depois é apresentada a geologia local e, em seguida, os dados recebidos. São então desenvolvidas as fases de caracterização e classificação do maciço ao longo dos furos de sondagem.

3.1. Descrição da região de estudo e do projeto a ser implantado

O objeto de estudo é o maciço rochoso onde será implantada a Casa de Força do Aproveitamento Hidrelétrico de Simplício. Esse aproveitamento se estende paralelamente ao Rio Paraíba do Sul, ao longo da divisa entre os estados do Rio de Janeiro, ao sul e Minas Gerais, a norte deste rio (Figura 3.1).

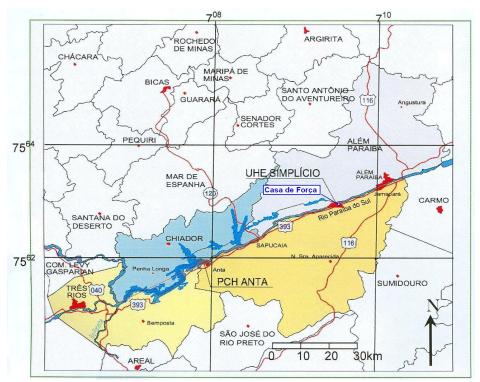


Figura 3.1 – Mapa do AHE-Simplício e vias de acesso (adaptado de Marinho, 2007).

O acesso ao AHE-Simplício se dá pelos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais, tanto pela BR-116 quanto pela BR-040 até o encontro com a BR-393, onde essa última deve ser seguida até os municípios de Três Rios, Anta, Sapucaia e Além Paraíba.

A casa de força do AHE-Simplício, destacada em azul na Figura 3.1, tem aproximadamente latitude sul de 22º e longitude oeste de 42º50', elevação do seu entorno entre 150 e 270m em relação ao nível do mar e, segundo Marinho (2007), encontra-se em local de clima úmido, com precipitação anual acima de 1200mm. O relevo é formado por morros e vales e apresenta-se bastante marcado por um alinhamento geológico regional discutido no item destinado à geologia.

Ainda em relação à Figura 3.1, para apresentar o empreendimento como um todo, é interessante esclarecer que esta obra irá represar o Rio Paraíba do Sul no município de Anta, onde parte de seu recurso hídrico será conduzido por uma série de túneis e canais até alcançar a tomada d'água, localizada no topo da elevação do maciço em estudo, apresentado em perspectiva na Figura 3.2.

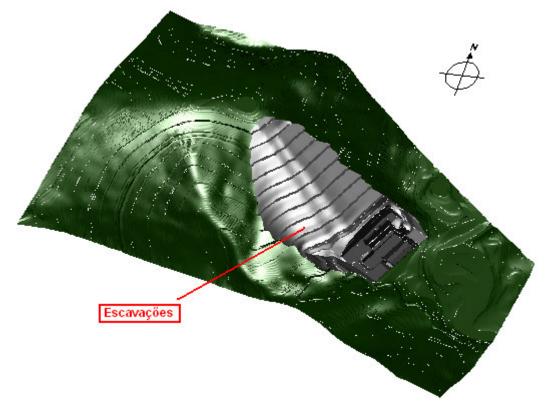


Figura 3.2 – Perspectiva elaborada em ambiente CAD 3D contendo o maciço em estudo e as escavações previstas no projeto básico.

A Figura 3.2 tem o objetivo de ilustrar a localização das escavações da casa de força e retaludamento a montante, representados pela cor cinza, em relação ao terreno natural do maciço estudado, apresentado na cor verde. Essas

escavações constituem os taludes a serem analisados, uma vez que o retaludamento à montante exerce influência direta na análise de estabilidade da casa de força.

É importante ressaltar que nesta ilustração não estão apresentados a tomada d'água, os condutos alimentadores e o canal de fuga, pois não fazem parte do objeto de estudo. Para dar continuidade então à sequência seguida pelo recurso hídrico desviado, da tomada d'água, localizada à esquerda do topo da elevação, a água segue pelos condutos forçados subterrâneos situados sob a área apresentada do retaludamento até atingirem a casa de força. A partir desta, a água é lançada no canal de fuga e assim direcionada até o rio do Peixe, que desemboca no Rio Paraíba do Sul.

Nota-se dessa forma que o talude apresentado na Figura 3.2 à jusante da casa de força é hipotético e tem apenas a função de delimitação dessa parte do empreendimento, pois nesse local estará a escavação do canal de fuga.

A Figura 3.3 apresenta o estágio da escavação na semana em que este trabalho foi defendido, no dia 13 de março de 2008, quando foi possível realizar uma visita ao local de estudo. Nota-se, comparativamente à perspectiva apresentada na Figura 2.2, gerada a partir do projeto básico de escavação da casa de força e retaludamento a montante, que o retaludamento encontra-se em fase de conclusão.



Figura 3.3 – Fotografia da escavação da casa de força e retaludamento a montante (11/03/08).

3.1.1. Geologia local

O maciço estudado encontra-se inserido na Zona de Cisalhamento de Além Paraíba, que segundo Dehler & Machado (2002) constitui a parte central da estrutura regional da divergência em leque do vale do rio Paraíba do Sul, também denominada Faixa Ribeira ou Cinturão Paraíba.

Conforme apresentado na Figura 3.4, essa faixa ou cinturão encontra-se ao sul do Cráton de São Francisco e destaca-se pelo intenso metamorfismo das rochas locais em função da presença de falhas regionais bastante expressivas na direção nordeste.

Neto *et al.* (1993) sugerem para a geometria apresentada no corte AB da Figura 3.4 uma estrutura em flor positiva, que tem por configuração central a Zona de Cisalhamento de Além Paraíba. De acordo com esses autores, os primeiros estudos para essa zona de cisalhamento tiveram início com Almeida *et al.* (1975).

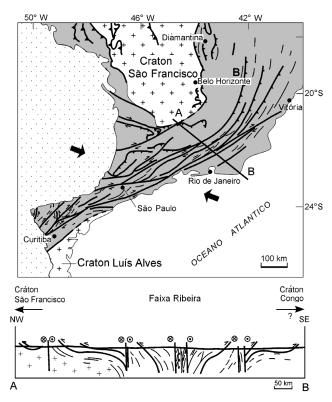


Figura 3.4 – Localização da Faixa Ribeira em Planta e Corte (modificado de Campanha & Neves, 2004).

A Zona de Cisalhamento ou Lineamento de Além Paraíba é uma zona de falha transcorrente com uma formação geológica caracterizada pelo seu relevo

expressivamente alinhado na direção aproximada de N60E, notadamente visível em cartas topográficas, fotografias aéreas e imagens de satélite, conforme pode ser observado na Figura 3.5.

Marinho (2007) descreve essa região como um gráben limitado pela Serra da Mantiqueira a noroeste e a Serra do Mar a sudeste, formando um vale tectônico que condiciona o relevo e a rede de drenagem a um padrão retilíneo e subparalelo. A drenagem encontra-se, em geral, instalada em linhas estruturais como falhas e fraturas.

Seguindo esse padrão retilíneo, o Rio Paraíba do Sul estende-se com sua calha encaixada nessa zona de falha desde o município de Vassouras até o de Muriaé (MG), comportamento apresentado na Figura 3.5 para o trecho entre Sapucaia e Além Paraíba, ou seja, o entorno do objeto de estudo.

Em função desse comportamento, Valeriano (2006) ressalta a importância dessa falha transcorrente para a implantação do aproveitamento hidrelétrico de Simplício. Segundo ele, o desenvolvimento cronológico do Lineamento de Além Paraíba está situado no contexto de processos tectônicos relacionados à orogênese brasiliana, ocorrida desde o Neoproterozóico até o Ordoviciano, ao longo da Faixa Ribeira.



Figura 3.5 – Alinhamento topográfico ENE marcante do Lineamento de Além-Paraíba entre os municípios de Além Paraíba e Sapucaia (Google Earth, 17/12/2007).

Pesquisas mais focadas sobre a região foram realizadas por Campanha (1981), que explica essa formação por um movimento transcorrente dextral de

cisalhamento dúctil de alto ângulo, da ordem de dezenas de quilômetros, onde as estruturas regionais apresentam deflexão de NNE para ENE ao se aproximarem do lineamento, formando uma faixa de até 10km de largura de rochas predominantemente blastomiloníticas.

Na região de Três Rios, localidade próxima à área de estudo, Campanha (1981) afirma que a zona de rochas blastomiloníticas possui cerca de 9km de largura paralelamente à falha. A zona principal de deformação dessa área chega a atingir uma largura de 3km, caracterizada por suas rochas com foliação vertical a sub-vertical e lineação sub-horizontal intensas. Essa zona é esquematicamente apresentada ao centro do corte AB da Figura 3.4 e em planta pela Figura 3.6.

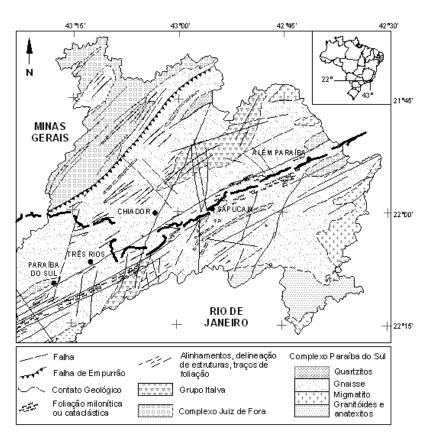


Figura 3.6 – Mapa geológico do Lineamento de Além Paraíba (modificado de FURNAS).

Também é importante ressaltar que um sistema de fraturamento muito conspícuo ocorre paralelamente à foliação. Além dessas, outras feições encontradas são as dobras, o bandamento composicional, a boudinagem de rochas como anfibolitos, as intrusões de rochas alcalinas e as zonas de cisalhamento menores com direção aproximada NS. Algumas delas podem ser observadas na Figura 3.6.

Neto *et al.* (1993) afirmam que todas as dobras existentes nessa área apresentam extremo paralelismo entre as suas charneiras, a direção da zona principal de cisalhamento e a posição vertical do plano axial.

Como litologia predominante encontram-se gnaisses (em geral paragnaisses do Complexo Paraíba do Sul e ortoganisses do Complexo Juiz de Fora, onde estão inseridas as obras de escavação da casa de força), milonitos e migmatitos. Nas zonas de transição os milonitos e gnaisses possuem feições cataclásticas menos desenvolvidas.

Para estudar com maiores detalhes o contexto da região específica onde as obras serão implantadas são apresentados os dados recebidos.

3.2. Dados recebidos

Os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos pela Divisão de Geotecnia e Segurança de Barragens de FURNAS Centrais Elétricas S.A. Alguns deles são referentes à fase de análise de viabilidade do empreendimento, ocorrida entre os anos de 1995 e 1996, os demais se referem à etapa de implantação da obra, já entre 2006 e 2007.

Esses dados contemplam as investigações de superfície e de subsuperfície, necessárias à caracterização do maciço. As investigações de superfície consistem em levantamento topográfico a laser e mapeamento geológico-estrutural ao longo da região de contorno do empreendimento. Quanto à subsuperfície, foram realizados caminhamentos geoelétricos e sondagens rotativas com amostragem de testemunhos e com realização de ensaios de perda d'água em alguns furos.

O relatório da campanha de ensaios de laboratório realizada a partir desses testemunhos também foi recebido. Para concluir o conjunto de dados, como o objetivo desse estudo era modelar o maciço da casa de força e analisar a estabilidade de seus taludes de escavação, foram então solicitadas também as plantas arquitetônicas do projeto básico do empreendimento.

3.2.1. Levantamento topográfico

O levantamento topográfico consta de perfilagem a laser aerotransportada, fornecida em arquivo digital do tipo *.dgw, contendo curvas de nível a cada metro. Esse arquivo é apresentado na Figura 3.7, onde as coordenadas são

apresentadas em duas convenções de projeção: a Universal Transversa de Mercator (UTM), e a em graus em relação à linha do equador e ao meridiano central.

Esse levantamento forneceu os dados topográficos do terreno natural utilizados para a geração da Figura 3.2, onde é observada a implantação das escavações no maciço, e para a elaboração da superfície limitante do terreno natural no modelo geomecânico.

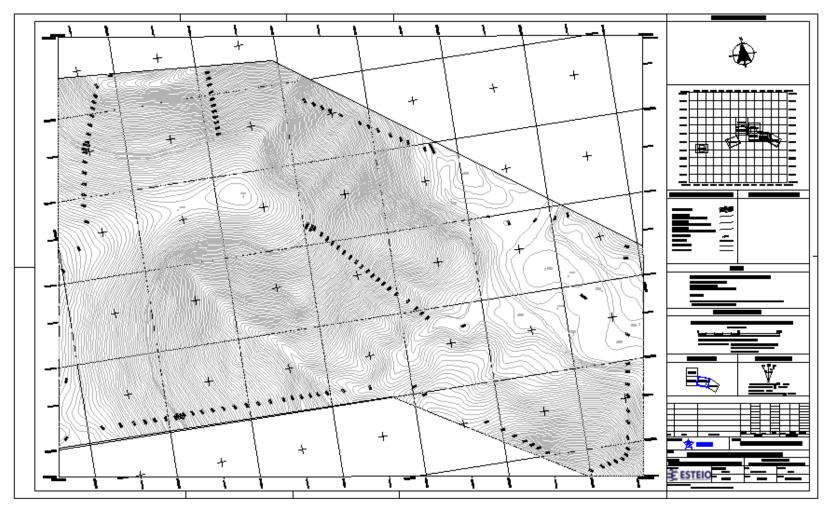


Figura 3.7 – Planta topográfica da área de contorno da casa de força do AHE-Simplício (FURNAS).

3.2.2. Projeto básico

A solicitação de plantas do projeto básico objetivou várias finalidades abaixo descritas:

- Locação da casa de força e taludes de corte em relação à topografia original do terreno;
- o Estabelecimento do limite de contorno da área de estudo e modelagem;
- Localização dos furos de sondagem situados dentro da área de estudo;
- Obtenção das atitudes dos taludes de corte para análise estrutural de estabilidade;
- o Geração da superfície de escavação para auxiliar a análise de resultados da modelagem.

Foram recebidos os projetos de escavação da casa de força e do retaludamento a montante em plantas e cortes, permitindo a confecção de toda a volumetria da escavação. Também fazem parte desse material de projeto básico algumas perspectivas da escavação da casa de força. A planta baixa de escavação do retaludamento a montante é apresentada na Figura 3.8.

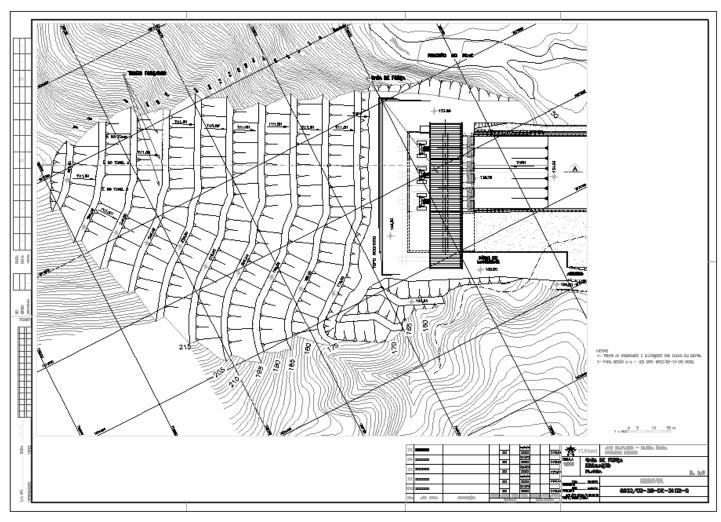


Figura 3.8 – Planta de escavação da casa de força (FURNAS).

3.2.3. Mapeamento geológico-estrutural

O Relatório Técnico de Reconhecimento Geológico-Estrutural da Área do AHE-Simplício (Valeriano, 2006) apresenta observações geológicas realizadas no local por um período de 5 dias do mês de julho de 2006.

O contexto geológico, tanto local como regional, é apresentado no relatório de forma a discorrer sobre os complexos geológicos presentes na área do empreendimento e suas principais características e feições. Para cada complexo são abordadas as unidades litoestratigráficas, os principais processos de formação e o detalhamento da estruturação dúctil e rúptil.

As observações estruturais são apresentadas em uma tabela de campo, em estereogramas de pólos das estruturas planares, em rosetas das direções das principais feições e em projeções de lineamento, conforme apresentado na Figura 3.9. Um resumo das feições estruturais da área de entorno da casa de força do AHE Simplício é apresentado na Tabela 3.3.

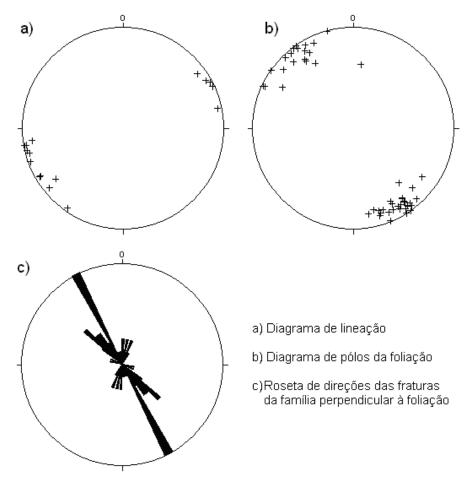


Figura 3.9 – Exemplo de estereogramas da área de Simplício (Valeriano, 2006).

Além desses dados específicos das feições estruturais, são também apresentados esboços geológicos em planta contendo o delineamento dos domínios litoestratigráficos e das principais feições estruturais (Figura 3.10).

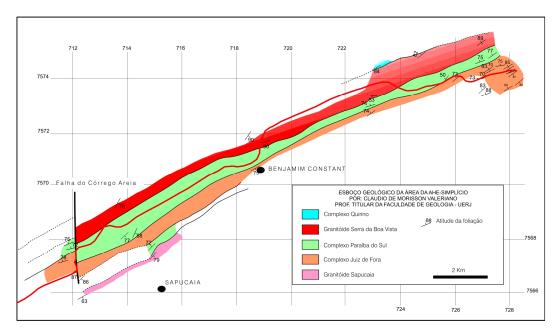


Figura 3.10 – Esboço geológico da área do AHE-Simplício (Valeriano, 2006).

Na Figura 3.10, a área de estudo encontra-se na extremidade superior direita, no complexo Juiz de Fora. Nota-se então, tanto dos estereogramas como do esboço geológico, que o maciço possui foliação subvertical marcante e lineamento sub-horizontal, decorrentes da falha transcorrente onde o Rio Paraíba do Sul se encaixa. Na Figura 3.9 também é apresentada uma direção preferencial de fraturas aproximadamente perpendiculares à foliação.

Em Valeriano (2006) ainda é citada a presença de um intenso fraturamento subvertical acompanhando a foliação. Outras informações sobre a geologia da área de estudo são apresentadas ao longo do presente trabalho.

3.2.4. Perfis de sondagem

Foram recebidos perfis descritivos de sondagem referentes a duas campanhas de investigação. A primeira delas foi realizada durante a fase de estudo de viabilidade de projeto, nos anos de 1995 a 1996. A segunda pertence ao início da implantação do empreendimento, nos anos de 2006 e 2007.

Os perfis de sondagem rotativa da primeira campanha e da segunda campanha são representados respectivamente pelas figuras Figura A1 e Figura A2 do Anexo A. Nota-se, dessas figuras, que algumas informações diferem de

uma campanha para outra, mas que as informações neles presentes constam de:

- Cabeçalho contendo o nome do local e do furo, empresa responsável pela execução, coordenadas e cota da boca, inclinação e azimute, data de início e de classificação da sondagem;
- o Perfil descritivo contendo diâmetro do furo, profundidade das manobras, porcentagem de recuperação de material, grau de decomposição (ou de alteração), grau de coerência, grau de fraturamento dos testemunhos e RQD;
- Profundidade do contato solo-rocha;
- Descrição da litologia por trechos;
- Profundidade do N.A;
- Descrição parcial da inclinação, rugosidade das paredes, alteração e presença de preenchimento das descontinuidades principais;
- o Ensaio de perda d'água para alguns furos e condutividade obtida;

3.2.5. Caminhamento geoelétrico

Foi recebido um relatório técnico das investigações geofísicas realizadas no entorno da casa de força (Marchioreto, 2006), acompanhado das plantas de locação dos caminhamentos e das seções geoelétricas geradas a partir da interpretação dos dados. Segundo esse relatório, foi empregado o método geofísico de eletrorresistividade por tomografia elétrica em arranjo dipolo-dipolo, onde se avalia a capacidade de condução de eletricidade inerente aos materiais.

Esses caminhamentos tiveram por objetivo o estudo da resistividade da subsuperfície ao longo dos caminhamentos pré-estabelecidos para a elaboração de seções eletrorresistivas de duas dimensões. A Figura 3.11 ilustra a locação dos 4 caminhamentos estabelecidos para o entorno da casa de força, onde a linha tracejada de cor cinza representa o limite da área estudada neste trabalho.

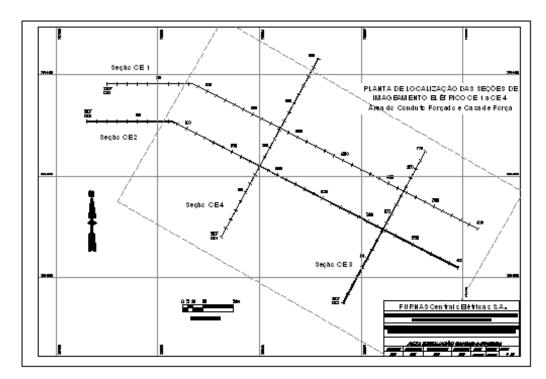


Figura 3.11 – Locação dos caminhamentos geoelétricos no entorno da casa de força (Marchioreto, 2006).

Os eletrodos foram dispostos ao longo do caminhamento conforme Figura 3.12, onde os eletrodos de envio de corrente (A e B) ficam dispostos no mesmo alinhamento que os eletrodos receptores (M e N). O arranjo dos dipolos foi definido pelos espaçamentos X = AB = MN.

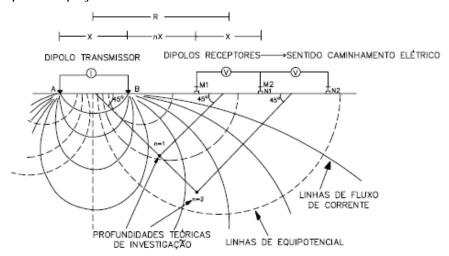


Figura 3.12 – Caminhamento geoelétrico em arranjo dipolo-dipolo (Marchioreto, 2006).

Segundo Marchioreto (2006), espaçamentos de 10 e 20 metros entre eletrodos foram utilizados. O arranjo de 10 metros forneceu uma investigação mais detalhada até 30 metros de profundidade, enquanto o de 20 metros permitiu elevar a profundidade de estudo até aproximadamente 50 metros, porém com menor detalhamento, conforme apresenta a Figura 3.13.

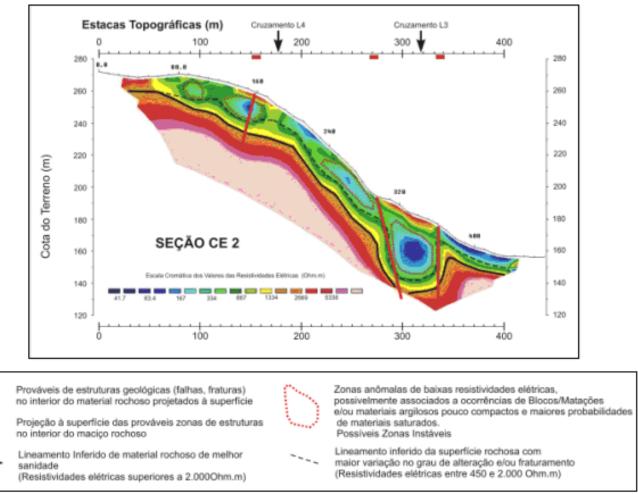


Figura 3.13 – Exemplo de seção geoelétrica obtida de caminhamento em arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 20 metros (adaptado de Marchioreto, 2006).

Essas pseudo-seções representadas pela Figura 3.13 são geradas a partir da interpretação dos dados obtidos segundo um conhecimento prévio da geologia local, já que não há um único modelo litológico adequado ao modelo de resistividade obtido. Por tal motivo, os estudos geofísicos são realizados na geotecnia como investigações complementares, e não substitutivas dos métodos de investigação direta. As investigações diretas são então utilizadas como ferramentas de ajuste desses modelos.

3.2.6. Ensaios de laboratório

Armelin & Oliveira (2007) apresentam um relatório da campanha de ensaios geomecânicos de caracterização dos testemunhos extraídos dos furos de sondagem.

O resumo desses ensaios é apresentado na Tabela 3.1, onde são indicados os ensaios, os furos de sondagem e a profundidade de amostragem dos testemunhos.

Tabela 3.1 – Campanha de ensaios geomecânicos (Adaptado de FURNAS).

Sondagem	Prof. (m)	Ensaios definidos
SM-06	14 a 15	Tração indireta e compressão uniaxial
SM-06	19 a 20	Material reserva
SM-07	24 a 26	Tração indireta e triaxial
SR-723B	10 a 12	Tração indireta e compressão uniaxial
SR-09	16 a 18	Material reserva
SR-708	50 a 52	Tração indireta e compressão uniaxial
SR-708	99 a 100	Tração indireta e compressão uniaxial
SR-708	107 a 110	Tração indireta e triaxial
SR-708	80 a 83	Cisalhamento direto nas juntas
SR-708	122 a 123	Cisalhamento direto em uma junta
SR-2003	35 a 36	Material reserva

Para ilustrar o formato de apresentação das tabelas de resultados dos ensaios acima citados foi escolhido o ensaio de compressão uniaxial, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Dele foram extraídos os valores do peso específico e da resistência à compressão uniaxial das amostras de rocha. Os demais parâmetros utilizados nesse trabalho são apresentados no decorrer das análises, nos capítulos seguintes.

	Prof.			Resist.	Def. esp.	~	V ondas
Sond.	1 101.	Amost.	h/ø		Den cop.	γ _{nat}	Vollaas
	(m)			comp. (MPa)	(mm/m)	(kN/m³)	(m/s)
		Α	2,75	34,9	Não det.	25,51	1303
SM-06	14 a 15	В	2,74	42,41	9520	25,69	1397
		С	2,72	42,41	9353	25,89	1628
		Α	2,69	105,9	3502	26,46	3320
SR-723B	10 a 12	В	2,64	115,42	3828	26,57	3480
		С	2,66	157,9	3553	26,4	3528
		Α	**	danificada	**	**	**
SR-708	50 a 52	В	2,8	155,45	2400	27,17	6193
		С	2,79	162,57	2763	26,93	6174
SR-708		Α	2,84	152,65	2356	27,15	6150
	99 a 100	В	2,85	173,32	3134	26,94	6205
		С	2.84	193.79	3137	26.37	6049

Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (Adaptado de FURNAS).

3.3. Tratamento dos dados para a caracterização e a classificação do maciço

Conforme apresentado no item de geologia local, percebe-se que o maciço estudado é bastante fraturado e possui foliação subvertical e lineação subhorizontal marcantes, o que o torna um meio bastante heterogêneo, anisotrópico e descontínuo. Porém, como não era possível entrar com o sistema de fraturamento no PETRELTM, optou-se por tentar representar o maciço como um contínuo equivalente.

Adotou-se o sistema de classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1989), de forma que fosse possível obter os parâmetros de resistência c e ϕ do maciço. Sabe-se, de Romana *et al.* (2003), que uma melhor classificação para a avaliação direta da qualidade do maciço em relação à estabilidade dos taludes de corte pode ser obtida de Romana (1985). Contudo, o interesse do presente trabalho se constitui em obter a distribuição de c e ϕ ao longo do maciço para utilização como parâmetros de entrada em programas de análise de estabilidade estática que permitam essa variação pontual dos parâmetros de resistência. Dessa forma, entendeu-se que o RMR seria o modelo mais adequado.

O maciço foi então classificado ao longo dos furos de sondagem contidos na área de estudo para a posterior entrada e distribuição espacial dos dados no PETRELTM.

3.3.1. Determinação dos limites da área de estudo

Como o objeto de estudo era o entorno da casa de força, a delimitação da área de modelagem buscou abranger todo o entorno das suas escavações, inclusive o retaludamento a montante, essencial para a posterior análise de estabilidade dos taludes de corte. Buscou-se também um paralelismo com as seções geoelétricas para tentar comparar o resultado da modelagem com as informações fornecidas por essas seções.

Era de interesse, contudo, que a máxima quantidade de furos de sondagem fosse localizada no interior desse limite, de forma a garantir uma melhor cobertura das informações e alcançar uma boa modelagem espacial. Para definir essa abrangência, era necessário primeiro posicionar os furos de sondagem em uma planta topográfica que contivesse a superfície do terreno e o projeto de escavação.

Iniciou-se então pelo vínculo entre os dados de escavação do projeto básico e a geometria da superfície do terreno, devidamente posicionados espacialmente em planta e em volume no ambiente AutoCAD[©]. Para essa etapa foram utilizados os dados do projeto básico em conjunto com a planta topográfica da superfície do terreno natural. Uma vista em perspectiva desse conjunto pode ser visualizada na Figura 3.2.

Posteriormente, de posse dos perfis de sondagem das duas campanhas realizadas ao logo do empreendimento, elaborou-se uma planilha resumo da locação dos furos de sondagem descritos como pertencentes à casa de força e aos condutos forçados. Nessa planilha foram lançados as coordenadas de boca, a inclinação, o azimute e o comprimento dos furos.

Uma vez locados os furos na planta do terreno escavado, foi então escolhida a área de abrangência segundo os critérios acima descritos. Ao todo foram 17 furos de sondagem rotativa contidos na área de estudo, 10 deles da campanha de análise de viabilidade de projeto (SR-01, SR-02, SR-2A, SR-03, SR-15, SR-16, SR-17, SR-19, SR-20 e SR-22) e 7 da campanha recente (SR-708, SR-2000, SR-2001, SR-2002, SR-2003, SR-2004 E SR-3001).

A Figura 3.14 apresenta o delineamento em planta da área de modelagem, onde constam as curvas de nível, a geometria da escavação e os furos de sondagem devidamente locados.

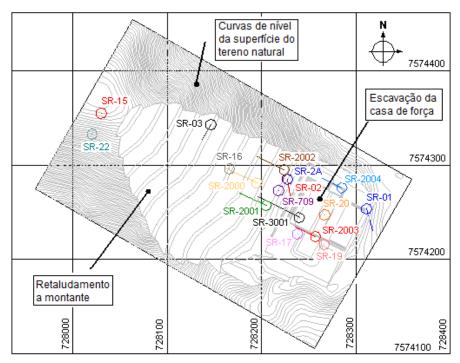


Figura 3.14 – Limites da área de estudo e escavações previstas.

Uma vez determinados os limites laterais da área de estudo e identificados os seus furos de sondagem, deu-se início à fase de caracterização e classificação do maciço.

3.3.2. Caracterização e classificação do maciço

Conforme apresentado no livro da ABGE - Geologia de Engenharia (1998) é a caracterização que evidencia os atributos que condicionam o comportamento geomecânico do meio rochoso, isolada ou conjuntamente, perante as solicitações que a obra impõe. Basicamente, para caracterizar um maciço rochoso, é preciso descrever as propriedades da rocha intacta e das descontinuidades nele presentes, entendendo-se por rocha intacta o material rochoso entre as descontinuidades.

Os critérios de caracterização de maciços rochosos podem ser observados em maiores detalhes em publicações como ABGE-Geologia de Engenharia (1989), ISRM (1978) e Goodman (1989).

A caracterização aqui utilizada visou exclusivamente a classificação do maciço no sistema RMR-1989 e a descrição do seu grau de fraturamento. Optou-se então por dar início a essa caracterização pela definição das famílias de fraturas pertencentes ao sistema de fraturamento e suas respectivas características.

3.3.2.1. Estudo do sistema de fraturamento do maciço

As características das famílias de fraturas descritas no levantamento geológico-estrutural foram utilizadas para ajudar a identificá-las na descrição dos perfis de sondagem, uma vez que as sondagens recebidas não eram orientadas.

Do relatório de Valeriano (2006), onde consta a tabela de campo com as leituras das feições estruturais, foram selecionadas apenas as leituras realizadas em regiões próximas da casa de força, visto que a tabela original é composta de leituras ao longo de todo o caminhamento realizado no AHE-Simplício. Esta síntese de dados é observada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Leituras de campo de feições estruturais efetuadas nos arredores da casa de força.

ID	Mergulho	Dir. Mergulho	Tipo
1	75	350	foliação
2	75	340	foliação
3	78	330	foliação
4	78	325	foliação
5	78	328	foliação
6	81	330	foliação
7	77	342	foliação
8	85	323	foliação
9	86	145	foliação
10	86	140	foliação
11	89	328	foliação
12	82	58	fratura
13	89	100	fratura
14	88	43	fratura
15	75	40	fratura
16	8	265	fratura
17	13	242	fratura
18	26	227	fratura
19	16	300	fratura
20	24	298	fratura
21	84	50	fratura
22	88	240	fratura
23	82	35	fratura
24	89	20	fratura
25	43	276	fratura
26	48	264	fratura
27	41	273	fratura
28	46	273	fratura
29	85	43	fratura
30	70	63	fratura
31	83	42	fratura

Sabe-se, do relatório de Valeriano (2006), que há uma família de fraturas bastante conspícua e onipresente em paralelo à foliação regional subvertical N60E, que em regiões onde a rocha se apresenta mais alterada pode atingir até mesmo a ordem de uma fratura por centímetro. Logo, as leituras descritas como foliação foram adotadas para estimar o plano médio dessa família de fraturas.

Para encontrar o plano médio dessas famílias de fraturas, as feições estruturais apresentadas na Tabela 3.3 foram lançadas em projeções estereográficas no DIPS[®] e a concentração de pólos foi analisada segundo a rede curvilinear de contagem de células de Denness. Dessa contagem o programa retorna uma projeção em escala de cores ou de tons de cinza representando a densidade do contorno dos pólos, conforme Figura 3.15.

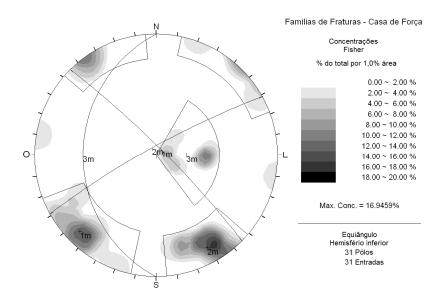


Figura 3.15 – Estimativa de planos médios de fraturamento no entorno da casa de força.

Nessa mesma figura são apresentadas as envoltórias traçadas ao redor das áreas contornadas e os planos médios de cada família de fratura estatisticamente estimada em função da densidade e da localização dos pólos dentro desses limites. Maiores detalhes sobre essa técnica de estimativa são apresentados em Hoek & Bray (1981) e no manual do programa Dips[©].

A orientação das três famílias de fraturas encontradas é compilada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Orientação das famílias componentes do sistema de fraturamento da casa de força.

Família	nília Mergulho Dir. Mergulho		Direção
1	83°	045°	315°
2	82°	331 °	61°
3	28°	270°	180°

Da Figura 3.15 e da Tabela 3.4 nota-se a presença de duas famílias de fraturas subverticais aproximadamente perpendiculares entre si e uma terceira família de fraturas quase sub-horizontal. Valeriano (2006) cita a presença de uma família de fraturas perpendicular à foliação com paredes lisas, abertas e planas e com comprimento persistente. De acordo com a orientação da Família 1, tais características só podem ser atribuídas a ela.

A família 2 é paralela à foliação e, conforme apresentado anteriormente, é a responsável pelas maiores intensidades de fraturamento. Pelas características geológicas locais, imaginava-se que a família 2, por ser paralela à foliação, também seria lisa. Contudo, nenhuma evidência foi encontrada no relatório geológico-estrutural, o que levou a sua consideração como uma família rugosa, assim como a família 3. Posteriormente, quando da conclusão deste trabalho, foi possível realizar uma visita à área de estudo, onde constatou-se que as fraturas realmente eram lisas, conforme Figura 3.16. Tal comportamento pode resultar em resultados de análise de estabilidade levemente superestimados.



Figura 3.16 – Disposição das famílias de fraturas na área da casa de força (11/03/2008).

Determinadas as orientações e características das descontinuidades presentes, deu-se início à classificação do maciço.

3.3.2.2. Classificação do maciço rochoso no sistema RMR-1989

A descrição dos dados foi realizada ao longo dos furos, a partir do contato solo-rocha, em planilhas do EXCEL[®]. O objetivo era encontrar os pesos de cada trecho do perfil segundo os seis parâmetros de classificação do sistema RMR-1989 para obter parâmetros de um meio contínuo equivalente ao maciço. A

soma desses pesos pode variar de 0, para um maciço muito pobre, a 100, para um maciço muito bom. Ao todo são cinco classes limitadas a cada 20 pontos.

As Tabelas Tabela B1a) e Tabela B1b) do Anexo B apresentam os critérios de classificação do maciço no sistema RMR-1989, resumidos abaixo:

- 1. Resistência à compressão uniaxial;
- 2. RQD:
- 3. Espaçamento;
- 4. Condição das descontinuidades;
- 5. Orientação das descontinuidades;
- 6. Água subterrânea.

Para a classificação do maciço foram propositalmente atribuídos pesos máximos aos itens de orientação das descontinuidades e de água subterrânea. Sabe-se que desta forma o valor de RMR é elevado e, consequentemente, os parâmetros c e ϕ a partir dele estimados, também. Tal procedimento foi adotado para evitar dupla penalização do maciço em relação a esses itens, visto que o presente trabalho utiliza a classificação geomecânica apenas para obter os parâmetros de resistência para realizar as análises de estabilidade estruturais e estáticas.

Durante estas análises esses dois itens foram considerados. A orientação das fraturas foi observada nas análises estereográficas estruturais, onde foram verificados os possíveis taludes com risco de ruptura, já a água subterrânea foi considerada nas análises estáticas pelo lançamento do nível d'água. Dessa forma a orientação das descontinuidades recebeu peso 0 e a água subterrânea recebeu peso 15 ao longo de todo o comprimento dos furos. Os demais parâmetros foram estudados conforme apresentado a seguir:

1. Resistência à compressão uniaxial

Vaz (1996) afirma que as propriedades da rocha que determinam sua resistência à alteração estão intimamente ligadas àquelas que definem sua resistência mecânica, tornando esses dois tipos de resistência diretamente proporcionais. Esse autor estudou então mais de 2.000 ensaios de compressão uniaxial de rochas de diversas litologias e comparou a perda de resistência com o grau de alteração.

Para o desenvolvimento do presente trabalho se dispunha de apenas poucos resultados de ensaios de resistência à compressão uniaxial, apresentados na Tabela 3.2. Dessa forma optou-se por adotar um critério similar ao de Vaz (1996), onde a resistência à compressão uniaxial foi

parametrizada nas classes de peso do RMR em função dos graus de alteração e também de coerência.

A Tabela 3.5 apresenta a comparação entre a faixa de resistência e os graus de alteração e coerência apresentados pelos testemunhos ensaiados.

Tabela 3.5 – Comparação entre resistência à compressão uniaxial, alteração e coerência de testemunhos de rocha gnáissica.

Alteração	Coerência	faixa de σci (MPa)
D3 a D4	C2 a C4	25 <♂ ci <50
A1	C1	100 <o ci < 250

É importante ressaltar que a litologia dessas amostras não foi considerada como fator de classificação por dois motivos: um deles é a incompatibilidade do detalhamento da litologia nos perfis das diferentes campanhas; o outro é a localização integral da região modelada na área apresentada por Valeriano (2006) como composta pelos ortognaisses granulíticos do complexo Juiz de Fora, ou seja, uma única litologia.

Estabelecido o critério de caracterização da resistência, a Tabela 3.5 foi então utilizada para estimar as faixas de resistência em que se encontravam as possíveis combinações de alteração e coerência. A elas foram associados os devidos pesos do RMR-1989 sugeridos na Tabela B1a) e encontrada a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Atribuição de faixas de pesos do RMR para a resistência à compressão uniaxial a partir dos níveis de alteração e coerência.

Alt./Coer.	C1	C2	C3	C4
A 1	12	7	4	4
A2	12	7	4	4
A3	7	4	4	4
A4	7	4	4	4
A 5	4	4	2	2

2. RQD – Rock Quality Designation

O valor desse índice de qualidade da rocha proposto por Deere *et al.* (1967) é descrito nos perfis de sondagem da campanha de 2006 a 2007, porém não o é pela investigação da fase de estudos de viabilidade, 1994 a 1995. Para contemplar tal parâmetro de classificação foram buscadas alternativas de estimativas.

Na literatura foi encontrada uma correlação estimada por Priest & Hudson (1981) entre o RQD e o número de fraturas por metro em função de dados

de vários locais de amostragem. Contudo, optou-se por elaborar uma estimativa própria com os dados do local de estudo.

Para obter então o RQD para os perfis antigos buscou-se estudar a correlação entre o RQD e o número de fraturas por metro da campanha recente, que possui ambas as informações ao longo dos perfis. Para tal procedimento foi necessário primeiro estabelecer um valor para esse número de fraturas por metro, já que esse dado é informado apenas por classes com um determinado intervalo de valores.

Adotou-se então um valor intermediário para esses graus de fraturamento buscando um número concreto para a estimativa da correlação e, paralelamente, buscando uma forma de atribuí-la à campanha antiga, visto que os intervalos de fraturamento atribuídos a cada classe diferem para os perfis das duas campanhas recebidas. Esses valores intermediários adotados são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Número de fraturas por metro, adotado em função do grau de fraturamento.

Grau de fraturamento								
94/95	95 Frat/m Adotado 06/07 Frat/m Adotac							
F1	0 a 1	1	F1	0 a 1	1			
F2	1 a 4	3	F2	2 a 5	4			
F3	5 a 9	7	F3	6 a 10	8			
F4	10 a 15	13	F4	11 a 20	16			
F5	>15	18	F5	>20	23			

De posse desses valores de fraturamento foi então gerado o gráfico da Figura 3.17, que estuda uma linha de tendência entre os valores de fraturamento e RQD.

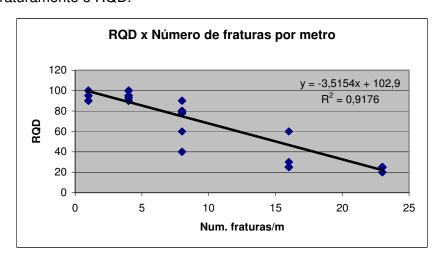


Figura 3.17 – Correlação entre RQD e número de faturas por metro .

Obteve-se então a correlação entre o RQD e o grau de fraturamento:

$$RQD = -3,5154 f + 102,9 \tag{0.1}$$

onde f é o número de fraturas por metro.

Para a definição dessa correlação os furos de sondagem SR- 2002 e SR- 2004 não foram utilizados, uma vez que apresentavam comportamento instável para o valor de RQD. Estima-se que tal instabilidade se deva à existência de camadas pouco espessas e muito fraturadas que reduzem o valor do RQD de todo o trecho.

Definida então a correlação entre RQD e o número de fraturas por metro, foi calculado o valor de RQD para os perfis dos furos de sondagem da campanha antiga. De posse dos valores de RQD foram atribuídos os pesos do RMR para todos os perfis conforme indicado pela Tabela B1a) do Anexo B.

Espaçamento

O espaçamento entre fraturas não era fornecido pelos perfis de sondagem, logo, também foi estimado em função do número de fraturas por metro. Essa estimativa foi realizada de forma bastante simplificada, conforme equação (0.2):

$$e = 100 / f$$
 (0.2)

onde o espaçamento é dado em centímetros e f é o número de fraturas a cada metro.

Os pesos de classificação no sistema RMR-1989 foram então atribuídos aos valores calculados para o espaçamento conforme Tabela B1a).

4. Condições das descontinuidades

Conforme Tabela B1a) do Anexo B, para descrever o item de condições das descontinuidades é preciso conhecer a rugosidade, a persistência, abertura e a alteração das paredes das mesmas.

Na campanha de sondagens de 2006 a 2007 os perfis informam a rugosidade (rugosa, lisa ou estriada), a inclinação (vertical ou sub., inclinada e horizontal ou sub.), o grau de alteração das paredes, a presença de preenchimento e uma indicação da abertura das descontinuidades.

Na campanha antiga a rugosidade não é indicada, logo se buscou ajustar as indicações de inclinação e grau de fraturamento com a descrição das observações geológicas, onde é descrito o posicionamento das fraturas em relação à foliação.

Como as sondagens não foram orientadas, as famílias de fraturas foram supostas a partir das suas características de regularidade e inclinação. Para as fraturas sub-horizontais atribuiu-se a família 3 e para as inclinadas, observou-se a descrição como paralela ou perpendicular em relação à foliação para atribuir as famílias 1 ou 2.

Outro critério adotado para a determinação da rugosidade das descontinuidades mapeadas pela campanha antiga foi a descrição de regularidade das mesmas, parcialmente apresentada nos perfis.

Conforme Figura 3.18, da ISRM (1978), tanto a redução da regularidade como da rugosidade reduzem gradativamente o atrito entre as paredes das fraturas, mesmo que em escalas diferentes. Portanto, adotou-se como critério atribuir a descrição de parede irregular/rugosa às fraturas indicadas como recortadas e para as onduladas e planas foi atribuída a descrição de parede lisa.

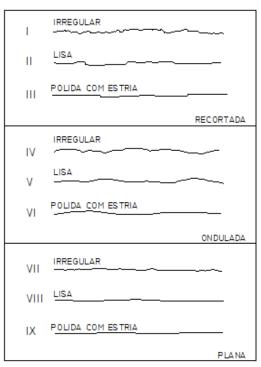


Figura 3.18 – Padrões de rugosidade e regularidade de paredes de fraturas (adaptado de ISRM, 1978).

Convém realçar que não foram adotadas paredes estriadas/espelhadas como atribuição, uma vez que tal feição é bastante específica e provavelmente seria citada caso ocorresse.

A rugosidade foi então estimada em função desses critérios de número da família e regularidade.

O grau de alteração das paredes e o preenchimento das descontinuidades são descritos na campanha de 2006 a 2007 como condição das paredes, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Alteração e preenchimento das descontinuidades - campanha 2006 a 2007.

grau	Condição das paredes				
D1	Fraturas justapostas, com paredes sãs.				
D2	Fraturas preenchidas por material pétreo rijo.				
	Fraturas justapostas, com alteração incipiente das				
D3	paredes, sinais de percolação d`água, sem				
	preenchimento.				
D4	Fraturas com alteração milimétrica das paredes,				
D4	justapostas ou não, sem preenchimento.				
D5	Fraturas com paredes alteradas e com				
D3	preenchimento.				
E	Fraturas que não se enquadram nos tipos acima,				
	descritas na coluna "Descrição do material".				

Esses mesmos dados não são assim apresentados pela campanha de 1994 a 1995, onde há um grau de decomposição do material que foi correlacionado com a descrição acima, conforme Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Comparação entre o grau de decomposição da rocha (1994 a 1995) e a descrição das paredes (2006 a 2007).

grau		Paredes e
1994/1	Descricão do grau de decomposição	preench.
95		2006/2007
D1	nenhuma evidência de decomposição da rocha, que mantém sua cor original	D1,D2
D2	<u>algumas</u> <u>fraturas</u> <u>apresentam-se</u> <u>oxidadas</u> <u>superficialmente</u> , mas a matriz rochosa mantem-se sã e com sua cor original.	_
D3	várias fraturas apresentam-se abertas e decompostas e/ou preenchidas por material decomposto, com a decomposição atingindo, muitas vezes, a matriz rochosa nas imediações das juntas. Matriz rochosa apresentase, fora das imediações destas juntas, apenas pa	D4
D4	todas as fraturas estão decompostas, preenchidas ou recobertas por material decomposto; a matriz rochosa apresenta-se em sua quase totalidade decomposta e fortemente descolorida (os trechos de rocha apenas levemente descolorida podem existir, mas são raro	D5

Após essas considerações e comparações, os pesos do RMR referentes à condição das fraturas foram inferidos às amostras de acordo com o ajuste dos parâmetros para o padrão da campanha de 2006 a 2007, conforme Tabela 3.10.

Peso	30	25	20	10	0
fraturas	D2, S1	D2,S2	D4,S2	qquer	no perfil
uas	ou	D1, S2 ou	ou	D5 com S	5mm especificados
das	ou	D3, S1 ou	ou	qquer ou	5mm ou, abertura >
Condições	D1, S1	D3, S2 ou	D4, S1	S3 com D	Preenchimento mole >

Tabela 3.10 – Atribuição de pesos RMR para as condições das fraturas.

Onde é indicado veio, para ambas as campanhas considerou-se D2 (fraturas preenchidas por material pétreo rijo), adotando a superfície das paredes como rugosa. Para os trechos especificados como fragmentado/extremamente fragmentado, independente dos demais critérios, foi atribuído o peso 10.

Uma vez atribuídos os pesos a todas as categorias classificatórias do RMR, foram então somados os pesos e encontrado o valor do RMR-1989 ao longo dos furos de sondagem, conforme apresentado para o furo SR-16 na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Classificação, ao longo do furo de sondagem SR-16, no sistema RMR-1989.

prof		Classificação RMR 1989								
MD	resist.	RQD	e (cm)	Cond. Desc.	Água	Orient.	RMR			
12,32	4	8	5	10	15	0	42			
12,87	4	8	5	10	15	0	42			
12,93	4	8	5	10	15	0	42			
15,32	4	8	5	10	15	0	42			
15,37	4	8	5	10	15	0	42			
15,93	4	8	5	10	15	0	42			
15,98	4	8	5	10	15	0	42			
16,38	4	8	5	10	15	0	42			
16,43	4	8	5	10	15	0	42			
16,64	4	8	5	10	15	0	42			
16,69	4	8	5	10	15	0	42			
17,41	4	8	5	10	15	0	42			
17,46	4	13	8	20	15	0	60			
21,43	4	13	8	20	15	0	60			

A planilha completa de caracterização e classificação desse furo de sondagem pode ser visualizada na Tabela C1 do Anexo C. Os demais furos de sondagem atenderam aos mesmos critérios de caracterização e classificação.

Uma vez classificados todos os 17 furos segundo os critérios acima apresentados, deu-se início então à modelagem goemecânica, onde foi estimada a distribuição tridimensional desses valores de RMR e número de fraturas por metro, para então analisar regiões de má qualidade do maciço e extrair as seções críticas para tecer as análises de estabilidade.