



# Determinação de Parâmetros Geotécnicos e Retroanálise de Solos e Rochas Basálticas da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul

Ricardo José Mirisola Rodrigues

COO, MMF PROJETOS, São Paulo, Brasil, ricardo.mirisola@mmfprojetos.com.br

Alberto Jurach

Supervisor da Unidade Local Passo Fundo, DNIT/RS, Passo Fundo, Brasil, adalberto.jurach@dnit.gov.br

Fernanda Castells Vidaller Laurino

Diretora Projetos, MMF PROJETOS, São Paulo, Brasil, fernanda.castells@mmfprojetos.com.br

Milena Gomes Corrêa

Geóloga, MMF PROJETOS, São Paulo, Brasil, milena.gomes@mmfprojetos.com.br

**RESUMO:** A Formação Serra Geral, no Rio Grande do Sul, é composta por extensos derrames basálticos, cujos produtos de intemperismo e alteração estrutural possuem grande influência na estabilidade de taludes naturais e artificiais. Este estudo combina a caracterização geomecânica de maciços basálticos e a retroanálise de estabilidades com o objetivo de determinar parâmetros geotécnicos representativos para aplicações em engenharia geotécnica e análises de estabilidade de encostas. A caracterização dos maciços rochosos foi realizada por meio do mapeamento detalhado de descontinuidades (fraturas e juntas), considerando suas características geométricas, como espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, preenchimento e grau de alteração. Foram determinados parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades utilizando o modelo de Barton-Bandis, com a estimativa do coeficiente de atrito básico ( $\phi_b$ ), da rugosidade da junta (JRC) e da resistência da parede da junta (JCS). Paralelamente, a retroanálise foi aplicada a casos documentados de instabilidade em taludes naturais e de corte na Serra Gaúcha, onde a geometria da ruptura e as condições do nível freático foram bem definidas. A partir desses eventos, foram obtidos parâmetros de resistência ajustados à realidade das condições geotécnicas locais. Os resultados destacam a importância da caracterização geomecânica detalhada e da calibração de parâmetros por retroanálise para uma representação mais precisa do comportamento geotécnico da Formação Serra Geral. A metodologia adotada fornece subsídios para análises de estabilidade mais confiáveis e aprimora a base de dados de parâmetros geotécnicos da região, contribuindo para projetos de engenharia civil e medidas de mitigação de riscos geotécnicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Formação Serra Geral, estabilidade de taludes, retroanálise, parâmetros geotécnicos, descontinuidades, rochas basálticas.

**ABSTRACT:** The Serra Geral Formation, located in Rio Grande do Sul, is composed of extensive basaltic lava flows whose weathering products and structural alterations have a significant influence on the stability of both natural and artificial slopes. This study combines the geomechanical characterization of basaltic rock masses and back-analysis of slope stability with the objective of determining representative geotechnical parameters for use in geotechnical engineering and slope stability assessments. The characterization of the rock masses was carried out through detailed mapping of discontinuities (fractures and joints), considering their geometric features such as spacing, persistence, roughness, aperture, infill material, and degree of weathering. Shear strength parameters of the discontinuities were determined using the Barton-Bandis model, with the estimation of the basic friction angle ( $\phi_b$ ), joint roughness coefficient (JRC), and joint wall compressive strength (JCS). In parallel, back-analysis was applied to documented cases of slope instability in both natural and cut slopes in the Serra Gaúcha region, where failure geometry and groundwater conditions were well defined. These events allowed for the derivation of strength parameters adjusted to the actual geotechnical conditions of the area. The results highlight the importance of detailed geomechanical characterization and the calibration of parameters through back-analysis for a more accurate representation of



the geotechnical behavior of the Serra Geral Formation. The adopted methodology provides support for more reliable stability analyses and improves the regional geotechnical parameter database, contributing to civil engineering projects and the implementation of geotechnical risk mitigation measures.

**KEYWORDS:** Serra Geral Formation, slope stability, back-analysis, geotechnical parameters, discontinuities, basaltic rocks.

## 1 INTRODUÇÃO

A rodovia BR-470/RS possui grande relevância econômica e logística para o estado do Rio Grande do Sul, ao conectar regiões industriais, agrícolas e turísticas. No trecho entre os municípios de Veranópolis e Carlos Barbosa, a rodovia atravessa terrenos formados por derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, pertencente à Província Basáltica Paraná-Etendeka, que repousa sobre os sedimentos da Bacia do Paraná.

Durante o resfriamento dos fluxos de lava, as rochas basálticas desenvolveram fraturas de contração térmica que originaram estruturas prismáticas de geometria predominantemente hexagonal, conhecidas como disjunções colunares (Spry, 1962). Essas fraturas, em geral subverticais, são frequentemente acompanhadas por juntas sub-horizontais ou inclinadas, formadas por processos de consolidação, esforços tectônicos e reativações estruturais — características comuns em áreas de relevo acidentado.

As particularidades geológicas e geomecânicas dessas rochas impactam diretamente a estabilidade dos taludes ao longo da rodovia, especialmente em locais com intemperismo intenso, presença de contatos litológicos (como entre basalto, brecha vulcânica e solos coluvionares) e infiltração de água ao longo dos planos de descontinuidade. A heterogeneidade estrutural, associada à forte influência climática da região, favorece a ocorrência de instabilidades, o que torna indispensável uma caracterização detalhada dos materiais envolvidos.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar os principais perfis geológicos e geomecânicos encontrados nos taludes rochosos da BR-470/RS. A partir do mapeamento de campo, são apresentadas faixas de parâmetros geotécnicos representativos dos maciços, definidos com base na classificação geomecânica (sistema RMR) e na caracterização das descontinuidades. Complementarmente, foram realizadas retroanálises de estabilidade em setores com histórico de rupturas no contato solo/rocha, utilizando o software Slide para rupturas circulares e não circulares, de acordo com a espessura da camada de solo. A integração entre o mapeamento geológico, a análise geomecânica e a modelagem numérica permite compreender os mecanismos de instabilidade e fornece subsídios técnicos para a estabilização e manutenção dos taludes da rodovia.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Classificação RMR

O mapeamento geológico da face pelo sistema RMR consiste na caracterização geomecânica do maciço rochoso exposto, por meio da avaliação direta de parâmetros como resistência da rocha intacta, índice de qualidade do maciço (RQD), espaçamento entre descontinuidades, condições das juntas (persistência, rugosidade, tipo e resistência do preenchimento), presença de água nas descontinuidades e a orientação dessas descontinuidades em relação ao talude. Os dados foram obtidos em campo e utilizados para atribuição de pontuações conforme os critérios do sistema RMR, proposto por Bieniawski (1989), permitindo a classificação da qualidade do maciço rochoso. No que se refere à resistência à compressão uniaxial, adotou-se como referência os valores apresentados por Bell (2007), que indica para basaltos frescos uma resistência geralmente superior a 150 MPa, podendo alcançar até 350 MPa em condições ideais de laboratório. Com base nesses valores, foi possível estabelecer o intervalo representativo da rocha basáltica sã para aplicação no sistema RMR. A seguir, na Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é apresentada a síntese dos taludes rochosos mapeados. Na ocasião, foram mapeados taludes de rocha basáltica e de brecha vulcânica.



ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD
RMR	60	RMR	50	RMR	65	RMR	70	RMR	53	RMR	69
1	12	1	7	1	12	1	12	1	7	1	12
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BRECHA	ROCHA	BRECHA	ROCHA	BRECHA
ALTERAÇÃO	RAD/RAM	ALTERAÇÃO	RAM COM SOLO	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM
RMR	57	RMR	46	RMR	48	RMR	51	RMR	50	RMR	53
1	7	1	7	1	4	1	12	1	12	1	12
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BRECHA	ROCHA	BRECHA	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD
RMR	61	RMR	40	RMR	44	RMR	53	RMR	51	RMR	71
1	7	1	4	1	7	1	12	1	12	1	12
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BRECHA	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BRECHA
ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD/RAM	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD/RAM
RMR	53	RMR	50	RMR	54	RMR	46	RMR	60	RMR	41
1	7	1	7	1	12	1	12	1	12	1	7
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD/RAM
RMR	43	RMR	59	RMR	54	RMR	66	RMR	55	RMR	40
1	7	1	12	1	12	1	12	1	12	1	7
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD/RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM
RMR	54	RMR	54	RMR	38	RMR	32	RMR	63	RMR	59
1	12	1	7	1	4	1	12	1	12	1	12
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RS	ALTERAÇÃO	RS	ALTERAÇÃO	RS
RMR	49	RMR	54	RMR	49	RMR	57	RMR	63	RMR	52
1	7	1	7	1	7	1	12	1	12	1	12
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD/RAM	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM
RMR	59	RMR	41	RMR	41	RMR	63	RMR	54	RMR	40
1	12	1	7	1	7	1	12	1	12	1	7
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM
RMR	61	RMR	36	RMR	28	RMR	63	RMR	45	RMR	41
1	12	1	4	1	2	1	12	1	7	1	7
ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO	ROCHA	BASALTO
ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAD	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM	ALTERAÇÃO	RAM
RMR	36	RMR	37	RMR	50	RMR	63	RMR	64	RMR	44
1	2	1	7	1	7	1	12	1	12	1	4

Figura 1 – Síntese dos taludes rochosos mapeados. Para cada ponto, são apresentados: tipo de rocha, grau de alteração (RS – rocha sã; RAM – rocha muito alterada; RAD – rocha alterada), índice RMR (Rock Mass Rating) e o Parâmetro 1 do sistema RMR, correspondente à resistência à compressão uniaxial (UCS) da rocha intacta.

Os dados coletados em campo permitiram a atribuição de valores a cada um desses parâmetros, possibilitando a classificação dos maciços em categorias que vão de “muito ruim” a “muito bom”. Para o presente estudo, deu-se ênfase especial à resistência à compressão uniaxial da rocha, parâmetro 1 do RMR, em função de sua representatividade na definição da qualidade do maciço.

A análise dos valores atribuídos ao Parâmetro 1 do RMR (resistência à compressão uniaxial) evidencia a influência conjunta do tipo de rocha e do grau de alteração na resistência do maciço. No caso do basalto, quando classificado como Rocha Sã (RS), os valores de resistência atribuídos variam entre 12 e 15 (100 MPa a >250 MPa), refletindo sua estrutura maciça e baixa porosidade, típica de rochas ígneas frescas. À medida que o grau de alteração evolui para Rocha Alterada Dura (RAD), os valores atribuídos ao parâmetro 1 reduzem-se para faixas entre 7 e 12 (50 a 250 MPa), indicando início de degradação mineralógica. Já nos estados mais alterados, correspondentes a Rocha Alterada Mole (RAM), os valores caem para 2 a 4 (5 a 50 MPa), compatíveis com significativa perda de resistência e possível desagregação da rocha.

Em contrapartida, a brecha vulcânica não foi observada na condição de Rocha Sã (RS) na base de dados analisada, o que por si só já indica uma maior suscetibilidade à alteração. Nos estados RAD, os valores de resistência atribuídos variam entre 4 e 7 (50 a 100 MPa), e em RAM, caem ainda mais, para 1 a 4 (até 50 MPa). Isso reforça o comportamento estruturalmente mais frágil da brecha, cuja composição heterogênea, clastos angulosos em matriz porosa, favorece a perda precoce de resistência à medida que o intemperismo avança.

## 2.2 Caracterização das Descontinuidades

A caracterização de uma descontinuidade em maciços rochosos é feita com base em uma série de atributos observáveis em campo, que influenciam diretamente o comportamento geomecânico do maciço. São avaliados parâmetros como: orientação (direção e mergulho), abertura, persistência (extensão visível), rugosidade (grau de irregularidade da superfície), tipo e resistência do preenchimento (quando presente), grau



de alteração das superfícies, espaçamento entre descontinuidades e presença de água. A caracterização das descontinuidades observadas em campo são apresentadas a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das descontinuidades observadas em campo.

ID	DIP DIR	DIP	ABERTURA/ LARGURA (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
				TIPO	PERSISTÊNCIA	TERMINAÇÃO	TIPO DE PREENCHIMENTO	RESISTÊNCIA DO PREENCHIMENTO	JRC	RUGOSIDADE (ISRM 1978)	ÁGUA	ESPAÇAMENTO
1	153	29	5	6	10 - 20	0	4	S4	2 - 4	III	1	60 - 200mm
2	116	54	3	6	3 - 10	0	4	S3	8 - 10	IV	2	60 - 200mm
3	228	76	1	6	3 - 10	0	4	S3	8 - 10	IV	2	600 - 600mm
4	47	14	7	6	10 - 20	0	4	S4	6 - 8	III	1	200 - 600mm
5	200	50	5	6	3 - 10	0	2	S2	0 - 2	VIII	2	200 - 600mm
6	103	61	2	6	3 - 10	0	2	R1	0 - 2	VIII	1	60 - 200mm
7	46	20	2	6	3 - 10	1	4	S3	4 - 6	IV	1	60 - 200mm
8	9	74	>10	6	3 - 10	1	4	S3	4 - 6	IV	4	600 - 2000mm
9	339	20	5	6	>20	0	2	R3	2 - 4	IX	1	60 - 200mm
10	324	86	>10	6	3 - 10	0	2	R3	2 - 4	IX	1	60 - 200mm
11	310	59	20	6	1-3	0	-	-	0-2	VIII	3	600-2000
12	1	45	2	6	10	1	-	-	2-4	IV	4	60-200
13	193	20	-	6	1-3	2	-	-	6-8	IV	4	>6000
14	345	18	10	6	10-20	1	8(vegetação)	-	2-4	VIII	4	600-2000
15	346	35	-	10	3-10	0	8(vegetação)	-	4-6	IV	1	60-200
16	22	88	-	6	1-3	1	-	-	4-6	IV	5	600-2000
17	165	78	-	6	1-3	0	-	-	2-4	V	1	>6000
18	212	14	2	6	10-20	0	4 e 8(vegetação)	R1	6-8	IV	1	20-60
19	132	72	2	6	1-3	0	3	R1	4-6	V	1	600-2000
20	151	14	-	6	1-3	1	3	R1	2-4	V	1	600-2000
20	350	48	-	6	10-20	0	-	-	0-2	VIII	1	60-200
20	31	33	3	6	>20	0	-	-	0-2	VIII	1	200-600
20	349	56	3	6	>20	0	-	-	4-6	VII	1	60-200
20	6	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	142	86	3	6	3-10	0	8(vegetação)	S3	2-4	VII	5	200-600
20	230	16	3	6	10-20	0	8(vegetação)	S3	0-2	VIII	1	600-2000
20	344	41	<1	6	3-10	0	-	-	0-2	VIII	1	600-2000

Os dados obtidos revelam a predominância de fraturas do tipo 6, com aberturas variando entre <1 mm e 20mm e persistência geralmente na faixa de 3m a 10m. O preenchimento é frequentemente composto por material argiloso ou matriz argilosa (tipo 4), com resistência classificada entre S3 (macia) e R1 (muito fraca), além da ocorrência pontual de vegetação, indicando a atuação contínua de processos de intemperismo. As superfícies apresentam rugosidade variável, com predominância das classes IV, V e VIII, e coeficientes de rugosidade (JRC) estimados entre 2 e 6 na maioria dos casos. A presença de água ao longo das descontinuidades é recorrente e pode afetar significativamente a estabilidade dos taludes. O espaçamento entre os planos de fratura mostrou-se bastante heterogêneo, com maior frequência nas faixas de 60–200 mm e 600–2000 mm.

### 2.3 Retroanálise

A partir do mapeamento geológico e das observações de campo, foram identificados três perfis geológicos distintos nos taludes estudados ao longo da BR-470/RS, apresentados na Figura 2. Para cada um deles, foram conduzidas retroanálises com o objetivo de estimar os parâmetros geotécnicos das três principais camadas de solo envolvidas nas instabilidades observadas, utilizando o software Slide (Rocscience®). As análises foram baseadas em casos reais de ruptura, com geometrias definidas e nível freático estimado a partir de evidências visuais de surgência, encharcamento e alteração de material.

O Perfil Tipo 1 é caracterizado por um maciço basáltico são ou alterado duro, altamente fraturado, sobreposto por uma camada de solo coluvionar. Esse perfil é comum em trechos onde a crista do talude é composta por material inconsolidado, favorecendo instabilidades no contato solo/rocha, geralmente associadas ao desprendimento de blocos definidos por descontinuidades estruturais.

O Perfil Tipo 2 apresenta, na base do talude, uma camada de brecha vulcânica alterada, recoberta por solo de alteração formado pela decomposição da própria brecha. Essa unidade mostra-se estruturalmente mais frágil e frequentemente contém blocos rolados de basalto incorporados. Acima dessa camada, a presença de rocha basáltica verticalizada sugere um contato litológico tectonicamente reorientado.

O Perfil Tipo 3 refere-se a taludes compostos integralmente por brecha vulcânica intensamente alterada ou por rocha basáltica muito degradada, sem a presença de contatos litológicos bem definidos. Nesses casos, o solo de alteração acompanha a morfologia da encosta, configurando uma massa contínua ao longo de toda a face do talude.

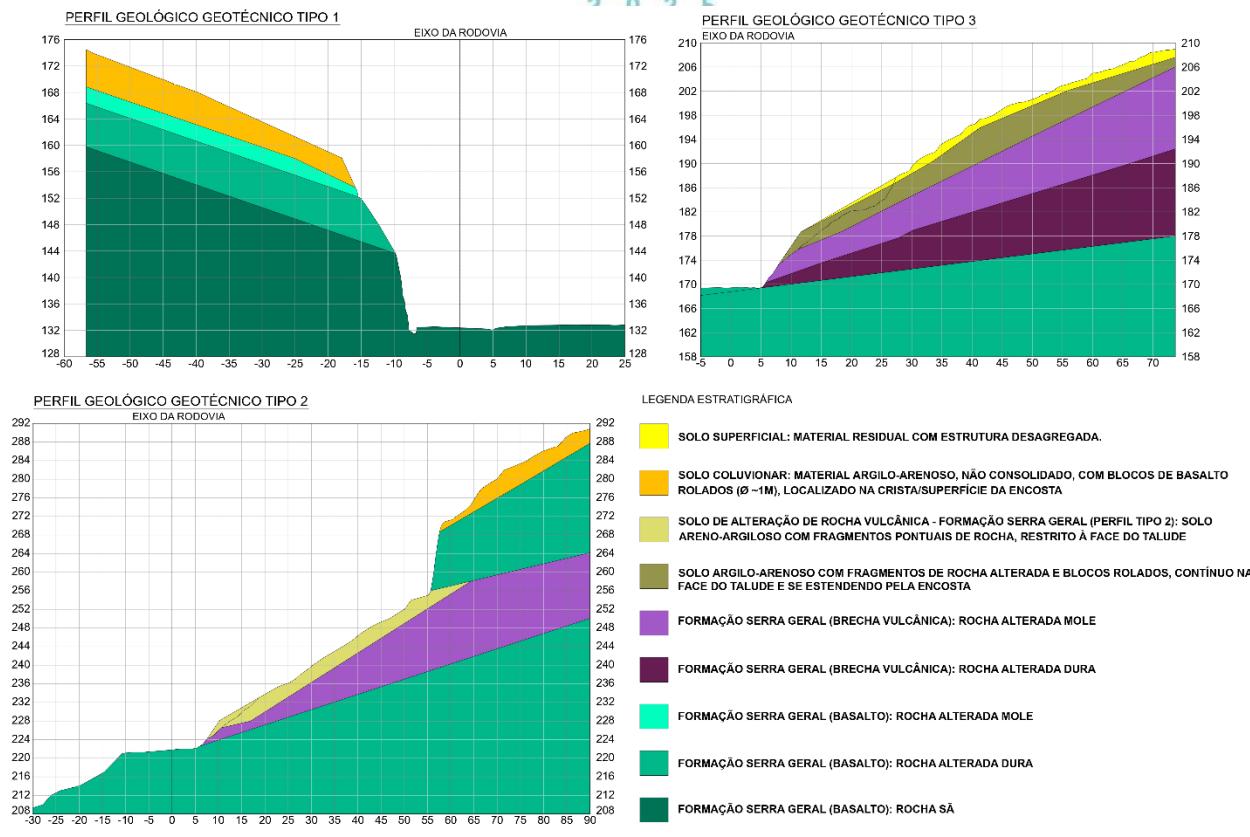


Figura 2 – Perfis Geológicos Geotécnicos Tipo 1, 2 e 3.

As retroanálises permitiram estimar faixas realistas de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ) para cada uma dessas camadas, compatíveis com os mecanismos de ruptura observados em campo. A calibração dos parâmetros foi feita com base no ajuste dos fatores de segurança aos valores esperados para condições críticas, considerando o histórico de instabilidade da região.

### 3 RESULTADOS

A classificação geomecânica dos maciços rochosos, com base no sistema RMR, permitiu identificar variações significativas nos parâmetros de resistência à compressão das rochas da Formação Serra Geral, diretamente relacionadas ao tipo litológico e ao grau de alteração. Para o basalto classificado como Rocha Sã, os valores de resistência à compressão uniaxial variaram entre 150 e 250 MPa, o que, considerando-se a relação proposta por Barton, resultou em valores de resistência à compressão da descontinuidade JCS entre 50.000 e 85.000 kPa. À medida que o grau de alteração evoluiu para Rocha Alterada Dura, a resistência estimada decresceu para a faixa de 60 a 90 MPa, correspondendo a valores de JCS entre 30.000 e 50.000 kPa. Em estados mais avançados de alteração (Rocha Alterada Mole), os valores estimados de resistência foram inferiores a 60 MPa, resultando em JCS inferiores a 30.000 kPa. No caso da brecha vulcânica, observou-se comportamento estrutural mais frágil, com resistência à compressão uniaxial variando entre 30 e 70 MPa nas brechas alteradas duras, e abaixo de 30 MPa nas brechas alteradas moles. Consequentemente, os valores de JCS atribuídos foram significativamente menores em comparação ao basalto, refletindo sua maior susceptibilidade à degradação.

A caracterização das descontinuidades indicou predominância de juntas do tipo fratura aberta, com aberturas variando entre menos de 1 mm e até 20 mm, e persistência média de 3 a 10 metros. O espaçamento entre os planos de fratura mostrou-se bastante variável, com maior frequência nas faixas de 60 a 200 mm e de 600 a 2000 mm, evidenciando a heterogeneidade estrutural dos maciços. A rugosidade das superfícies foi classificada principalmente nas classes IV, V e VIII, com coeficientes de rugosidade (JRC) variando entre 2 e 6 na maioria dos casos. Juntas com superfícies mais lisas (classes VIII e IX) apresentaram valores de JRC abaixo de 2. O preenchimento das descontinuidades foi predominantemente argiloso (tipo 4), com resistência entre S3 e R1, indicando baixa coesão e tendência à saturação. Em diversos locais, observou-se presença de



água ou umidade persistente nas juntas, condição que potencializa a redução da resistência ao cisalhamento, especialmente em superfícies de baixa rugosidade e com preenchimento fino.

As retroanálises realizadas a partir dos três perfis geológicos propostos permitiram a definição de parâmetros de resistência ao cisalhamento para as diferentes camadas de solo envolvidas nas instabilidades observadas. Para o Perfil Tipo 1, composto por solo coluvionar argilo-arenoso, inconsolidado e com blocos rolados de basalto, estimou-se um peso específico entre 16 e 17 kN/m<sup>3</sup>, coesão entre 7 e 15 kPa e ângulo de atrito variando de 25° a 32°. No Perfil Tipo 2, correspondente ao solo de alteração restrito à face do talude, derivado da decomposição da brecha vulcânica, os valores estimados foram de 13 a 16 kN/m<sup>3</sup> para o peso específico, coesão entre 12 e 16 kPa e ângulo de atrito entre 20° e 25°. Já no Perfil Tipo 3, referente ao solo de alteração contínuo ao longo da encosta, formado por material argilo-arenoso com fragmentos de rocha alterada e blocos rolados, foram observados valores de peso específico entre 18 e 21 kN/m<sup>3</sup>, coesão de 10 a 15 kPa e ângulo de atrito variando entre 25° e 35°.

Esses resultados demonstram a forte influência da composição do solo, do grau de alteração e da presença de blocos na definição dos parâmetros geotécnicos, destacando a importância da caracterização detalhada das unidades geológicas e do uso de retroanálise como ferramenta de calibração para análises de estabilidade.

Tabela 2 – Faixas de JCS e angulo de atrito de acordo com o grau de alteração para rochas basálticas e brechas vulcânicas.

Material	Alteração	g (kN/m <sup>3</sup> )	JCS (kN/m <sup>2</sup> )	Φ' (°)
Basalto	Rocha Sã	28	50.000 – 85.000	35 – 38
Basalto	Rocha Alterada Dura	28	30.000 – 50.000	32 – 35
Basalto	Rocha Alterada Mole	28	<30000	28 – 32
Becha Vulcânica	Rocha Alterada Dura	25	20.000 – 30.000	28 - 32
Becha Vulcânica	Rocha Alterada Mole	25	<20.000	25 - 30

Embora a estratigrafia detalhada de cada perfil apresente múltiplas camadas, optou-se por adotar, nas retroanálises, uma envoltória de resistência única do tipo Mohr-Coulomb aplicado a um perfil de solo homogêneo aproximado e representativa de um material equivalente, apresentado na Tabela 3. Essa simplificação foi necessária para viabilizar a calibração dos parâmetros globais do maciço rompido, garantindo a representatividade da retroanálise em termos de equilíbrio global. Ressalta-se que tal aproximação não substitui a caracterização individual das unidades geotécnicas, mas fornece parâmetros médios aplicáveis ao cenário de ruptura observado.

Tabela 3 – Síntese dos parâmetros obtidos nas retroanálises para as camadas de solo.

Material	g (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão	Φ' (°)
<b>Perfil Tipo 1:</b> Solo coluvionar de textura argilo-arenosa, inconsolidado, localizado na encosta acima da crista do talude, com presença de blocos de rocha basáltica rolados, com diâmetro de em média 1 metro.	16-17	7 - 15	25 - 32
<b>Perfil Tipo 2:</b> Solo de alteração de rocha vulcânica, restrito à face do talude, proveniente da Formação Serra Geral, com textura areno-argilosa e presença pontual de fragmentos de rocha	13-16	12 - 16	20 - 25



Material	g (kN/m³)	Coesão	Φ' (°)
<b>Perfil Tipo 3:</b> Solo de alteração de rocha vulcânica derivado da Formação Serra Geral, localizado na face do talude e se estendendo pela encosta, com textura argilo-arenosa e presença de fragmentos de rocha alterada e blocos rolados.	18-21	10 - 15	25 - 35

#### 4 DISCUSSÃO

A análise integrada dos dados obtidos por meio da caracterização geomecânica, do mapeamento de descontinuidades e da retroanálise permitiu estabelecer parâmetros geotécnicos representativos para os materiais presentes nos taludes da BR-470/RS, associados à Formação Serra Geral. A distinção entre os três perfis geológicos propostos foi fundamental para compreender os diferentes comportamentos observados em campo e para o refinamento dos modelos de estabilidade.

O Perfil Tipo 1, constituído por solo coluvionar inconsolidado posicionado sobre maciço basáltico fraturado, apresentou os menores valores de coesão (7 a 15 kPa) e um ângulo de atrito relativamente elevado (25° a 32°), compatível com a presença de blocos rolados que contribuem para o entretravamento mecânico do material. A baixa coesão está relacionada à ausência de cimentação e à alta mobilidade do solo, característica comum em depósitos coluvionares. Esse perfil está associado a rupturas no contato solo/rocha, onde a geometria das descontinuidades desempenha papel decisivo.

No Perfil Tipo 2, onde predominam solos de alteração derivados da brecha vulcânica, observa-se o menor valor médio de ângulo de atrito (20° a 25°), indicando maior fragilidade estrutural. Apesar disso, a coesão mostrou-se ligeiramente superior à do Perfil 1 (12 a 16 kPa), o que pode estar relacionado a processos de cimentação residual ou à presença de finos coesivos na matriz do solo. A menor densidade observada (13 a 16 kN/m³) reforça a condição de material alterado e menos denso, mais suscetível à perda de resistência quando saturado.

O Perfil Tipo 3, caracterizado por uma camada espessa e contínua de solo de alteração, apresentou os maiores valores de peso específico (18 a 21 kN/m³) e de ângulo de atrito (25° a 35°). Esse comportamento pode ser atribuído à presença combinada de fragmentos de rocha alterada e blocos rolados em uma matriz mais densa e coesiva. A coesão variou de 10 a 15 kPa, indicando um material mais estável em comparação aos outros perfis. Este tipo de solo, por sua geometria contínua e densidade elevada, pode apresentar estabilidade satisfatória em condições naturais, mas torna-se vulnerável em casos de saturação ou escavações mal conduzidas.

A caracterização das descontinuidades também se mostrou crucial para a interpretação das instabilidades observadas. A presença de juntas com preenchimento argiloso, baixa rugosidade ( $JRC < 2$ ) e alta incidência de umidade ou surgência reforça o papel dessas estruturas como planos de fraqueza, principalmente nos casos de ruptura planar e tombamento. Tal comportamento está em consonância com os mecanismos descritos por Barton e Bandis (1982), que enfatizam a redução significativa da resistência ao cisalhamento em juntas preenchidas por material de baixa resistência ou saturadas.

Outro aspecto fundamental refere-se à definição do parâmetro JCS, que representa a resistência à compressão das paredes da junta no modelo Barton-Bandis. Neste estudo, os valores de JCS foram estimados a partir do parâmetro 1 do sistema RMR, que corresponde à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. Considerando-se as recomendações de Barton (1973) e as práticas consolidadas em estudos geotécnicos, foi adotada uma fração típica de 1/3 da UCS para estimar o JCS. Assim, para basaltos classificados como Rocha Sã (valores de UCS entre 150 e 250 MPa), o JCS variou entre 50.000 e 85.000 kPa. À medida que a rocha apresenta maior grau de alteração, o parâmetro 1 do RMR se reduz, o que se reflete diretamente em menores valores de JCS — refletindo a degradação estrutural da parede da junta.

A associação entre o RMR e os parâmetros Barton-Bandis demonstra-se eficaz, uma vez que permite estimar o comportamento cisalhante das descontinuidades com base em observações objetivas de campo, sem depender exclusivamente de ensaios laboratoriais. Esse vínculo metodológico contribui para análises mais consistentes e adaptadas às condições reais dos maciços, sendo especialmente relevante em projetos de estabilização de taludes em regiões com litologias frágeis e alta variabilidade estrutural.

Os dados obtidos corroboram os estudos regionais de Martins et al. (2020) e Fonseca (2018), que também identificaram a influência marcante da heterogeneidade estrutural dos maciços da Formação Serra



Geral na instabilidade de taludes. A adoção de parâmetros ajustados por retroanálise permitiu não apenas representar melhor as condições reais de campo, como também fornecer subsídios técnicos mais confiáveis para o dimensionamento de medidas de contenção e estabilização.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo contribui para a compreensão geotécnica da Formação Serra Geral no trecho da BR-470/RS, por meio da integração entre mapeamento geológico-geomecânico, classificação de maciços pelo sistema RMR, caracterização de descontinuidades e retroanálises de estabilidade. A abordagem adotada permitiu a identificação de três perfis geológicos distintos e a definição de parâmetros geotécnicos representativos das condições locais.

A análise dos maciços revelou a influência significativa do grau de alteração e do tipo litológico na resistência do material, com o basalto apresentando maior durabilidade estrutural em comparação à brecha vulcânica. A associação entre o parâmetro 1 do RMR (resistência à compressão uniaxial) e a definição do JCS demonstrou-se eficaz para a estimativa da resistência das juntas no modelo Barton-Bandis.

A caracterização das descontinuidades evidenciou a predominância de juntas com preenchimento argiloso, baixa rugosidade e elevada presença de umidade, fatores que contribuem para a redução da resistência ao cisalhamento e favorecem a ocorrência de mecanismos de ruptura planar, tombamento e deslizamentos no contato solo/rocha.

As retroanálises aplicadas aos três perfis geológicos permitiram estimar faixas realistas de coesão e ângulo de atrito para as diferentes camadas de solo envolvidas, refletindo as condições reais de campo. Esses parâmetros fornecem uma base técnica sólida para análises de estabilidade e projetos de contenção em taludes naturais ou escavados na região da Serra Gaúcha.

Por fim, a metodologia adotada neste trabalho, baseada em dados de campo, classificação geomecânica e modelagem numérica calibrada, reforça a importância da caracterização local e da retroanálise como ferramentas fundamentais para o dimensionamento de soluções geotécnicas seguras, contribuindo para a mitigação de riscos em rodovias inseridas em terrenos vulcânicos intensamente fraturados e alterados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287–332.
- Barton, N., & Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. Oslo: International Society of Rock Mechanics.
- Bell, F. G. (2007). *Engineering geology* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: Wiley.
- Fonseca, A. C. (2018). Estudo da estabilidade de taludes em maciços rochosos com base em classificação geomecânica e retroanálise [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco].
- Martins, T. A., Silva, J. R., Oliveira, M. L., & Souza, P. H. (2020). Caracterização geomecânica e análise da estabilidade de taludes em corte na região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geotecnologia*, 159, 48–64.
- Spry, A. (1962). *Metamorphic textures*. Oxford: Pergamon Press.