

QUALIDADE DE DADOS E RESULTADOS EM ENSAIOS GEOTÉCNICOS EM ROCHA

Túlio P. F. Fonseca ¹; Ricardo Papa ²; Aurélio Carvalho ³; Yan Santos ⁴; Germano Lopes ⁵; Fábio Soares Magalhães ⁶

Resumo – Para projetos e estudos de geologia de engenharia realizados em maciços rochosos é necessário que sejam conhecidas as principais características dos materiais que compõem o terreno. A caracterização de uma rocha pode ser realizada por meio de ensaios em laboratório e de campo, além de investigações geológico-geotécnicas. Esses ensaios são essenciais, pois a partir do reconhecimento dos materiais é possível definir soluções técnicas e critérios de projeto. Nesse sentido, faz-se necessária uma etapa de validação/avaliação dos dados brutos disponibilizados pelos laboratórios, antes dos processos de tratamento/interpretação desses dados. Os autores desenvolveram uma metodologia de validação de dados que pode ser enquadrada no contexto dos programas de QA/QC para ensaios geotécnicos de laboratório em maciços rochosos, mais especificamente, ensaios uniaxiais, triaxiais e tração indireta.

Abstract – For engineering geology projects and studies carried out on rock masses, it is necessary to know the main characteristics of the materials that make up the terrain. The characterization of a rock can be done through field and laboratory tests. These tests are essential, since the recognition of the materials makes it possible to determine technical solutions and design criteria. In this sense, a validation/evaluation stage of the raw data provided by the laboratory is necessary, before the results treatment/interpretation processes. The authors developed a data validation methodology that works as QA/QC and evaluates the quality of the test data on rock masses, more specifically, uniaxial, triaxial and indirect tensile tests.

Palavras-Chave – Ensaios geotécnicos em rocha; ensaios de laboratório; qualidade de dados; programas de QA/QC.

¹ Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)997182485, tulio.fonseca@walmengenharia.com.br

² Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)987574350, ricardo.papa@walmengenharia.com.br

³ Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)983990052, aurelio.carvalho@walmengenharia.com.br

⁴ Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)988073631, yan.santos@walmengenharia.com.br

⁵ Eng.Civil, MSc, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)983425742, germano.lopes@walmengenharia.com.br

⁶ Geól, Dr, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31) 994230710, fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

Ensaio de laboratório, em geral, devem ser realizados de maneira procedimentada, cuidadosa e criteriosa, com o máximo controle das condições e variáveis envolvidas, para que seja possível atestar a qualidade dos resultados e garantir que eles possam ser aplicados no contexto específico do projeto de interesse. Por isso, esses ensaios são regulados por normas e padrões internacionais, que definem as etapas procedimentais a serem seguidas pelos laboratórios. É muito comum que os resultados apresentados pelos laboratórios sejam aplicados nos projetos de engenharia sem uma etapa de validação dos dados, e acabam sendo incorporados nas etapas de avaliação e tratamento dos resultados, sem uma análise criteriosa de aderência às normas e procedimentos de referência. Dessa forma, dados provenientes de ensaios que não seguiram os padrões normativos podem ser incorporados inadvertidamente às premissas de projetos, comprometendo sua confiabilidade e precisão.

Para a maior confiabilidade dos dados de ensaios que serão incorporados a um projeto, entende-se ser fundamental a validação dos dados brutos e resultados dos ensaios antes mesmo das etapas de tratamento. O objetivo desse trabalho é apresentar uma metodologia de análise de qualidade de dados de ensaios de laboratório em corpos de prova provenientes de maciços rochosos. Essa metodologia compara os dados, informações e documentos apresentados pelo laboratório, com os procedimentos requeridos pelas normativas técnicas pertinentes. Ao final, cada corpo de prova ensaiado é avaliado a partir de uma matriz de aderência às normas, e classificado de acordo com sua qualidade.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Szwedzicki (2003) define qualidade no controle de solo como o processo que consegue representar as características e recursos das atividades que afetam sua capacidade de satisfazer necessidades declaradas ou implícitas, ou seja, é a conformidade com requisitos legais, normas e especificações. Neste contexto inclui-se o controle e a garantia da qualidade dos dados de ensaios que deve ser obtida por um processo que verifica e avalia a integridade, a precisão, a consistência e a representatividade dos dados. Este processo é comumente representado pela sigla QA/QC, acrônimo do termo em inglês “*quality assurance and quality control*”, que em tradução livre para o português do Brasil, significa Controle de Qualidade e Garantia de Qualidade.

O controle de qualidade (QC) se dá após a execução dos trabalhos, no caso em tela, a execução dos ensaios de laboratórios, ou seja, é um conjunto de ações corretivas. Já a garantia de qualidade (QA) pode ser entendida como uma ferramenta de gestão, pois foca no processo, enquanto o QC foca na qualidade do produto/dado. Portanto, apesar de terem processos distintos, tanto o QA quanto o QC são utilizados com foco na qualidade. Na mineração, o QA/QC é utilizado desde a exploração mineral com a declaração de recursos e reservas por meio do *GDQM - GeoData Quality Management* (Cuchierato, 2022), até a entrega do minério nos pátios dos clientes finais. Segundo Cuchierato (2022), um programa de QA/QC eficaz deve conter todos os elementos apresentados na Figura 1. Este trabalho foca no **terceiro** e **quarto** elementos, respectivamente, a Análise dos Resultados e a Avaliação do Laboratório, conforme destacado na Figura 1.



Figura 1- Metodologia de avaliação dos dados e resultados dos ensaios geotécnicos (modificado de Cuchierato, 2022).

3. METODOLOGIA

A metodologia de avaliação dos dados e resultados dos ensaios geotécnicos em rocha aqui apresentada é pautada nas prescrições das normas nacionais e internacionais aplicáveis, e foi desenvolvida conforme as etapas do fluxograma apresentado na Figura 2. Em síntese, na Etapa 1 define-se as normas de referência aplicáveis àquele determinado tipo de ensaio, e na Etapa 2 avalia-se a aderência dos procedimentos de execução do ensaio às determinações da norma. Já na Etapa 3 avalia-se se todos os resultados exigidos em norma foram apresentados no relatório dos ensaios. Na Etapa 4 avalia-se a qualidade dos resultados obtidos em relação as bibliografias técnicas de referência; e na Etapa 5 faz-se a avaliação das fotografias dos corpos de prova disponibilizadas no relatório dos ensaios. Por fim, a Etapa 6 consiste na síntese dos resultados encontrados, com a relação de erros, número de ocorrências e classificação dos CPs, de modo que seja possível o mapeamento dos pontos de detecção mais recorrentes, para que na Etapa 7 seja feita uma série de recomendações para a melhoria da qualidade da execução do(s) ensaio(s).

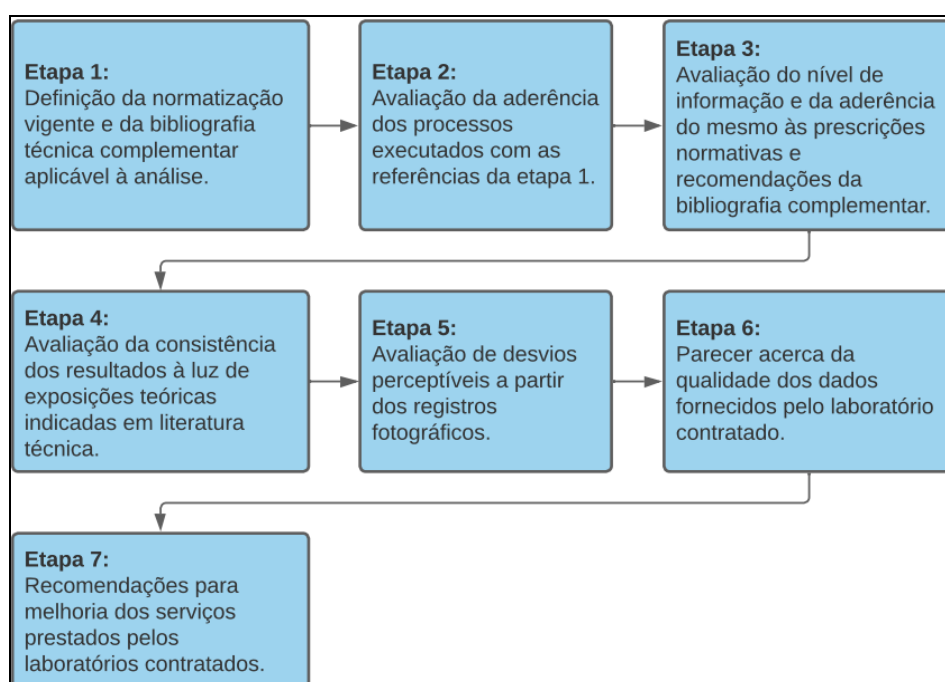


Figura 2- Metodologia de avaliação dos dados e resultados dos ensaios geotécnicos.

Para a verificação das 7 etapas apresentadas no fluxograma acima propõe-se uma matriz de avaliação de aderência em relação às normas e bibliografias técnicas, que está apresentada na Figura 3. Essa matriz consiste numa ferramenta sistemática que permite a análise dos dados de um determinado ensaio laboratorial de modo tal que a avaliação resulte em uma determinada quantidade de pontos em cada um dos critérios – sendo mais penalizados os ensaios com maior acúmulo de pontos. O somatório das notas estabelecidas para um determinado ensaio é então enquadrado numa escala de aderência que resulta na classificação da qualidade dos dados analisados (Figura 4).

Em resumo, se um ensaio apresenta pontuação até 3.9, ele é considerado aderente em relação às normas e bibliografias técnicas de referência. Notas entre 4.0 e 7.9 classificam o ensaio como “Intermediário”; e notas entre 8.0 e 14.9 resultam em classificação “Pouco Aderente”. Corpos de prova que apresentam nota 15 ou maior são classificados como “Atenção”. Isso significa que esses corpos de prova devem ser avaliados durante o tratamento dos ensaios e, quando necessário, devem ser eliminados. Ensaios com notas superiores a 100 são eliminados e, portanto, descartados do tratamento. A metodologia foi aplicada para 3 (três) tipos de ensaios diferentes - uniaxiais, triaxiais e tração indireta -, de modo que foi feita a automatização das avaliações e verificações.

DIRETRIZES NORMATIVAS			COMPORTAMENTO	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	ETAPA 5
Foi utilizada a norma de referência em sua versão mais atualizada	Não há indícios de desvios procedimentais no conjunto de dados fornecido	Os resultados apresentados pelo laboratório estão em conformidade com a norma de referência	Os resultados são condizentes com os padrões comportamentais estabelecidos em bibliografia técnica referenciada	Os registros fotográficos fornecidos pelo laboratório não apresentam nenhum indício de erros experimentais ou de fraude
(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Foi utilizada norma de referência em versão anterior, vigente na época da realização do ensaio	Os desvios identificados são irrelevantes pois não impactam nos resultados e nem no tratamento do ensaio	Os dados ou resultados não apresentados são irrelevantes	Os resultados encontram-se um pouco fora dos limites comportamentais observados em bibliografia técnica referenciada	Os registros fotográficos apresentam indícios de erros procedimentais, mas os resultados aparentemente estão coerentes
(0.1)	(0.1)	(0.1)	(1)	(15)
Foi utilizada uma norma alternativa em detrimento da norma de referência	Os desvios identificados são relevantes pois tem algum impacto no resultado e/ou no tratamento	Os dados não apresentados são relevantes pois têm algum impacto no resultado e/ou no tratamento do CP	Os resultados encontram-se muito fora dos limites comportamentais observados em bibliografia técnica referenciada e a eliminação do CP deve ser avaliada no tratamento	Os registros fotográficos apresentam indícios de erros procedimentais e/ou falhas experimentais e por isso o CP deve ser eliminado
(0.1)	(1)	(1)	(15)	(100)
Foi empregada uma versão desatualizada da norma de referência empregada	Os desvios identificados são relevantes, e a eliminação do CP deve ser avaliada no tratamento	Os dados ou resultados não apresentados são suficientes para eliminar o corpo de prova	Os resultados encontram-se muito fora dos limites comportamentais observados em bibliografia técnica referenciada e por isso o CP deve ser eliminado	Os registros fotográficos apresentam indícios de desvios de conduta
(1)	(15)	(100)	(100)	(1000)
Foi empregada uma norma não aplicável ou não foi informada a norma empregada	Os desvios identificados reduzem drasticamente a confiabilidade do ensaio, e por isso o corpo de prova deve ser eliminado			
(4)	(100)			

Figura 3- Matriz de avaliação de aderência dos ensaios em relação às normas e bibliografias técnicas. Em negrito apresenta-se a nota atribuída aos erros, dependendo de sua relevância.

Aderente		Intermediário		Pouco Aderente		Atenção!	Eliminado
0.0	3.9	4.0	7.9	8.0	14.9	≥ 15.0	≥ 100.0

Figura 4- Classificação dos ensaios quanto à aderência em relação às normas técnicas e as referências técnicas bibliográficas.

3.1. Checklists de Verificação

Para a avaliação das Etapas 1 a 5 elaborou-se uma lista de checagem (*checklist*) como a apresentada na Figura 5. Nesse *checklist* foram pontuados os possíveis erros encontrados em cada etapa avaliada, a partir da análise cuidadosa e criteriosa das principais normas e bibliografias técnicas. Esse *checklist* apresenta as informações elencadas abaixo:

- Tipo de ensaio avaliado;
- Código e descrição do erro: cada erro recebe um código, que consiste em um número sequencial de rastreamento por meio do qual é possível fazer filtros, que será essencial na etapa final de avaliação dos erros;
- Ocorrência “Sim”: erro detectado;
- Ocorrência “Avaliação Impossível”: erros que não puderam ser avaliados por ausência de informações nos dados brutos disponibilizados;

- Ocorrência “*Não Realizado*”: alguma etapa não realizada no ensaio, e que não é exigida por norma, como por exemplo a leitura de deformação para determinação de constantes elásticas em um ensaio uniaxial;
- Relevância: a relevância do erro tem relação com a pontuação atribuída ao CP caso esse erro seja detectado, e segue o que foi apresentado na matriz de avaliação de aderência da Figura 2;
- Nota: nota do CP em relação àquele erro específico. O somatório de todas as notas resulta na nota final do CP.

Etapa 3							
Ensaio	Código	Descrição	Ocorrência			Pontuação	
			Sim	Avaliação impossível	Não realizado	Relevância	Nota
COMPRESSÃO UNIAXIAL	E3UNI01	Não apresentação da data de execução do ensaio (0,1 pt.)				IRRELEVANTE	-
	E3UNI02	Não apresentação da origem da amostra, incluindo nome do projeto e localização (1 pt.)				RELEVANTE	-
	E3UNI03	Não apresentação da descrição litológica da amostra (caracterização do litotipo ensaiado) (100 pts.)				ELIMINATÓRIO	-
	E3UNI04	Não apresentação do diâmetro e altura do CP antes no início do ensaio (1 pt.)				RELEVANTE	-
	E3UNI05	Não apresentação dos equipamentos utilizados (0,1 pt.)				IRRELEVANTE	-
	E3UNI06	Não apresentação do tempo de duração do ensaio (0,1 pt.)				IRRELEVANTE	-
	E3UNI07	Não apresentação do método de controle de carga (1 pt.)				RELEVANTE	-
	E3UNI08	Não apresentação da taxa de carregamento ou deformação adotada (0,1 pt./1 pt.)				IRRELEVANTE/RELEVANTE*	-

Figura 5- Recorte da lista de checagem de um ensaio de compressão uniaxial.

Vale ressaltar que, ao final do trabalho, cada CP possui sua própria lista de checagem, com a relação de todas as informações relevantes a cada etapa de avaliação. Essa informação é preciosa durante as etapas de tratamento dos ensaios, pois para cada CP avaliado se tem clareza quanto às condições de execução do ensaio.

3.2. Planilhas de Quantitativo de Erros

Para a sistematização da frequência de erros encontrados, atividade referente a Etapa 6 da metodologia, desenvolveu-se uma planilha eletrônica com o quantitativo de erros identificados, como apresentado na Figura 6. Essa planilha aponta sistematicamente os erros e a classificação de cada corpo de prova (Figura 6A), e faz também uma síntese desses erros (Figura 6B), para além de uma avaliação estatística simples com o histograma de distribuição encontrado (Figura 6C).

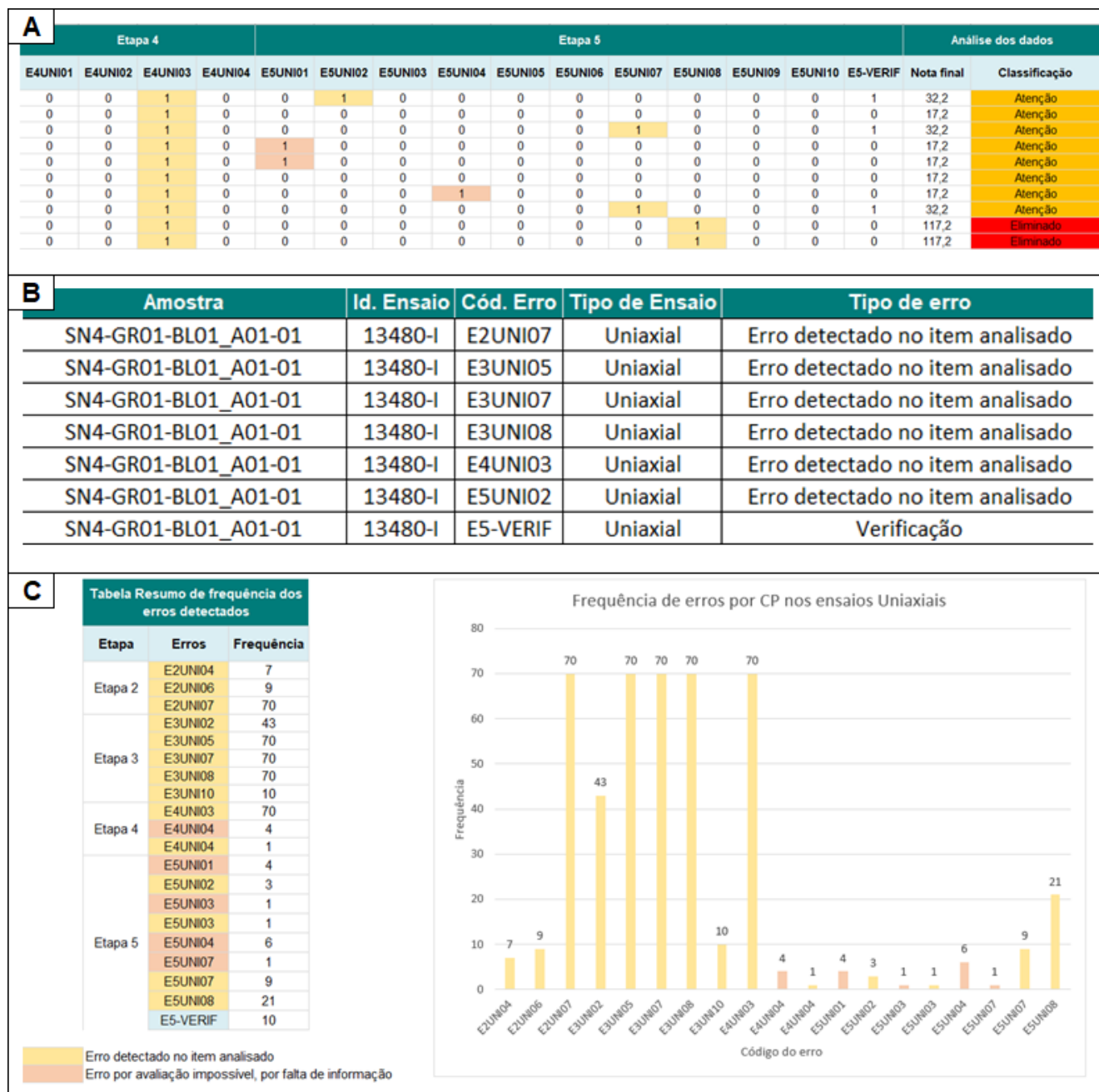


Figura 6- Recortes da planilha eletrônica de sistematização dos erros identificados. Acima, Figura 6A, planilha com o registro binário (0/1) dos erros encontrados, nota final e classificação do CP. No meio, Figura 6B, planilha de síntese dos erros, com registro de todos os erros identificados em cada amostra. Abaixo, Figura 6C, avaliação estatística simples dos erros encontrados.

4. ESTUDOS DE CASO

A metodologia apresentada nos itens anteriores foi aplicada para avaliar os dados e resultados de ensaios uniaxiais, triaxiais e de tração indireta, executados por diferentes laboratórios em corpos de prova de diferentes litotipos rochosos de minas de ferro no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais e no Estado do Pará. Nesse item serão apresentados os principais resultados encontrados nos ensaios executados por um desses laboratórios.

4.1. Ensaios Uniaxiais

Foram analisados 120 ensaios uniaxiais executados pelo Laboratório 1, todos eles em amostras de rocha obtidas em minas de minério de ferro no Pará, tendo como referência as normas ISRM (1979) e ASTM D7012 (2014). O gráfico apresentado na Figura 7 apresenta o quantitativo de erros identificados em cada uma das etapas de avaliação. Os erros foram classificados como 'Avaliação Impossível' (AI) e 'Erros Detectados' (ED), como já explicado anteriormente. Quanto a classificação geral dos corpos de prova, a Figura 8 apresenta os resultados obtidos. Observa-se que 79% dos corpos de prova foram classificados como "Atenção", e 21% como "Eliminado".

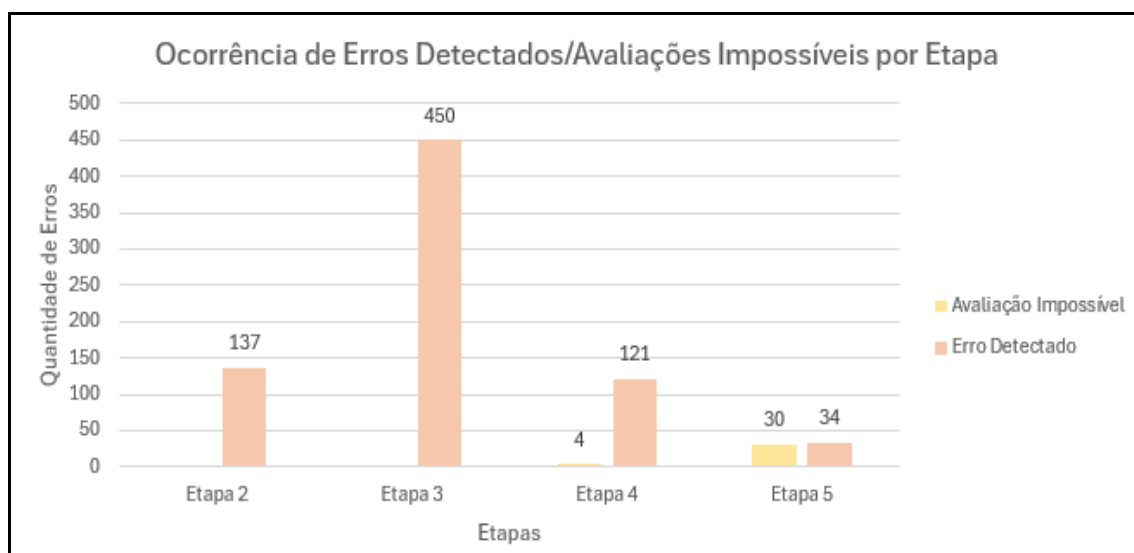


Figura 7- Gráfico representando a ocorrência de Erros Detectados (ED) e Avaliação Impossível (AI) por cada etapa analisada. Ensaios de compressão uniaxial.

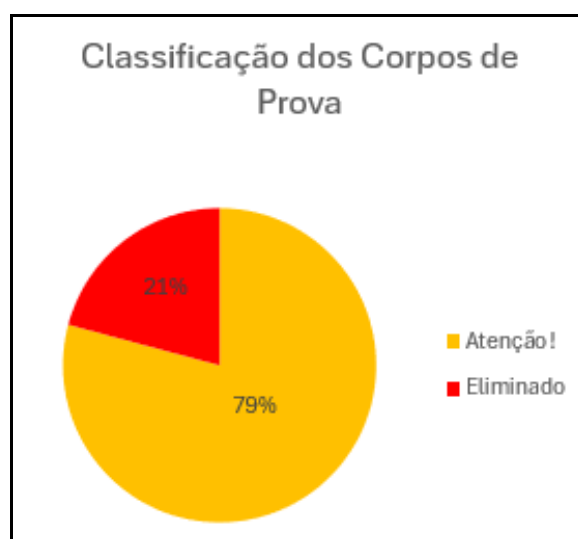


Figura 8- Classificação final dos CPs avaliados em ensaios de compressão uniaxial.

4.2. Ensaios Triaxiais

Foram analisados 160 ensaios triaxiais executados pelo Laboratório 1, todos eles em amostras de rocha obtidas em minas de minério de ferro no Pará, tendo como referência as normas ISRM (1983) e ASTM D7012 (2014). O gráfico apresentado na Figura 9 apresenta o quantitativo de erros identificados em cada uma das etapas de avaliação, e a Figura 10, os resultados obtidos. Observa-se que 54% dos corpos de prova foram classificados como "Aderente", 44% como "Atenção", e 2% como "Eliminado".

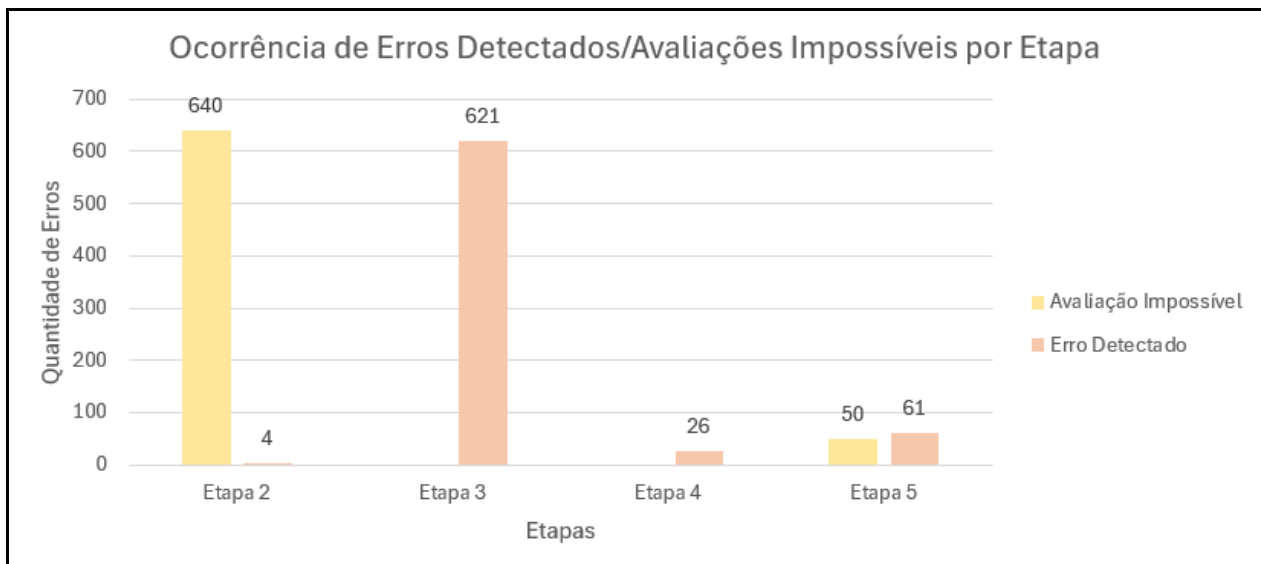


Figura 9- Gráfico representando a ocorrência de Erros Detectados (ED) e Avaliação Impossível (AI) por cada etapa analisada. Ensaios de compressão triaxial.

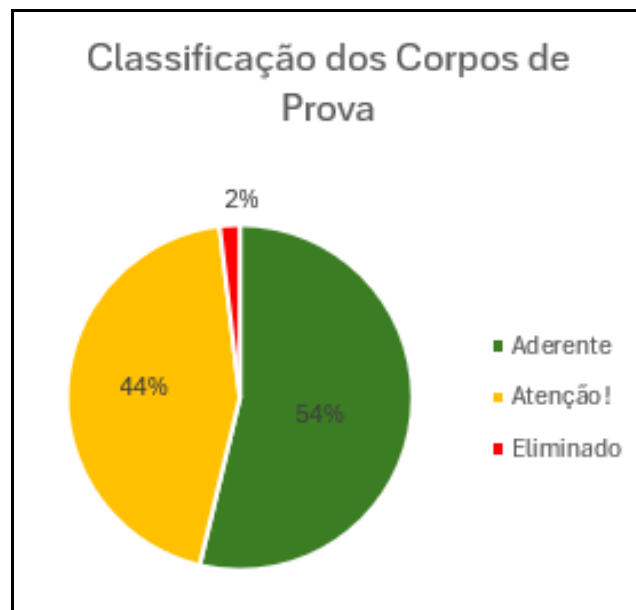


Figura 10- Classificação final dos CPs avaliados em ensaios de compressão triaxial.

4.3. Ensaios de Tração Indireta

Foram analisados 156 ensaios triaxiais executados pelo Laboratório 1, todos eles em amostras de rocha obtidas em minas de minério de ferro no Pará, tendo como referência as normas ISRM (1978) e ASTM D3967 (2016). O gráfico apresentado na Figura 11 apresenta o quantitativo de erros identificados em cada uma das etapas de avaliação. Quanto a classificação geral dos corpos de prova, a Figura 12 apresenta os resultados obtidos. Observa-se que 66% dos corpos de prova foram classificados como “Aderente”, 29% como “Atenção”, e 5% como “Eliminado”.

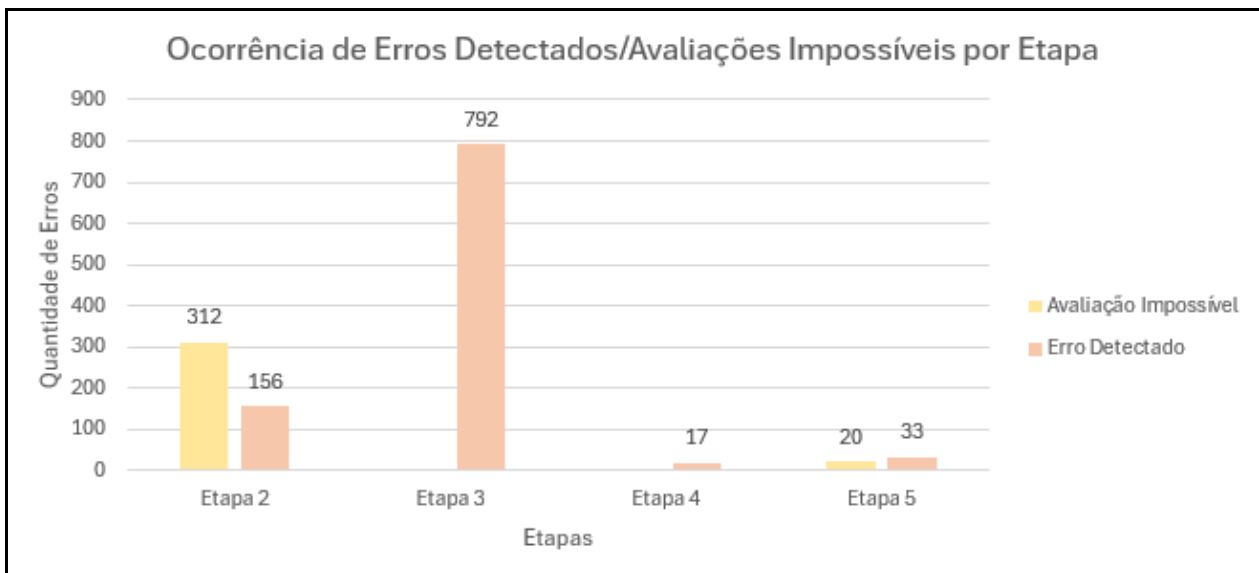


Figura 11- Gráfico representando a ocorrência de Erros Detectados (ED) e Avaliação Impossível (AI) por cada etapa analisada. Ensaios de tração indireta.

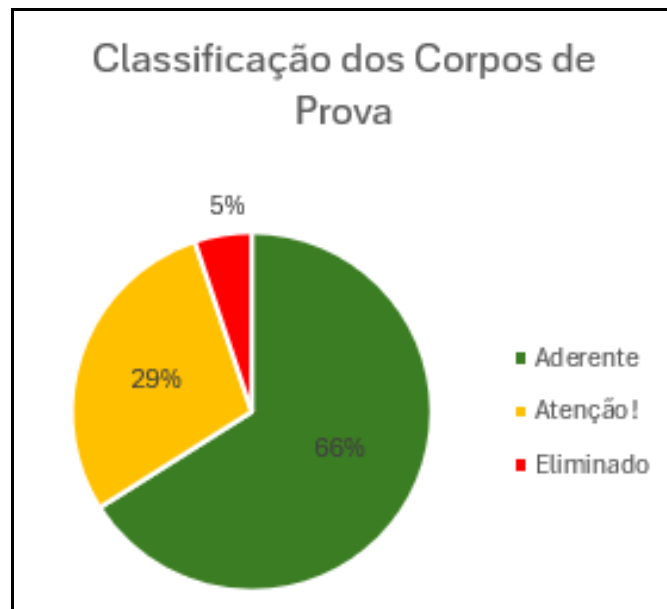


Figura 12- Classificação final dos CPs avaliados em ensaios de tração indireta.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho é apresentada uma metodologia de validação de dados e resultados que pode ser enquadrada no contexto dos programas de QA/QC para ensaios geotécnicos de laboratório em maciços rochosos, mais especificamente, ensaios uniaxiais, triaxiais e tração indireta. Nos estudos de caso apresentados, muitos erros foram registrados, evidenciando que vários aspectos devem melhorar durante a execução do ensaio, de modo a elevar a confiabilidade desses dados.

Entende-se que, apesar dos resultados apresentarem elevados índices de erros cometidos, raramente um trabalho como esse é realizado e, por isso, é comum que dados poucos confiáveis sejam incorporados a projetos geotécnicos. A metodologia apresentada, que foi automatizada pelos autores e utilizada em projetos de mineração, serve como uma etapa essencial que precede o tratamento, e agrega segurança e confiabilidade ao banco de dados e, por consequência, às diretrizes de projeto.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, 2014. D7012:14e1: “*Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*”. West Coshohocken, PA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, 2016. D3967-16: “*Standard Test Methods for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*”. West Coshohocken, PA.

CUCHIERATO, G. (2022), *A importância da qualidade da informação no processo de declaração de recursos minerais*. 293 f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Minas). Departamento de Engenharia de Minas e do Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. 1978. “*Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials*”.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. 1979. “*Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*”.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. 1983. “*Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version*”.

SZWEDZICKI, T. (2003) – *Quality assurance in mine ground control management*. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 40, n. 4, p. 565-572.