

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/497

## Aplicação do método QA/QA no Controle de Compactação em Projeto de Reforço de Barragem de Rejeito de Minério de Ferro

Lincoln Barony

Engenheiro Geotécnico, Belo Horizonte, Brasil, lincolnbarony@gmail.com

Jean Carlos Macson

Engenheiro Geotécnico, Conselheiro Lafaiete, Brasil, jean.carlo.cardoso@vale.com

Geydson Alves

Engenheiro Geotécnico, Belo Horizonte, Brasil, geydson.alves@vale.com

Pedro Henrique Barbosa

Geólogo Geotécnico, Conselheiro, Brasil, pedro.barbosa1@vale.com

Edicarlos Silva

Engenheiro Geotécnico, Entre Rios de Minas, Brasil, Edicarlos.silva@vale.com,

**RESUMO:** A mineração é a atividade industrial com maior probabilidade de ser degradante e prejudicial ao meio ambiente. Os riscos associados à eventual falha das barragens de rejeitos de mineração são uma grande preocupação para governos e entidades privadas, devido às graves perdas econômicas, ambientais e humanas associadas a estes possíveis eventos. Em função da sequência de rupturas de barragens no Brasil, em um intervalo menor que cinco anos, ficou em evidência a necessidade de rigor técnico na implantação de novas estruturas e reforço das existentes. Este rigor deve ser apresentado através de critérios e processos bem definidos em projeto, refletindo no controle de qualidade em campo. Para os aterros compactados o referido controle é realizado através de ensaios de verificação do Grau de Compactação (GC) e Teor de umidade (W%) do material compactado. Esta verificação assegura a conformidade dos critérios estabelecidos antes do avanço da compactação das camadas superiores. O objetivo do presente trabalho é demonstrar a aplicação da metodologia QA/QC (Garantia de Qualidade e Controle de Qualidade) no controle da construção de aterro compactado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Garantia de Qualidade, Controle de Qualidade, QA/QC, Mineração, Compactação de solo, Aterro.

**ABSTRACT:** Mining is the industrial activity most likely to be degrading and harmful to the environment. The risks associated with the eventual failure of mining tailings dams are a major concern for governments and private entities due to the serious economic, environmental and human losses associated with these possible events.

Due to the sequence of dam failures in Brazil in an interval of less than five years, the need for technical rigor in the implementation of new structures and reinforcement of existing ones became evident. This rigor must be presented through well-defined project criteria and processes, reflected in quality control in the field. For compacted landfills, this control is carried out through tests to verify the Degree of Compaction (GC) and Moisture Content (W%) of the compacted material. This verification ensures compliance with the criteria established before the advancement of compaction of the upper layers.

The objective of this work is to demonstrate the application of the QA/QC (Quality Assurance and Quality Control) methodology in controlling the construction of compacted landfill.

**KEYWORDS:** Quality Assurance, Quality Control, QA/QC, Mining, Soil compaction, Landfill.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil há uma necessidade crescente de fortalecer os controles sobre a segurança técnica das estruturas de empilhamento e armazenamento de resíduos, principalmente em empresas de mineração de minério de ferro. Com as rupturas em sequência de duas barragens no Brasil em um curto período de tempo, fica evidente a necessidade em elaborar técnicas rigorosas na implementação de novas estruturas e reforço das existentes que não atendam os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes.

Nesse contexto, a pesquisa em questão tem o objetivo de demonstrar a efetividade do método de avaliação do controle de qualidade QA/QC (Quality Assurance e Quality Control) aplicado numa obra de compactação em um projeto de reforço em uma barragem para armazenamento de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro no quadrilátero ferrífero.

A aplicação do método QA/QC tem origem na década de 30 e visa controlar a qualidade de produtos ou dados por meio de técnicas estatísticas de amostragem e teste. Dado que inspecionar 100% dos produtos ou dados é impraticável, foram desenvolvidas técnicas estatísticas que permitem amostrar e testar uma proporção representativa, garantindo a qualidade desejada para todo o lote ou produção. Sendo assim Controle de Qualidade (QA) se concentra na prevenção de defeitos durante o processo, o Controle de Qualidade (QC) está direcionado ao produto e visa identificar defeitos. Esse método QA/QC tem por objetivo garantir a integridade dos dados, assegurando que a amostragem seja de alta qualidade e confiabilidade. Segundo Nataly et al. (2019), os procedimentos e controles adotados no método são de extrema importância para que os resultados das amostras sejam usados em tomadas de decisões seguras e assertivas.

Os dados amostrados são oriundos do ensaio de controle tecnológico denominado Hilf, que possibilita determinar o grau de compactação em um ponto de controle, além do valor de desvio de umidade estimado pela metodologia, sem a necessidade de realização do ensaio de umidade em estufa que demanda 24hs (conforme a norma NBR 16097) na localização do ensaio para liberação da camada compactada. Desta forma a validação do controle das camadas de compactação, podem ser verificadas em pouco tempo e com uma margem de erro reduzida (MASSAD,2003).

O método de Hilf é regido pela NBR 12102:2020, que estabelece fundamentos e critérios para a execução do ensaio que é de crucial importância para o controle de qualidade em obras de compactação. Em campo esse procedimento consiste em escavar a até cinco centímetros abaixo do solo que esteja solto para a cravação de um cilindro, juntamente com a coleta de um montante de 10 a 15kg de solo, coletado com auxílio de pás e picaretas e acondicionado em um saco plástico para evitar perda de umidade e ser levado ao laboratório para os ensaios previstos em projeto.

A análise dos dados através do controle tecnológico visa validar os resultados das amostras, abrangendo aspectos como o desvio de umidade(W) e grau de compactação (GC) das amostras ensaiadas, parâmetros essenciais para a liberação de camadas de solo compactado.

## 2 METODOLOGIA

O presente item contempla a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, procedimentos adotados para execução dos ensaios de campo e laboratório.

### 2.1 Materiais

O estudo foi realizado no estado de Minas Gerais, no quadrilátero ferrífero, utilizando o método QA/QC no controle de qualidade da compactação de projeto de reforço de uma barragem de mineração especificamente em uma área de aterro compactado com volume total na ordem de 465.000 m<sup>3</sup>.

Desta forma, o método descrito foi aplicado em um projeto de uma berma a jusante da barragem existente m, com material terroso siltoso compactado, envelopado com camada de material argiloso compactado. O grau de compactação mínimo especificado em projeto de 98% em relação ao Proctor Normal.

## 2.2 Critérios de projeto

Os critérios de projeto para a compactação do aterro foram construídos através de resultados robustos e confiáveis dos ensaios, condicionando todo o processo na garantia de segurança da estrutura. Assim foram definidos os seguintes critérios:

- **Espessura das Camadas:** As camadas de rejeitos devem ser compactadas com uma espessura de 20 cm. Esta espessura foi determinada com base na capacidade de compactação dos equipamentos disponíveis e na consideração da eficácia da compactação em profundidades controladas.
- **Grau de Compactação Mínimo:** Após a compactação, cada camada de solo deverá atingir um Grau de Compactação (GC) mínimo de 98%, garantindo que o material tenha uma densidade adequada e seja resistivo aos esforços previstos. Os ensaios devem ser realizados sempre em dois laboratórios distintos.
- **Controle da Umidade:** Após a compactação, cada camada de solo deverá atingir um desvio de umidade deve ser ( $-3 < w < 3$ ), para silte e ( $-2 < w < 2$ ), para a argila, respeitando os limites para a liberação das camadas em campo. Os ensaios também devem ser realizados sempre em dois laboratórios distintos.

Os critérios foram determinados com base em ensaios laboratoriais prévios (classificação, triaxiais e compactação) e visa garantir os padrões de qualidade e confiabilidade das camadas de aterro compactado, além de convergirem para a segurança geral da operação no longo prazo.

## 2.3 Métodos

Os dados dos ensaios de compactação, realizados em campo e, posteriormente, em laboratório, feitos através de amostras de solo coletadas pelo método de Hilf, implicaram em resultados robustos e confiáveis para a pesquisa. Foram utilizados dados de dois laboratórios distintos, realizando os testes na mesma camada de solo e com a localização das amostras se distanciando aproximadamente três metros. Para os critérios de projeto foram utilizados ensaios de caracterização completa, granulometria, ensaio de compactação *in situ*, ensaios de permeabilidade e ensaios triaxiais tipo CIU (consolidado não-drenado) e CID (consolidado drenado) em amostras oriundas dos processos de amostragem de projeto para determinação das características do solo. O material ensaiado apresentou características argilosa com porcentagem de silte. Os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg apresentam a característica plástica de todos os materiais, confirmando resultados de granulometria descritos previamente. Todos os materiais têm características pouco granulares e possuem altas frações finas.

Tabela 1. Caracterização do solo

Densidade dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ot</sub>	M. específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios	Limites de Atterberg (LL/LP)	K (cm/s)
2,707	36,5	1,425	1,18	68 / 51	4,560E-04

Neste estudo, adotamos uma metodologia para investigar o desempenho das camadas de solo compactadas, com foco na avaliação detalhada de suas propriedades físicas, mecânicas e geotécnicas. Inicialmente, realizamos a caracterização dos solos, incluindo análise granulométrica, teor de umidade, com presença de materiais finos, compactação e densidade, por meio de ensaios laboratoriais.

Com o objetivo de avaliar a eficácia do processo de compactação, a Figura 1 apresenta o quantitativo dos ensaios de compactação que foram executados em campo pelo método Hilf. Esses ensaios permitiram determinar a densidade máxima seca e a umidade ótima do solo compactados de silte e argila, assim como a previsão de umidade na camada compactada. Os resultados do controle de compactação obtiveram índices satisfatórios de aprovação das amostras de silte e argila, evidenciando o sucesso no processo.

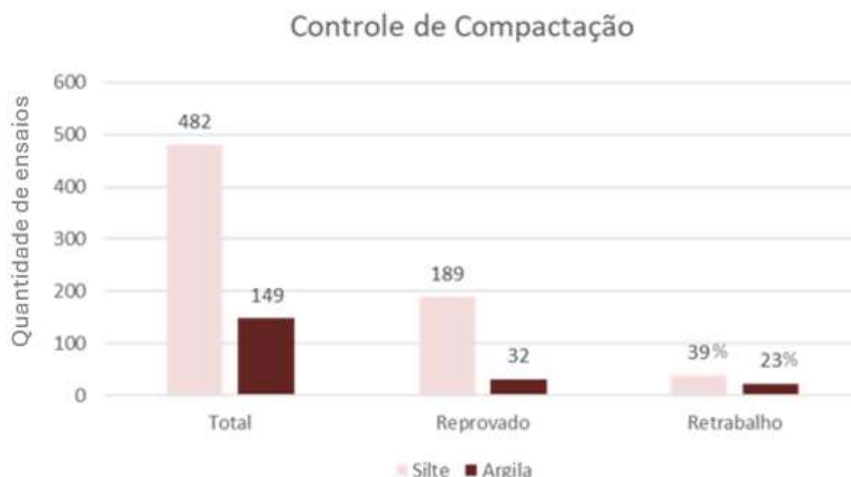


Figura 1. Controle de compactação

### 3 RESULTADOS

Aplicada a metodologia QA/QC obtivemos resultados com grande exatidão, removendo quaisquer ruídos ou duplicadas da base de dados, atestando a eficácia do método. Os dados foram tratados e executados por dois laboratórios distintos, um fiscalizador (empresa Chammas) e outro executor (a empresa Aterpa) e os resultados de grau de compactação e desvio de umidade em argila e silte, convergiram para a aprovação dos ensaios e consequentemente liberação das camadas compactadas.

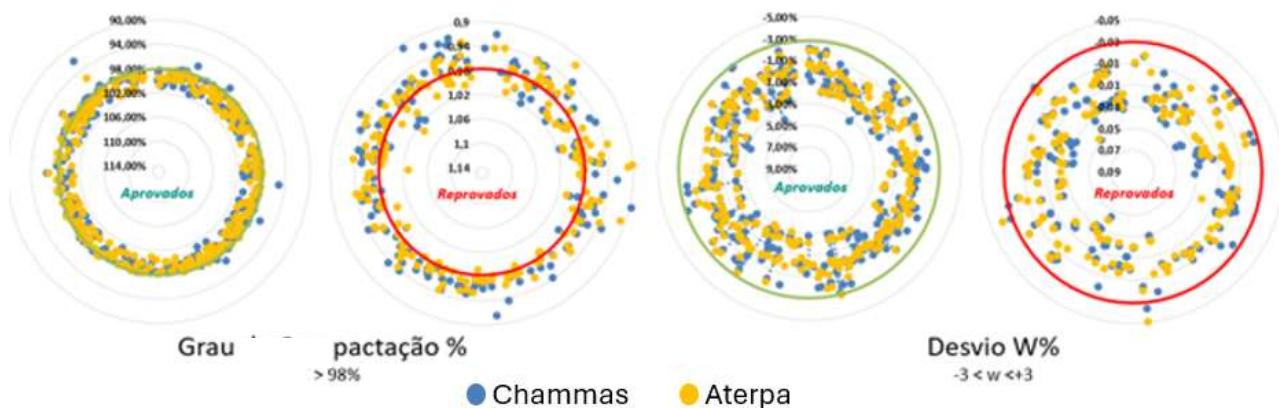


Figura 2. Controle de compactação – Silte

Podemos observar no gráfico da Figura 2 que para o GC houveram algumas camadas aprovadas com ensaios fora do especificado por um dos laboratórios, sendo importante dizer que estas camadas não foram liberadas sequencialmente e que os critérios de projeto permitiam 15% de desvio para todo o maciço. Para a verificação de W todos os ensaios aprovados se encontravam dentro da faixa determinada. Muitos ensaios estão classificados como reprovados por divergência entre os laboratórios, ficando determinado que nestes casos um ensaio reprovado invalidaria o aprovado.

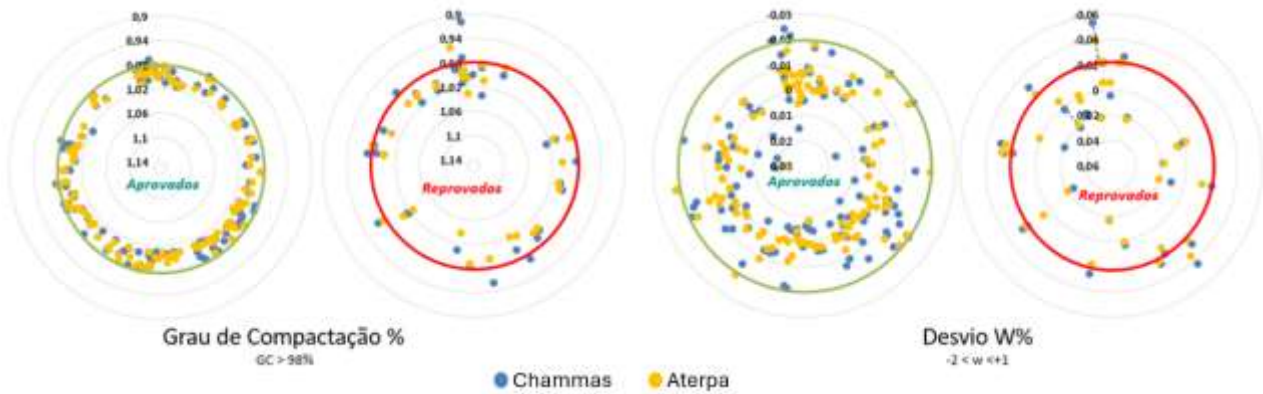


Figura 3. Controle de compactação – Argila

Na Figura 3 podemos observar que a reprovação foi significativamente menor se compararmos com o silte, sendo a principal causa de reprovação a falta de convergência entre os laboratórios.

Importante ressaltar que assim que persistiram a falta de convergência entre os laboratórios iniciou-se uma investigação onde foram identificados desvios na execução dos ensaios conforme Norma xxxx, laboratórios em condições diferentes de climatização, equipamentos necessitando substituição, entre outros pontos que foram identificados e adequados dentro das limitações locais.

### 3.1 Silte

Através da Figura 4 e 5, pode-se observar que os resultados de comparação estatística nas amostras de silte para os laboratórios Chammas e Aterpa, atingiram a premissa de projeto para o grau de compactação com valores muito próximos, atestando a qualidade dos ensaios.

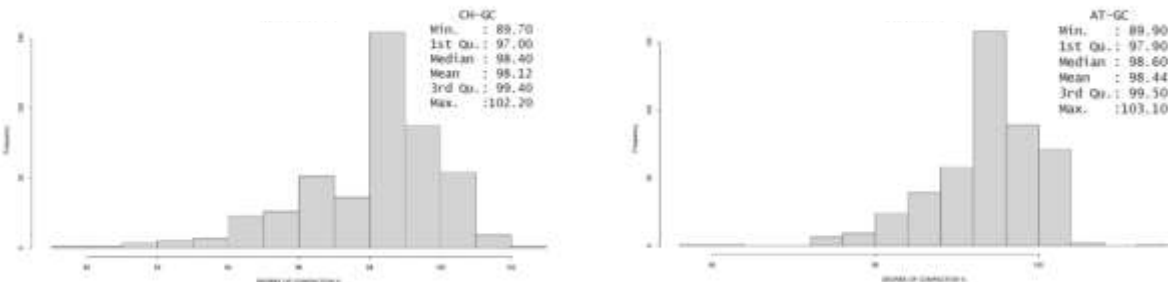


Figura 4. Controle de compactação – Silte

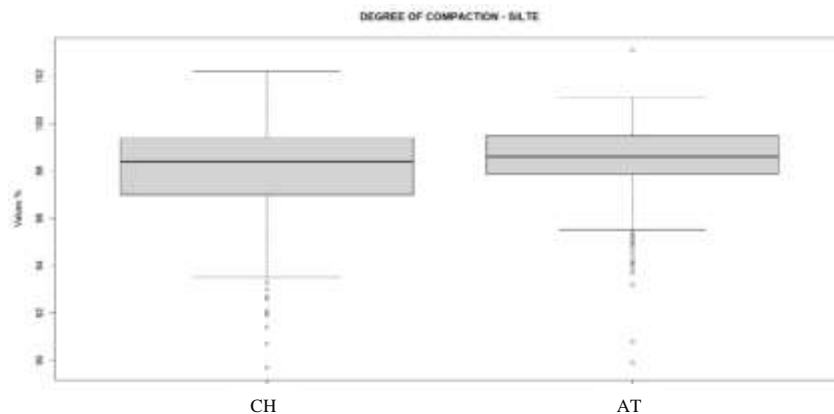


Figura 5. Grau de compactação – Silte



Por meio das análises dos resultados de desvio de umidade no material silteoso, as amostras se mostram condizentes com os critérios de projeto, com a média dos resultados se posicionando no ramo úmido da curva de compactação e com valores dentro da faixa definida em projeto.

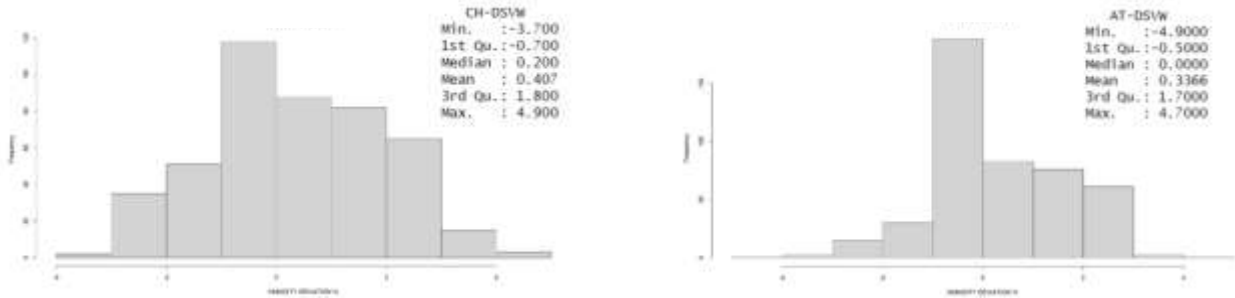


Figura 6. Desvio de umidade - Silte

### 3.2 Argila

Partindo da mesma premissa de projeto para o material argiloso, obtivemos valores similares nos ensaios e conseqüentemente em valores de grau de compactação e desvio de umidade na camada de argila. As Figuras 7 e 8 ilustram o comportamento do material em relação aos parâmetros citados.

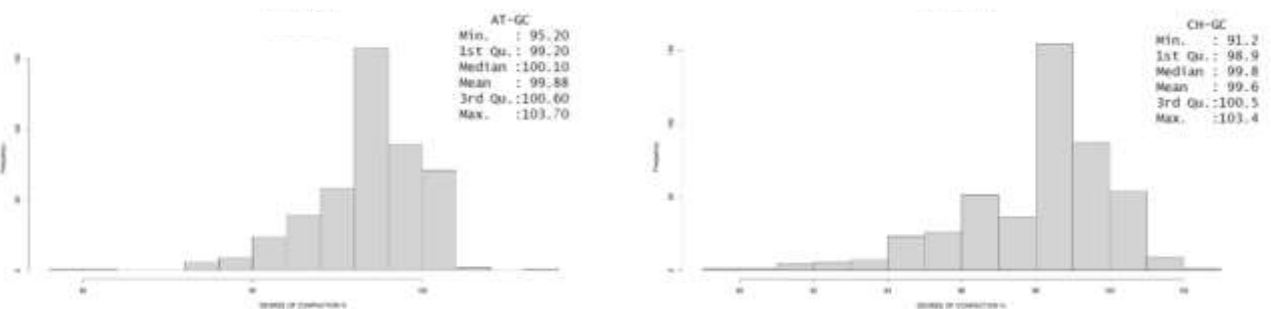


Figura 7. Controle de compactação – Argila

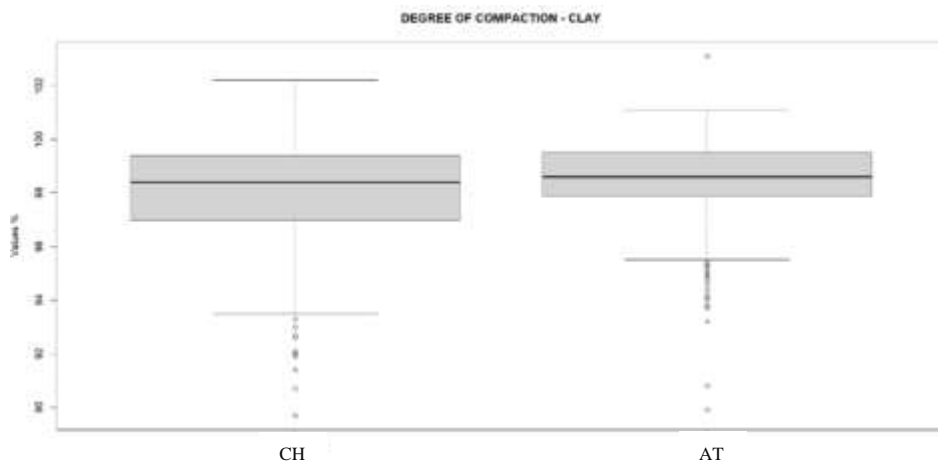


Figura 8. Grau de compactação – Argila

Por meio das análises dos resultados de desvio de umidade no material argiloso, as amostras se mostram condizentes com os critérios de projeto, com a média dos resultados se posicionando no ramo seco da curva de compactação e com valores dentro da faixa definida em projeto.

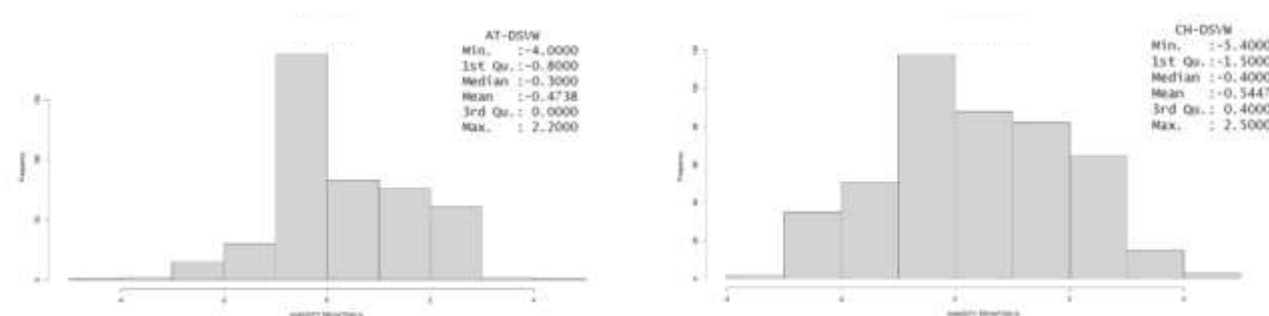


Figura 9. Desvio de umidade – Argila.

Através da Figura 9, pode-se observar que os resultados médios.

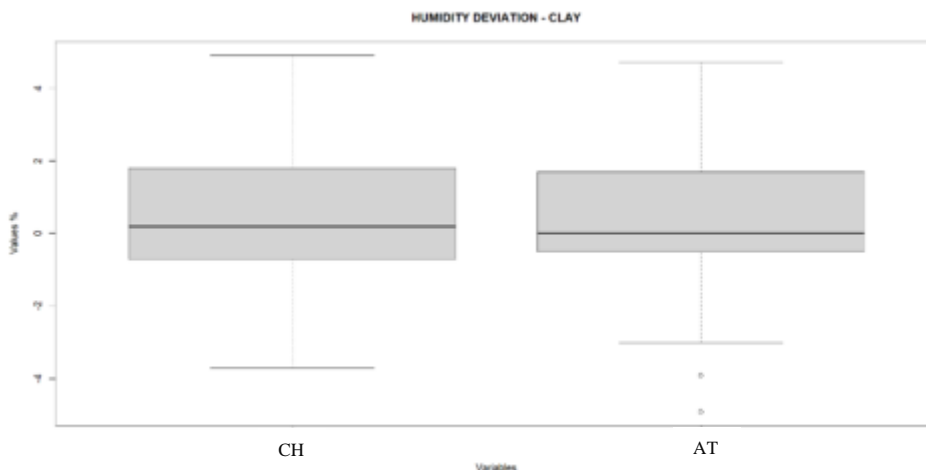


Figura 10. Comparação do desvio de umidade da argila.

#### 4 CONCLUSÃO

A análise dos resultados sugere que a aplicação do método QA/QC no controle de compactação foi eficaz, pois o grau de confiança nos resultados das amostras submetidas ao laboratório indica que não houve contaminação dos dados durante o processo de preparação e análise. Esse monitoramento é realizado por meio de análises gráficas e interpretados de forma a facilitar a tomada de decisão.

Os resultados do método são importantes, pois fornecem informações valiosas para otimizar futuras aplicações para obras de mesmo perfil, auxiliando outras empresas a garantir a excelência da compactação do material e evitando possíveis problemas oriundos de imprecisão de dados.

Em suma, com a aplicação da ferramenta QA/QC, não apenas na fase amostragem, mas também em cada uma das etapas do processo de compactação, serão detectados erros que poderão ser corrigidos. Assim, garantiremos uma boa obtenção de dados, o que permitirá uma estimativa de recursos de curto e longo prazo na operação da obra.

Conforme evidenciado no estudo as divergências entre os laboratórios revelam o quanto é necessário padronizar e treinar os profissionais de forma que os resultados apresentem convergência entre operadores distintos utilizando o mesmo material, uma alternativa que vem sendo estudada e a utilização do densímetro nuclear, uma alternativa que visa reduzir as divergências resultantes de desvios de operação nos ensaios manuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 12102. Solo Controle de Compactação HILF. Rio de Janeiro. 21p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 16097. Solo (*Determinação Do Teor de Umidade - Métodos Expeditos de Ensaio*). Rio de Janeiro. 5p.
- MASSAD, F. (2003). Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia. São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos, 170 p.
- Nataly, B., Pilco, M. R., Detritos En, D. E., Tipo, D., & De Cobre, P. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia TESIS Presentada por: "IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (QA/QC) PARA EL MUESTREO.*