

IMPACTO DAS TÉCNICAS DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA ECONOMIA: UM ESTUDO SOBRE A SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

IMPACT OF TECHNOLOGICAL CONTROL TECHNIQUES ON THE ECONOMY: A STUDY ON THE SELECTION OF SOIL COMPACTION EQUIPMENT

Eduardo Melo Godinho *
Nicolas Bastos Vieira Rodrigues **
Dennys Vaneli Pinho***
Liercio Feital Motta Júnior****

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise comparativa de três tipos de rolos compactadores, avaliados quanto à eficiência econômica e operacional em projetos de compactação de solo. Ensaios foram realizados para determinar o grau de compactação e a umidade do solo, e os critérios analisados incluem tempo de operação, número de passadas necessárias e eficácia em diferentes cenários. Os resultados destacam um dos modelos por atingir o grau ideal de compactação com menor número de passadas e tempo reduzido, proporcionando economia de custos e aumento de produtividade. Este estudo oferece subsídios para a escolha do equipamento mais adequado às demandas específicas, otimizando recursos em obras de pavimentação.

Palavras-chave: Compactação de solo, rolos compactadores, eficiência econômica, grau de compactação, obras de pavimentação.

ABSTRACT

This article presents a comparative analysis of three types of compactors, evaluated in terms of economic and operational efficiency in soil compaction projects. Tests were conducted to determine the compaction degree and soil moisture, and the criteria analyzed include operating time, the number of passes required, and

* Rede de Ensino Doctum – Unidade Dom Orione – eduardomelogodinho@gmail.com – graduando em engenharia civil

** Rede de Ensino Doctum – Unidade Dom Orione – nicolasbastosvieira@gmail.com – graduando em engenharia civil

*** Rede de Ensino Doctum – Unidade Dom Orione – dennysvaneli3001@gmail.com – graduando em engenharia civil

**** Rede de Ensino Doctum – Unidade Dom Orione – liercioengenhariajf@doctum.edu.br – orientador do trabalho

effectiveness in different scenarios. The results highlight one model for achieving the optimal compaction degree with fewer passes and reduced time, resulting in cost savings and increased productivity. This study provides valuable insights for selecting the most suitable equipment for specific demands, optimizing resources in paving projects.

Keywords: Soil compaction, compactors, economic efficiency, compaction degree, paving projects.

1 - Introdução

A compactação do solo é uma etapa crítica na construção civil, essencial para garantir a estabilidade e durabilidade das estruturas. No entanto, ao não utilizar métodos avançados de controle tecnológico na seleção de equipamentos de compactação, os profissionais da Engenharia Civil enfrentam uma série de problemas potenciais (CRISPIM, 2015).

A ausência de uma abordagem sistemática e baseada em dados leva à escolha inadequada de equipamentos, resultando em subutilização ou sobrecarga, o que compromete a eficiência e a qualidade das obras. Isso, por sua vez, aumenta os custos devido a retrabalhos, reparos e até falhas estruturais. A falta de controle tecnológico também dificulta a identificação de oportunidades de otimização e eficiência, impedindo o aproveitamento completo dos equipamentos disponíveis no mercado. A não adoção desses métodos impõe um obstáculo significativo ao sucesso econômico e técnico dos projetos de construção civil.

Diante dessa situação, este trabalho busca entender como a implementação de técnicas de controle tecnológico pode impactar a economia na seleção de equipamentos de compactação do solo.

Para alcançar esse objetivo, o estudo se propõe a realizar uma análise abrangente de três diferentes tipos de equipamentos de compactação e dos métodos de controle disponíveis, além de investigar como a implementação de técnicas de controle tecnológico influencia diretamente a eficiência e a economia na construção civil.

As hipóteses levantadas indicam que o uso de diferentes tipos de equipamentos de compactação resulta em variações nos resultados da compactação; que a implementação do controle tecnológico melhora a qualidade das obras e reduz a necessidade de retrabalhos e reparos; e que equipamentos modernos de compactação, quando selecionados com base em dados tecnológicos, oferecem um melhor custo-benefício, tanto no curto quanto no longo prazo.

Este estudo se justifica em três aspectos principais: pessoal, social e acadêmico. A experiência profissional e acadêmica do pesquisador revelou desafios e custos associados à seleção inadequada de equipamentos de compactação do solo. Do ponto de vista social, uma compactação eficaz do solo é essencial para a segurança e durabilidade das infraestruturas, impactando diretamente a qualidade de vida das comunidades. No âmbito acadêmico, a pesquisa contribuirá para o corpo de conhecimento existente, oferecendo uma compreensão mais profunda dos benefícios do controle tecnológico avançado na compactação de solos, além de fornecer diretrizes práticas para estudos futuros e aplicações na engenharia civil.

A pesquisa adotará uma abordagem metodológica mista, combinando revisão crítica de literatura, análise de estudos de caso e avaliação de dados empíricos. A condução da pesquisa se dividirá em duas fases principais: a primeira fase focará na coleta e análise de dados sobre diferentes tipos de equipamentos de compactação e métodos de controle disponíveis; a segunda fase aplicará essas técnicas em cenários práticos, avaliando a eficiência e economia resultantes. O estudo incluirá a utilização de ensaios laboratoriais e em campo, permitindo uma avaliação abrangente das variáveis envolvidas.

O estudo é relevante por buscar preencher uma lacuna de conhecimento, abordando os benefícios da aplicação de técnicas de controle tecnológico na escolha de equipamentos de compactação do solo. Ao investigar a relação entre controle tecnológico, seleção de equipamentos e economia na construção civil, espera-se fornecer informações úteis para profissionais da engenharia civil e contribuir para a melhoria das práticas de engenharia e o desempenho técnico e econômico dos projetos de construção.

2 - Propriedades dos Solos e Técnicas de Compactação: Ensaio e Aplicações

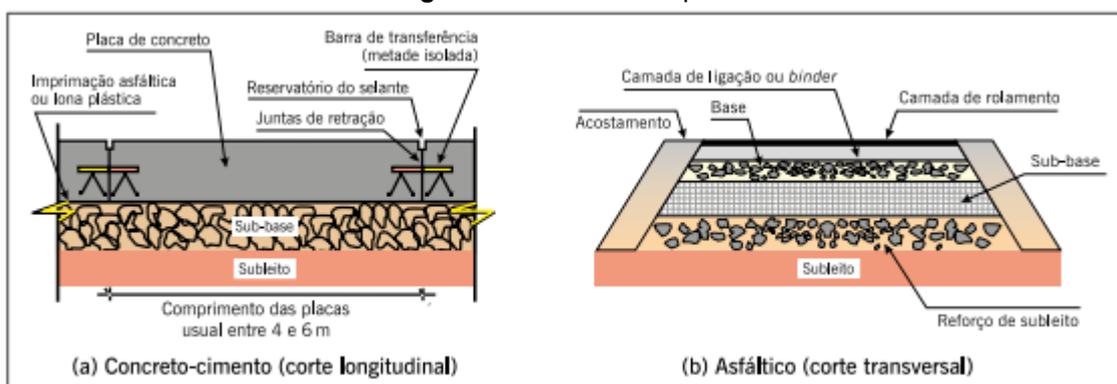
A origem da técnica de compactação é atribuída ao engenheiro norte-americano Proctor, que, em 1933, publicou suas observações sobre o processo de compactação em aterros. (Pinto, 2006)

2.1 – Pavimento

Os pavimentos de concreto-cimento consistem em revestimentos formados por placas de concreto de cimento Portland. A espessura dessas placas é dimensionada com base na resistência à flexão do concreto e na capacidade de suporte das camadas subjacentes. As placas podem ser projetadas com ou sem armaduras de aço, dependendo das exigências estruturais e das condições de carga. (BERNUCCI, 2022) De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos flexíveis são caracterizados pela deformação elástica de todas as suas camadas após a aplicação de cargas. Esse comportamento resulta em uma distribuição uniforme das tensões ao longo das camadas. Nessas estruturas, o campo de tensões se concentra no ponto de aplicação da carga, onde as pressões são mais intensas (BALBO, 2007). Podemos ver na figura a seguir as diferenças entre um pavimento rígido e um pavimento flexível.

A figura 1 a seguir mostra características de 2 tipos diferentes de pavimentos.

Figura 1: Estruturas de pavimentos



Fonte: Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros (2ª Edição – 2022)

A figura 1 mostra como os pavimentos são classificados em rígidos e flexíveis. O pavimento rígido é composto por uma placa de concreto, com imprimação asfáltica na

parte superior da sub-base, juntas de retração seladas e barras de transferência para distribuição de carga. Já o pavimento flexível é formado por camadas como camada de ligação, base, sub-base, camada de rolamento e subleito, que trabalham juntas para distribuir as cargas. A escolha entre os dois tipos depende das condições do projeto, solo e tráfego.

2.2 - Origem e Formação dos Solos

Os solos são formados a partir do intemperismo ou meteorização das rochas, processos que podem ocorrer por desintegração mecânica ou decomposição química. A desintegração mecânica, impulsionada por agentes como água, temperatura, vegetação e vento, resulta na formação de pedregulhos e areias (solos de partículas grossas), siltes (partículas intermediárias) e, em condições especiais, argilas (partículas finas). (CAPUTO, 1988)

Segundo Caputo (1988), a decomposição química das rochas, com a água como agente principal, ocorre por oxidação, hidratação e carbonatação, formando argila. Esses processos, que podem variar conforme o clima, resultam na formação do solo a partir da rocha-matriz. Solos que mantêm a estrutura original da rocha são chamados saprolíticos.

2.3 - Fundamentos Teóricos e Práticos da Compactação dos Solos

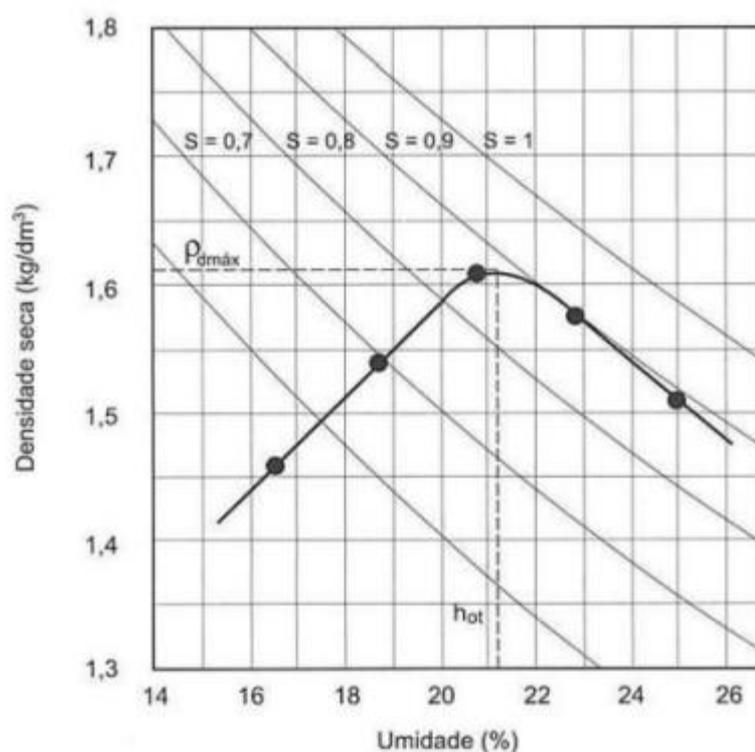
Existe uma relação direta entre o peso específico seco de um solo e sua umidade, a qual pode ser representada por meio de uma curva de compactação (Proctor, 1933). A partir da curva de compactação, observa-se que, para uma determinada energia de compactação aplicada, existe um teor de umidade específico, denominado umidade ótima (h_{ot}), que resulta no maior valor de peso específico aparente seco, conhecido como peso específico seco máximo ($P_{dmáx}$). A curva de compactação apresenta dois ramos distintos: o ramo ascendente, associado a baixos teores de umidade, é chamado de ramo seco; enquanto o ramo descendente, onde o excesso de umidade começa a reduzir a compactação, é conhecido como ramo úmido. (TRINDADE, 2008)

Para o traçado da curva de compactação, é recomendável determinar pelo menos cinco pontos distintos. Dentre esses, dois devem estar localizados na zona seca

(ramo esquerdo da curva), um próximo à umidade ótima, e os outros dois na zona úmida (ramo direito da curva). Esse procedimento garante uma representação precisa da variação do peso específico seco em função da umidade, permitindo identificar com clareza a umidade ótima e o comportamento do solo nas regiões seca e úmida. (CAPUTO, 1988)

A Figura 2 mostra uma curva de compactação obtida em ensaios.

Figura 2: Curva de compactação de um solo



Fonte: Pinto (2006)

A Figura 2 exibe uma curva típica de compactação, onde são mostrados o teor de umidade ideal (h_{ot}), e a densidade seca máxima ($P_{dmáx}$).

(TRINDADE, 2008) O ensaio de compactação criado por Proctor foi formalmente padronizado pela AASHO (American Association of State Highway Officials), que atualmente é conhecida como AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Este ensaio é reconhecido como “Ensaio Proctor Normal”. No Brasil, a normalização foi realizada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas

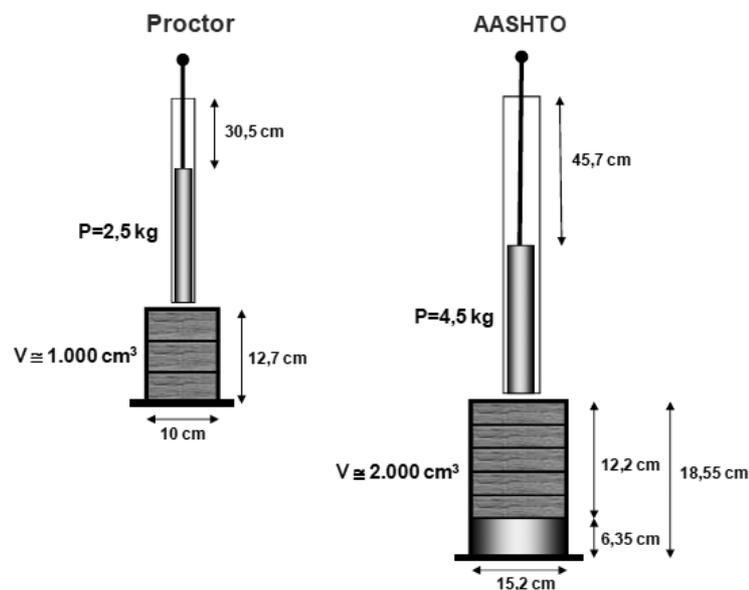
Técnicas) por meio do método MB-33 (ABNT, 1984), sendo chamado de “Ensaio Normal de Compactação”.

Se o esforço de compactação utilizado for diferente, os valores de umidade ótima (h_{ot}), e de densidade seca máxima ($P_{dmáx}$) também serão alterados. O ensaio, portanto, é convencional. Proctor realizou estudos com base nas condições práticas da época. No entanto, com o aumento do peso dos equipamentos de compactação atualmente, tornou-se necessário ajustar as condições do ensaio para garantir a correlação essencial com o esforço de compactação observado em campo. Assim, foi desenvolvido o ensaio modificado de Proctor, também conhecido como AASHTO Modificado. (CAPUTO, 1988)

O cilindro pequeno, utilizado no ensaio de Proctor, tem um diâmetro de $100 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ e um volume de $1.000 \text{ cm}^3 \pm 10 \text{ cm}^3$. Por outro lado, o cilindro grande, conforme as normas ISC/AASHTO, apresenta um diâmetro de $152,4 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$ e um volume de $2.085 \text{ cm}^3 \pm 22 \text{ cm}^3$. O soquete pequeno, feito de material metálico, possui uma massa de $2.500 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ e uma altura de queda de $305 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Já o soquete grande, também metálico, tem uma massa de $4.536 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ e uma altura de queda de $457 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. (CARVALHO, 2022)

A Figura 3 a seguir mostra característica de 2 cilindros e soquetes distintos.

Figura 3: Cilindros e soquetes empregados em ensaios de compactação Proctor Normal.



Fonte: Suporte Solos

A Figura 3 mostra a diferença entre os cilindros utilizados em ensaios de Proctor normal e modificado.

Esses quadros incluem as energias de compactação correspondentes a cada modalidade de ensaio, facilitando a compreensão das diretrizes para a execução desses testes. (TRINDADE, 2008)

As Tabelas 1 e 2 apresentam as energias de compactação, as quais são classificadas em três níveis: compactação normal, compactação intermediária e compactação modificada.

Tabela 1: Energias de compactação Para (Cilindro Pequeno)

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fonte: ABNT NBR 7182:2020.

A Tabela 1 apresenta exclusivamente a classificação do cilindro de pequeno porte.

Tabela 2: Energias de compactação Para (Cilindro Grande)

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador mm	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182:2020.

A Tabela 2 apresenta exclusivamente a classificação do cilindro de grande porte.

2.4 - Compactação no Campo

Os equipamentos de compactação devem ser selecionados conforme o tipo de solo. Os rolos pé-de-carneiro são indicados para solos argilosos, pois conseguem penetrar nas camadas iniciais durante as primeiras passadas, alcançando as camadas inferiores e prevenindo a formação de uma crosta superficial que poderia reduzir a eficácia do equipamento em maiores profundidades. Rolos pneumáticos são eficientes para uma ampla gama de tipos de solo, exigindo ajustes no peso do equipamento e na pressão dos pneus, conforme as condições específicas. Os rolos vibratórios, por sua vez, são especialmente recomendados para solos granulares, devido à sua capacidade de acomodar melhor as partículas do solo. (PINTO, 2006)

Na realização da compactação, os equipamentos executam um número determinado de passadas até que se alcance a massa específica desejada na umidade projetada. Não existem métodos empíricos que definam com precisão o número exato de passadas necessárias para cada tipo de equipamento a fim de obter a compactação desejada no campo. Assim, na prática, é comum realizar um levantamento com diferentes quantidades de passadas utilizando os equipamentos disponíveis na obra, avaliando os resultados da compactação até que um número adequado de passadas seja estabelecido para cada equipamento. Essa avaliação é realizada por meio do controle de compactação. (ALMEIDA, 2017)

Os compactadores de placa e os compactadores de impacto/vibratórios, que incluem pilões manuais, pilões a explosão ("sapos mecânicos") e soquetes a ar comprimido, são equipamentos versáteis que podem ser utilizados em quase todos os tipos de terreno. Eles são particularmente adequados para operações complementares de compactação e para o trabalho em áreas restritas ou de difícil acesso, onde o uso de equipamentos maiores seria inviável. (TRINDADE, 2008)

2.5 – Controle após a compactação

Conforme NBR 9813 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) podemos observar que para a execução do cilindro biselado, é necessário posicioná-lo, previamente lubrificado com uma fina camada de óleo em seu interior, sobre uma superfície do solo devidamente nivelada e livre de partículas soltas. Em seguida,

monta-se o restante do equipamento e inicia-se a cravação do cilindro utilizando a queda livre do soquete, assegurando que a haste permaneça na vertical. Essa cravação deve ser contínua até que a borda superior do cilindro fique a 1,0 cm abaixo da superfície do terreno. Após a cravação, desmonta-se o conjunto e, com o auxílio de uma pá e uma picareta, escava-se ao redor do cilindro, realizando um corte no solo abaixo dele, até uma profundidade mínima de 5,0 cm abaixo da borda inferior. Utiliza-se uma espátula para remover o solo em excesso e nivelar ambas as faces do corpo de prova com uma régua biselada. Caso a amostra contida no cilindro esteja amassada, fissurada ou não represente adequadamente o solo local, ou se contiver pedregulhos, raízes ou outros materiais indesejados, se o cilindro não estiver totalmente preenchido, ou se houver danos durante a cravação, o procedimento deve ser repetido. Por fim, a massa do cilindro com o material (M) deve ser determinada imediatamente para evitar a perda de umidade, com precisão de 1,0 g.

A partir do solo extraído do furo, realiza-se o ensaio de teor de umidade utilizando o método da frigideira, que consiste em aquecer a amostra com um fogareiro até que se atinja a constância de massa. (ALMEIDA, 2017)

A partir dos dados obtidos, calcula-se o Grau de Compactação (GC) e o Desvio de Umidade (Δw), conforme as equações 1 e 2

$$GC = \frac{P_d \text{ in situ}}{P_{dm\acute{a}x} \text{ laborat\acute{o}rio}} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\Delta w = w - w_{\acute{o}t} \quad (\text{Eq.3})$$

(ALMEIDA, 2017) No campo, o Grau de Compactação (GC) deve ser sempre de 100%, o que significa que a massa específica seca obtida no campo ($P_d \text{ in situ}$) deve ser igual à massa específica seca máxima determinada em laboratório a ($P_{dm\acute{a}x}$). Além disso, a umidade medida em campo (w) e a umidade ótima determinada em laboratório ($w_{\acute{o}t}$) não devem apresentar uma variação superior a 2%, ou seja, $\Delta w = \pm 2\%$.

3 – Metodologia

A pesquisa realizada neste trabalho pode ser classificada de diversas maneiras, conforme diferentes critérios metodológicos.

Do ponto de vista da natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, uma vez que visa a gerar conhecimento para a solução de problemas práticos relacionados à economia de rolos de compactação. Esse tipo de pesquisa é focado na aplicação dos resultados em situações reais, buscando contribuir diretamente para o avanço de práticas e processos no setor.

Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa é qualitativa. Isso significa que o foco principal é a compreensão aprofundada do fenômeno em estudo, considerando as nuances e complexidades que não podem ser captadas por métodos quantitativos. A análise qualitativa permite explorar aspectos subjetivos e contextuais, proporcionando uma visão holística do tema.

Em termos de objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória. Esse tipo de pesquisa é indicado quando se busca entender melhor um problema pouco conhecido ou aprofundar o conhecimento sobre uma questão específica. No caso deste trabalho, o objetivo é investigar e compreender as variáveis que influenciam a eficiência dos rolos de compactação, oferecendo novas perspectivas e insights sobre o tema.

Por fim, do ponto de vista dos procedimentos técnicos, foi realizado um levantamento. Esse método consiste na coleta e análise de dados primários através de questionários, entrevistas ou observações, com o objetivo de reunir informações relevantes sobre o tema de estudo.

A pesquisa foi conduzida predominantemente por meio da consulta a bases de dados acadêmicas e fontes digitais especializadas. Utilizou-se o Google Acadêmico para localizar artigos científicos e publicações técnicas, empregando termos-chave como compactação de solos, rolos compactadores e energia de compactação. Complementarmente, foi realizada uma investigação direta na internet e consulta a livros disponíveis em formato PDF, visando à obtenção de citações e informações para fundamentar o conteúdo final do trabalho.

Este estudo foi conduzido através de um acompanhamento direto em um canteiro de obras. O solo utilizado foi extraído de uma jazida específica e transportado para o local designado

Após o transporte do solo para o local da obra, foi feito o espalhamento do material em 3 trechos de 100 metros, em seguida, foram realizadas três operações de compactação, utilizando três rolos compactadores distintos, cada um variando em peso operacional, frequência de vibração e força de impacto aplicada ao solo.

Após realizada a compactação do solo, foi coletada uma amostra utilizando um cilindro biselado para determinar a massa específica e o teor de umidade in situ em cada um dos 3 trechos distintos.

Após a coleta dos dados de compactação e com os dados do desempenho dos 3 rolos compactadores utilizados, foram realizadas análises para determinar qual dos três rolos compactadores apresentou o melhor desempenho.

4 – Resultados e Discussões

A seguir, serão apresentados os resultados e as discussões pertinentes ao estudo realizado.

4.1 – Caracterização do Solo

O solo a ser analisado corresponde a uma argila vermelha, resultante do intemperismo químico da rocha matriz. Este processo de alteração da rocha original conduziu à formação de uma matriz argilosa, caracterizada pela presença de óxidos de ferro que conferem ao solo sua coloração avermelhada, típica de solos de regiões tropicais.

4.2 – Resultado dos ensaios de obtenção da umidade ótima

De acordo com os ensaios realizados pela empresa Qualithec, foram determinados a umidade ótima e a massa específica aparente máxima dos solos analisados, estão expostos na tabela 3 a seguir.

Tabela 3: ensaios de 5 amostras para descobrir a umidade ótima

Cilindro N°	32	4	1	8	35
% de água adicionada	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Cilindro mais solo úmido	8595	8510	9110	8715	8555
Solo úmido	4965	4525	5030	45630	4685
Volume do cilindro	3630	3985	4080	4085	3870
Densidade úmida	1,694	1,853	1,947	1,932	1,817

Água adicionada	100	200	300	400	500
Teor de umidade	21,5	23,9	26,3	28,6	31,0
Densidade Seca	1,394	1,496	1,542	1,502	1,387

Fonte: Qualithec (2023)

Conforme os dados fornecidos pela empresa, apresentados na tabela, a umidade ótima do solo é de 26,3%, enquanto a massa específica aparente máxima é de 1,542 g/cm³.

Todos os trechos foram compactados utilizando o mesmo material, garantindo a uniformidade do processo. Da mesma forma, as amostras coletadas foram realizadas com esse mesmo material, assegurando a padronização nos ensaios e análises.

4.3- Compactação do Solo

Após o transporte do solo para o local da obra, foram avaliados 3 trechos de 100 metros cada com 20 cm de espessura, onde o material foi espalhado, em seguida, foram realizadas três operações de compactação, utilizando três rolos compactadores distintos, cada um variando em peso operacional, frequência de vibração e força de impacto aplicada ao solo.

Foi realizado um ensaio no solo conforme a NBR 9813 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). O cilindro biselado, lubrificado com uma fina camada de óleo, foi posicionado sobre uma superfície nivelada do solo, e sua cravação foi feita até que a borda superior ficasse 1,0 cm abaixo da superfície. Após a cravação, o solo ao redor do cilindro foi escavado, e a amostra foi nivelada com uma régua biselada. Caso a amostra apresentasse problemas como fissuras ou materiais indesejados, o procedimento seria repetido. Por fim, a massa do cilindro com o material foi determinada com precisão de 1,0 g.

O Rolo Compactador Dynapac CA 250, conforme mostra a figura 4, foi avaliado durante o processo de compactação de um trecho de 100 metros lineares. O tempo de operação registrado para finalizar essa seção foi de 3 horas e 25 minutos, sendo que a compactação completa do solo exigiu um total de 7 feixes ou passadas, até que se atingisse a densidade especificada no projeto.

Figura 4: Rolo compactador Dynapac CA 250 compactando trecho de 100 metros



Fonte: Autor (2023)

A tabela 4 a seguir analisa os dados da compactação do rolo Dynapac CA 250 in situ.

Tabela 4: ensaios de in situ do rolo Dynapac CA 250

Dados	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	4° ensaio	5° ensaio	6° ensaio	7° ensaio
Grau de compactação	100,1	100,9	100,0	100,2	100,4	100,7	100,0
Teor de Umidade (%)	26,2	26,5	26,3	26,5	26,4	26,5	26,2
Camada	1	2	3	4	5	6	7
Espessura Compactada	20cm						

Fonte: Autor (2024)

Conforme demonstrado na tabela, o rolo compactador atingiu o grau de compactação desejável, mantendo a umidade correta durante o processo.

O Rolo Compactador ASC100 TIER AMMANN, conforme mostra a figura 5, foi avaliado durante o processo de compactação de uma área de 100 metros lineares. O tempo de operação registrado para finalizar essa seção foi de 4 horas e 30 minutos, sendo que a compactação completa do solo exigiu um total de 11 feixes ou passadas, até que se atingisse a densidade especificada no projeto.

Figura 5: Rolo compactador ASC100 TIER AMMANN compactando trecho de 100 metros



Fonte: Autor (2023)

A tabela 5 a seguir analisa os dados da compactação do rolo ASC100 TIER AMMANN.

Tabela 5: ensaios de in situ do rolo ASC100 TIER AMMANN

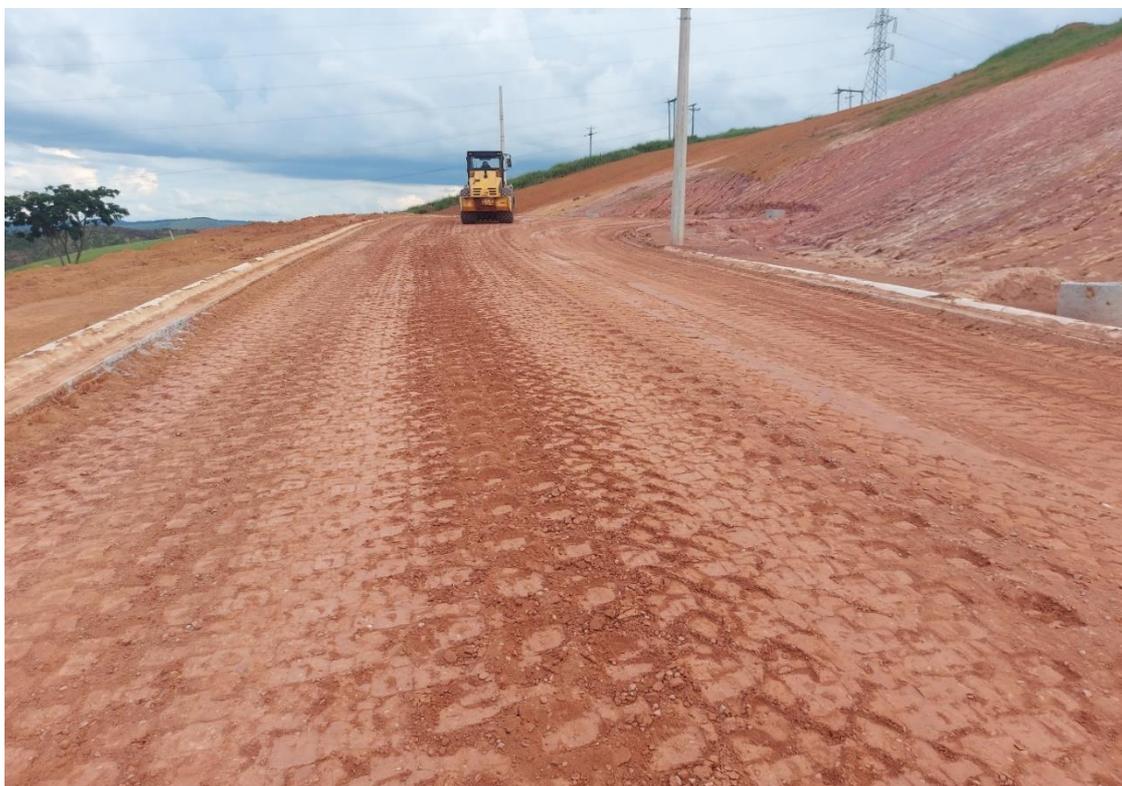
Dados	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	4° ensaio	5° ensaio	6° ensaio	7° ensaio
Grau de compactação	98,7	99,1	99,7	98,8	99,4	98,5	99,7
Teor de Umidade (%)	25,6	26,0	26,1	25,8	26,2	26,3	26,0
Camada	1	2	3	4	5	6	7
Espessura Compactada	20cm						

Fonte: Autor (2024)

Conforme demonstrado na tabela, o rolo compactador atingiu o grau de compactação desejável, mantendo a umidade correta durante o processo.

O Rolo Compactador CAT CP533, conforme mostra a figura 6, foi avaliado durante o processo de compactação de uma área de 100 metros lineares. O tempo de operação registrado para finalizar essa seção foi de 7 horas e 40 minutos, sendo que a compactação completa do solo exigiu um total de 16 feixes ou passadas, até que se atingisse a densidade especificada no projeto.

Figura 6: Rolo compactador CAT CP533 compactando trecho de 100 metros



Fonte: Autor (2023)

A tabela 6 a seguir analisa os dados da compactação do rolo CAT CP533.

Tabela 6: ensaios de in situ do rolo CAT CP533

Dados	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	4° ensaio	5° ensaio	6° ensaio	7° ensaio
Grau de compactação	98,0	97,0	95,5	97,1	99,9	98,6	96,8
Teor de Umidade (%)	25,5	25,2	24,9	25,1	26,3	25,7	25,0
Camada	1	2	3	4	5	6	7
Espessura Compactada	20cm						

Fonte: Autor (2024)

Conforme demonstrado na tabela, o rolo compactador atingiu o grau de compactação desejável, mantendo a umidade correta durante o processo.

Durante esses ensaios, foram medidas características fundamentais, como o tempo de duração de cada processo de compactação, bem como a quantidade de feixes ou passadas necessárias para atingir a densidade desejada. Essas medições

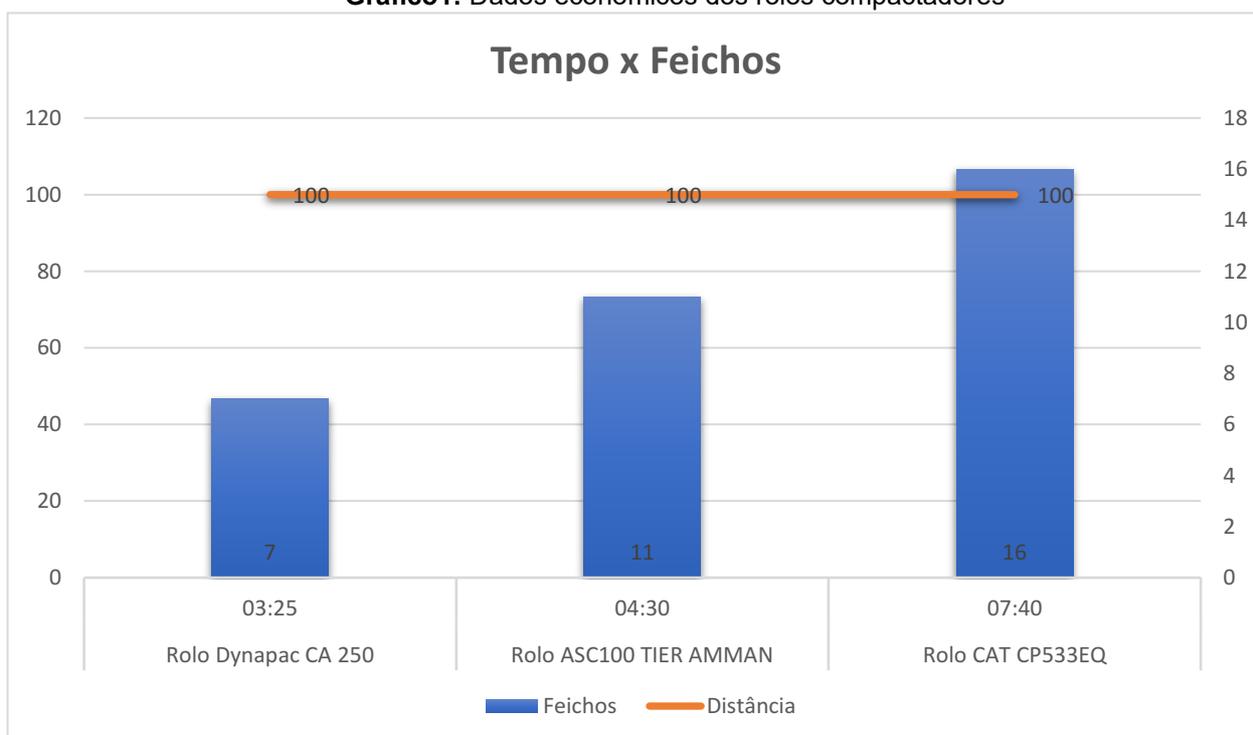
permitiram uma análise comparativa detalhada da eficiência operacional de cada rolo compactador.

4.4- Análise econômica dos equipamentos

A partir dos dados coletados, foi possível determinar a máquina mais eficiente em termos de custo-benefício, levando em consideração não apenas o tempo e o número de passadas, mas também o consumo de combustível, a produtividade por hora de trabalho e o desgaste operacional. Esse processo de avaliação foi essencial para identificar o equipamento que proporcionaria a máxima compactação com o mínimo de recursos, garantindo uma solução mais econômica.

O gráfico a 1 a seguir analisa o resultado econômicos dos 3 rolos.

Gráfico1: Dados econômicos dos rolos compactadores



Fonte: Autor (2024)

A avaliação dos três rolos compactadores revela diferenças significativas em termos de eficiência durante o processo de compactação de trechos de 100 metros lineares. O Rolo Compactador Dynapac CA 250 demonstrou maior eficiência, completando a compactação em um tempo total de 3 horas e 25 minutos, necessitando de 7 passadas para atingir a densidade especificada. Esse desempenho sugere uma menor

demanda de tempo para cada passada, resultando em uma operação mais rápida em comparação aos demais.

O Rolo Compactador CAT CP533, contudo, apresentou um desempenho inferior aos outros equipamentos, levando 7 horas e 40 minutos para compactar o mesmo trecho de 100 metros lineares, necessitando de 16 passadas para atingir a densidade especificada. Esse rolo demandou não apenas um tempo maior para completar a compactação, mas também um número elevado de passadas, indicando uma menor eficiência tanto em termos de tempo total quanto de esforço necessário para alcançar os parâmetros de compactação. Assim, enquanto o Dynapac CA 250 se mostrou mais adequado em cenários que demandam rapidez na execução, o ASC100 TIER AMMANN surge como uma alternativa intermediária, e o CAT CP533, embora menos eficiente, pode ser considerado em situações onde o tempo de operação não é um fator limitante. A análise comparativa entre esses rolos compactadores destaca a importância de se considerar tanto a eficiência temporal quanto a necessidade de passadas ao escolher o equipamento ideal para cada projeto.

Tabela 8: Dados da análise Econômica dos Equipamentos

Rolo Compactador	Tempo Total	Número de Passadas	Eficiência Econômica
Dynapac CA 250	3:25	7	Maior Eficiência
ASC100 TIER AMMANN	4:30	11	Alternativa Balanceada
CAT CP533	7:40	16	Menor Eficiência

Fonte: Autor (2024)

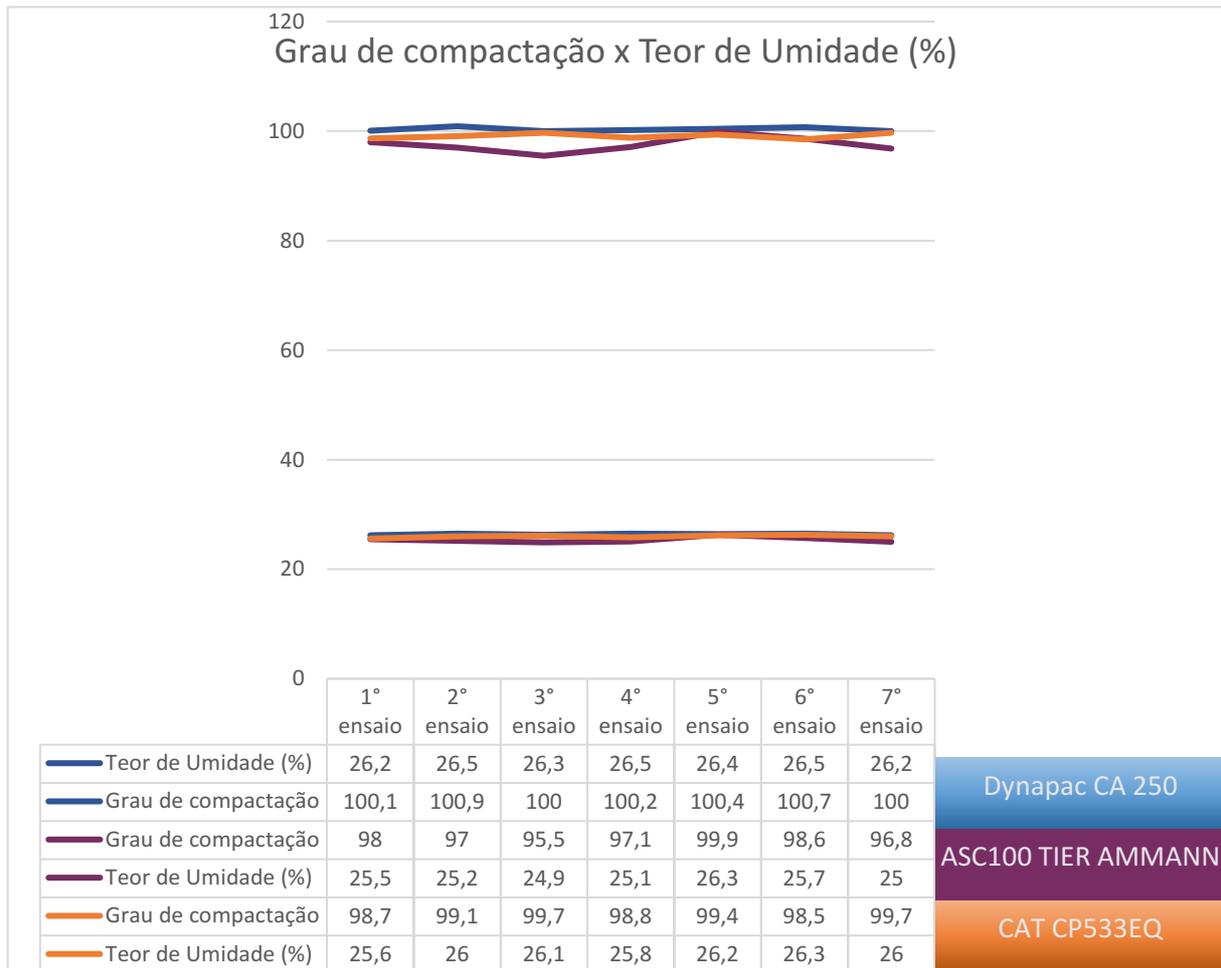
A tabela acima mostra de maneira simplificada os dados analisados no gráfico 1.

4.5- Análise de eficiência dos equipamentos

Os dados apresentados nas tabelas correspondem a uma série de ensaios de compactação realizados com três diferentes rolos compactadores: Dynapac CA 250, ASC100 TIER AMMANN e CAT CP533. A análise dos ensaios foi feita com base no grau de compactação e no teor de umidade ao longo de sete ciclos de ensaios. A seguir, são discutidas as variações observadas em cada equipamento.

O gráfico a 2 a seguir analisa o resultado da eficiência dos 3 rolos.

Gráfico2: Dados da eficiência dos rolos compactadores



Fonte: Autor (2024)

Os dados apresentados no gráfico 2 correspondem a uma série de ensaios de compactação realizados com três diferentes rolos compactadores: Dynapac CA 250, ASC100 TIER AMMANN e CAT CP533. A análise dos ensaios foi feita com base no grau de compactação e no teor de umidade ao longo de sete ciclos de ensaios. A seguir, são discutidas as variações observadas em cada equipamento.

O Dynapac CA 250 apresentou um grau de compactação com variação mínima ao longo dos ensaios, oscilando entre 100,0% e 100,9%. Isso demonstra uma consistência na compactação dos materiais, alcançando sempre um valor próximo ao grau ideal de 100%. O teor de umidade também se manteve relativamente estável, com valores variando entre 26,2% e 26,5%, indicando um controle adequado da umidade durante os ensaios.

O rolo ASC100 TIER AMMANN apresentou um grau de compactação que variou entre 98,5% e 99,7%, registrando valores levemente inferiores ao Dynapac CA 250. Essa variação indica que, em alguns ensaios, o equipamento não atingiu o grau ideal de compactação, o que pode ser associado a pequenas oscilações no controle do processo. Quanto ao teor de umidade, observou-se uma variação de 25,6% a 26,3%, indicando uma leve flutuação nos valores, embora ainda dentro de uma faixa aceitável para a compactação.

O CAT CP533 apresentou maior variabilidade no grau de compactação, com valores entre 95,5% e 99,9%, sendo que em alguns ensaios o grau de compactação ficou consideravelmente abaixo do ideal. Essa maior oscilação pode ser indicativa de uma menor estabilidade do equipamento em manter a compactação uniforme ao longo dos ensaios. O teor de umidade também apresentou variação significativa, com valores variando entre 24,9% e 26,3%.

Tabela 9: Dados da análise de Eficiência dos Equipamentos.

Rolo Compactador	Grau de Compactação	Teor de Umidade	Eficiência do Resultados
Dynapac CA 250	100,0% a 100,9%	26,2% a 26,5%	Compactação consistente e controlada.
ASC100 TIER AMMANN	98,5% a 99,7%	25,6% a 26,3%	Compactação adequada com leve variação.
CAT CP533	95,5% a 99,9%	24,9% a 26,3%	Maior oscilação e compactação menos uniforme.

Fonte: Autor (2024)

A tabela acima mostra de maneira simplificada os dados analisados no gráfico 2.

5- Considerações Finais

Com base nos dados econômicos coletados, no gráfico 1, podemos concluir que o Rolo Compactador Dynapac CA 250 foi o equipamento que apresentou a maior eficiência econômica em um trecho linear de 100 metros. A análise do tempo de operação, do número de passadas demonstra que este rolo alcançou a densidade especificada no projeto de maneira mais rápida em comparação aos demais rolos avaliados.

Comparando os três equipamentos e os dados que foram obtidos in situ, o Dynapac CA 250 demonstrou a melhor performance, alcançando um grau de compactação

igual e superior a 100%, o que sugere um desempenho mais consistente. Essa análise indica que o Dynapac CA 250 é a opção mais adequada.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M. DE. ENERGIAS PARA COMPACTAÇÃO DE SOLOS DESTINADOS A ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: SOLO - ENSAIO DE COMPACTAÇÃO. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: SOLO – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE IN SITU, COM EMPREGO DE CILINDRO DE CRAVAÇÃO. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica, : materiais, projeto e restauração. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros. 2°. ed. Rio de Janeiro: Trama Criações de Arte, 2022. p. 756

CAPUTO, H. P. MECÂNICA DOS SOLOS - E SUAS APLICAÇÕES. 6°. ed. Rio de Janeiro: L TC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. , 1996. v. 1p. 234

CARVALHO, Ivo De Castro. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA NA DEFORMABILIDADE DE SOLOS ARENOSOS, 2022.

CRISPIM, Flavio Alessandro et al. Compactação de solos em laboratório: Efeito do diâmetro e do número de camadas do corpo de prova. Revista árvore, v. 39, p. 535-542, 2015.

Pinto, Carlos De Souza. Livro Curso Básico de Mecânica Dos Solos. São Paulo, Oficina De Textos, 2006.

TRINDADE, T. P. DA. Fundamentos Teóricos e Práticos da Compactação dos Solos. 1°. ed. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2008. p. 95