



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

RENAN WENDER GOMES DA SILVA

**CORRELAÇÕES PARA IDENTIFICAÇÃO PRÉVIA DO TEOR
DE UMIDADE ÓTIMO DE SOLOS BRASILEIROS**

**NATAL-RN
2022**

Renan Wender Gomes da Silva

Correlações para identificação prévia do teor de umidade ótimo de solos brasileiros

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Natal-RN
2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Renan Wender Gomes da.

Correlações para identificação prévia do teor de umidade ótimo de solos brasileiros / Renan Wender Gomes da Silva. - 2022.

18 f.: il.

Artigo Científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

1. Compactação do Solo - Artigo científico. 2. Umidade Ótima - Artigo científico. 3. Limites de Atterberg - Artigo científico. 4. Limite de Plasticidade - Artigo científico. I. França, Fagner Alexandre Nunes de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.131

Renan Wender Gomes da Silva

Correlações para identificação prévia do teor de umidade ótimo de solos brasileiros

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2022:

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Orientador

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Examinador interno

Eng. Rayanne Karlla Santos da Silva – Examinador externo

Natal-RN
2022

RESUMO

A compactação do solo é de extrema importância na área da Engenharia Civil pois é através dela que basicamente aumentamos a densidade do solo e reduzimos sua porosidade por meio de esforço ou uma pressão contínua, ou seja, é um processo de melhoramento das propriedades solo. Quando se fala em compactação, podemos dar destaque principalmente aos dois principais parâmetros envolvidos: o teor de umidade e a massa específica seca. Em relação à consistência dos solos, são encontrados basicamente em quatro estados: sólido, semi-sólido, plástico e líquido. Para ser possível identificar em qual estado o solo está, existem os limites de Atterberg os quais servem para comparar (ou medir) a quantidade de água com os padrões do comportamento do solo na engenharia. Dentre os limites, este estudo dá destaque ao limite de plasticidade, que pode ser entendido como o teor de umidade que separa o solo do estado plástico do semi-sólido. Na prática, para a realização do ensaio de compactação, é comum adotar valores prévios de umidade ótima próximas do seu limite de plasticidade. Dessa forma, este trabalho visa analisar justamente a verdadeira correlação linear entre esses parâmetros com o intuito de estabelecer uma relação mais confiável para a estipulação do valor de umidade ótimo baseado no seu limite de plasticidade, ou vice-versa. Para isso, foi criado um banco de dados, onde foi analisado as características de 357 diferentes tipos de solo encontrado nas mais diversas regiões brasileiras. Além disso, também foi feita a análise dessa correlação de acordo com o tipo de solo encontrado e de acordo com sua granulometria. Os principais resultados obtidos apontam que a correlação linear entre eles não tende para uma reta de 45°. Com isso, podemos inferir que, de maneira geral, partindo dessa análise dos solos brasileiros, eles não apresentam valores de limite de plasticidade e teor de umidade ótima coincidentes.

Palavras-chave: Compactação do solo, Umidade Ótima, Limites de Atterberg, Limite de Plasticidade.

ABSTRACT

Soil compaction is extremely important in the area of Civil Engineering because it is through it that we basically increase the density of the soil and reduce its porosity through effort or continuous pressure, that is, it is a process of improving soil properties. When talking about compaction, we can highlight mainly the two main parameters involved: the moisture content and the dry density. Regarding the consistency of soils, they are basically found in four states: solid, semi-solid, plastic and liquid. In order to be able to identify which state the soil is in, there are the Atterberg limits which serve to compare (or measure) the amount of water with the patterns of soil behavior in engineering. Among the limits, this study highlights the plasticity limit, which can be understood as the moisture content that separates the soil from the plastic and semi-solid state. In practice, to carry out the compaction test, it is common to adopt previous values of optimal moisture close to its plasticity limit. Thus, this work aims to analyze precisely the true linear correlation between these parameters in order to establish a more reliable relationship for the stipulation of the optimal moisture value based on its plasticity limit, or vice versa. For this, a database was created, where the characteristics of 357 different types of soil found in the most diverse Brazilian regions were analyzed. In addition, the analysis of this correlation was also carried out according to the type of soil found and according to its granulometry. The main results obtained indicate that the linear correlation between them does not tend to a 45° straight line. With this, we can infer that, in general, based on this analysis of Brazilian soils, they do not have coincident plasticity limit values and optimal moisture content.

Keywords: Soil compaction, Optimal Water Content, Atterberg Limits, Plasticity Limit.

1. INTRODUÇÃO

A consistência do solo é uma das características mais importantes para a engenharia, pois determina o comportamento do solo ante determinadas tensões e deformações. Igualmente, exerce considerável influência sobre o regime de água no solo, afetando a condutividade hidráulica e permitindo fazerem-se inferências sobre a curva de compactação. Além disso, é determinante na resistência do solo à penetração e na compactação e seu conhecimento possibilita a determinação do momento adequado do uso de técnicas que favoreçam um bom manejo do solo, propiciando melhor conservação do mesmo e reduzindo a demanda energética nas operações mecanizadas (SOUZA et al., 2000).

Atterberg (1911) identificou que um solo poderá apresentar-se, quando o teor de umidade se aproximar da capacidade de campo, menos aderente e mais plástico, portanto, sujeito a mudança permanente de sua forma, pela ação de uma força aplicada. Entre outros fatores, é fato que o comportamento do solo varia em função da umidade. No entanto, existem alguns limites estabelecidos para caracterizar, de maneira simples e rápida, o comportamento de um solo quanto à sua plasticidade, os quais se constituem em determinações rotineiras nos laboratórios de Mecânica dos Solos.

Quando um solo não saturado é submetido à determinada pressão, ocasionando redução de volume com conseqüente aumento de densidade, ocorre o processo de compactação do solo (GUPTA; ALLMARAS, 1987). A compactação do solo modifica a quantidade e a distribuição dos tamanhos de poros, alterando a quantidade e o fluxo de água no solo.

Uma alternativa para avaliar a suscetibilidade do solo à compactação é o ensaio desenvolvido por Ralph Proctor. Ele se baseia no fato de que a densidade na qual um solo é compactado, sob determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação (PROCTOR, 1933).

Para a realização do ensaio de compactação de maneira eficaz é necessário estipular e adotar valores prévios para o seu teor de umidade ótimo. Na prática, é usual e comum adotar os valores do teor de umidade ótimo próximos do seu limite de plasticidade. Entretanto, para uma maior eficiência nos ensaios e até o propiciamento de engenheiros em loco conhecer melhor o comportamento prévio dos solos, é válido a análise e o estabelecimento da correlação prévia entre esses parâmetros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Compactação dos solos

Segundo Pinto (2006), a compactação tem por finalidade dois aspectos: incrementar o grau de contato entre os grãos e tornar a amostra mais homogênea. Com a redução do índice de vazios diversas propriedades do solo são melhoradas do ponto de vista geotécnico, porém o tipo de obra e o solo disponível na região irão determinar os procedimentos a serem adotados na compactação, que aumentará a rigidez e a resistência do solo, reduzindo dessa maneira a permeabilidade e prevenindo a estrutura de eventuais recalques.

A compactação dos solos em si pode ser entendida como a redução do índice de vazios face à compressão ou expulsão do ar dos poros. Além das finalidades abordadas anteriormente, a compactação do solo é feita quando se possui a necessidade de melhorar as qualidades mecânicas, hidráulicas (reduzindo a permeabilidade) e aumentar a resistência ao cisalhamento do solo.

Na ocasião em que o processo de compactação se dá com uma umidade baixa do solo, o grau de atrito entre as partículas é elevado de maneira a não ser possível uma redução significativa dos vazios, no entanto para umidades mais elevadas a água promove um efeito de lubrificação entre os grãos, que se acomodam de forma mais compacta.

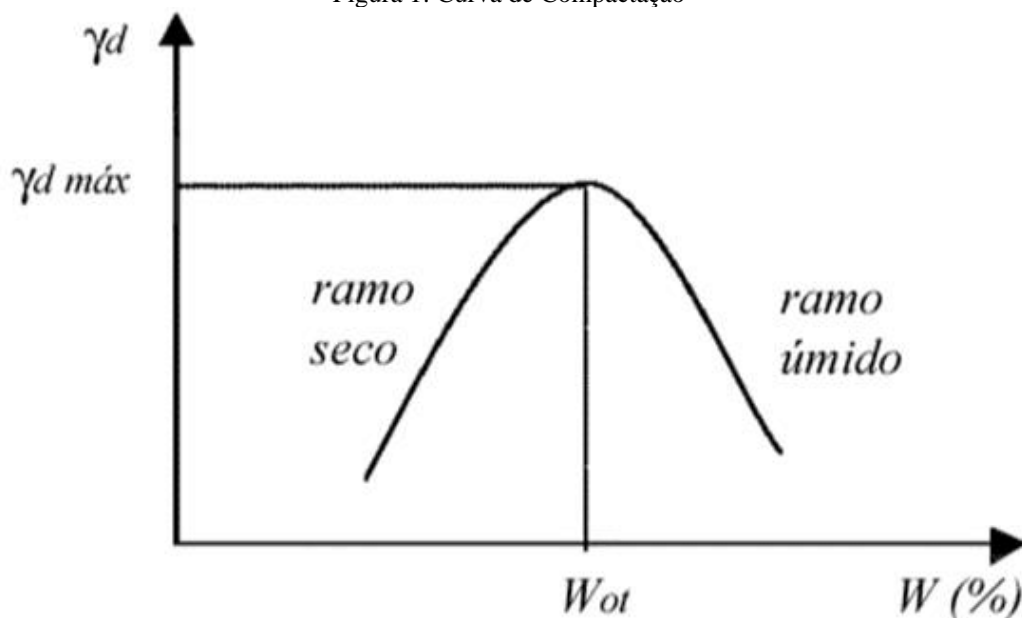
No processo de compactação o aumento da massa específica seca se dá pela eliminação de ar dos vazios, permanecendo assim constantes as quantidades de grãos e de água no solo. Existe, no entanto, para a energia aplicada no processo de compactação um determinado teor de umidade, denominado umidade ótima (atualmente obtida através do ensaio de compactação ABNT NBR 7182:2016 Versão corrigida: 2020), que conduz a uma massa específica seca máxima.

Esses parâmetros da compactação do solo são obtidos através de ensaios laboratoriais. Os estudos geotécnicos de compactação tiveram início com a teoria de compactação desenvolvida por Ralph Proctor na década de 1930. As avaliações feitas por Proctor concluíram que um solo compactado deve ter sua necessidade definida pela quantidade de energia de compactação e umidade.

É por meio do ensaio de compactação que se torna viável a obtenção da curva gráfica responsável por definir a quantidade ideal da umidade e densidade seca em um solo. A NBR-7182/2016 é a Norma Regulamentadora que orienta quais os procedimentos são permitidos e orientados para se obter os resultados satisfatórios. Além disso, esse ensaio de compactação desenvolvido por Proctor foi normalizado pela associação dos departamentos rodoviários americanos, AASHO (American Association of State Highway Officials) e é conhecido como Ensaio de Proctor Normal, AASHO Standart ou ensaio normal de compactação.

A compactação dos solos é geralmente representada em um gráfico da variação do peso específico aparente seco (γ_d) versus o teor de umidade (w) correspondente durante o processo de compactação, como pode ser visto no gráfico representativo abaixo pela figura 1.

Figura 1: Curva de Compactação



Fonte: Trindade et al (2003).

Para a confecção da curva, o solo a ser ensaiado deverá inicialmente apresentar um teor de umidade pelo menos 5% inferior ao teor ótimo previsto para compactação do 1º ponto do ensaio. Após a compactação, deve-se anotar a massa do corpo de prova para determinação da massa específica seca e retirar três porções do solo, colocá-las em cápsulas e levá-las à estufa

para determinação do teor de umidade. Posteriormente se adiciona uma certa quantidade de água ao solo, suficiente para elevar, em relação ao ponto anterior, o seu teor de umidade, em torno de 2%. Após isso, é necessário realizar novamente todas as etapas descritas anteriormente. Idealmente esse ensaio é realizado tomando como base de quatro a cinco pontos de forma que se possam ter dois pontos abaixo e dois acima do teor de umidade ótimo.

Retomando para a figura 1, um aspecto importante a ser apresentado é a respeito da identificação dos ramos do solo a partir da curva de compactação. Entende-se por ramo ascendente a parte em que a água é capaz de lubrificar as partículas para que seja mais fácil o arranjo do solo. Esse procedimento garante que seja possível acrescentar a massa com aparência mais seca. Já com relação ao descendente, o papel da água é o de amortizar a compactação do solo e oferecer uma amostra que tem mais a presença da água que sólidos. Nesse caso, remove uma quantidade específica de massa seca.

Além disso, é importante destacar também que durante o processo de compactação dos solos, o teor em água no solo mantém-se praticamente constante, sendo esta característica que difere o processo de compactação do processo de consolidação dos solos, uma vez que neste último ocorre a expulsão da água dos vazios do solo.

Outro parâmetro de extrema importância na compactação dos solos é referente a energia ou esforço de compactação que é o trabalho realizado durante o processo de compactação de uma amostra de solo. O ensaio de Proctor pode ser realizado utilizando três tipos de energia de compactação: o padrão utilizando a energia normal, utilizando energia modificada ou utilizando energia intermediária. É importante ressaltar que essas energias são aplicadas no solo dentro do cilindro através de camadas.

No ensaio de Proctor normal é utilizado um cilindro de 10 cm de diâmetro, altura de 12,73cm e volume de 1.000cm³. A amostra é submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5Kg e caindo de 30,5cm. É o ensaio mais utilizado pois ele corresponde ao efeito de compactação com os equipamentos convencionais de campo.

O ensaio modificado utiliza o cilindro de 15,24 cm de diâmetro, 11,43 cm de altura, 2.085 cm³ de volume, peso do soquete de 4,536 kg e altura de queda de 45,7 cm aplicando-se 55 golpes por camada. É utilizado nas camadas mais importantes do pavimento, para os quais a melhoria das propriedades do solo, justifica o emprego de uma maior energia de compactação.

O ensaio intermediário, por sua vez é idêntico ao modificado, entretanto ele é realizado com 26 golpes por camada.

Por fim, realizado o ensaio de compactação e tendo em mãos os resultados obtidos, são efetuados cálculos através de correlações de mecânica dos solos para a determinação do peso específico aparente seco (γ_d) e a determinação da curva de saturação.

Na imagem abaixo (figura 2) é possível verificar algumas etapas do processo de compactação na prática dos laboratórios de solos como o preparo do cilindro, a separação do solo por camadas e o acabamento final da última camada de solo.

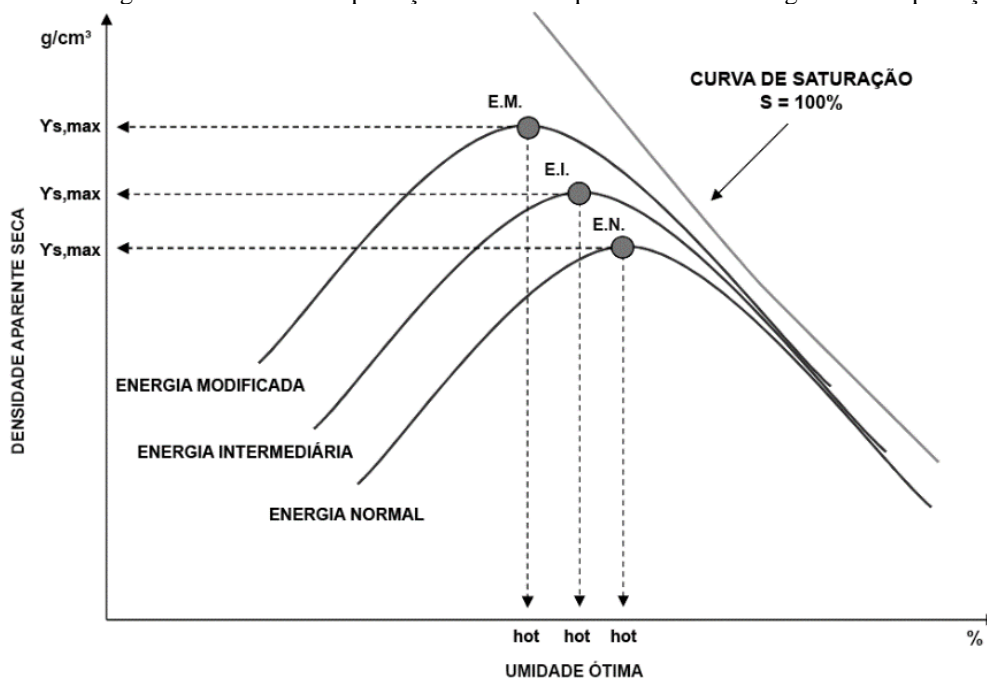
Figura 2: Representação das diferentes etapas do processo de compactação



Fonte: Ensaio de compactação (2016).

Outro aspecto de importante relevância para se comentar no processo de compactação dos solos, é que quando se aumenta a energia de compactação utilizada, são obtidos diferentes valores para a umidade ótima ($w_{ót}$) e para a densidade máxima aparente seca ($\gamma_{s,máx}$). Como se pode verificar pela figura 3 a seguir, quanto maior a energia aplicada ao solo, maior será o valor de massa específica aparente seca obtida, entretanto, esse fator não ocorre para a umidade ótima correspondente, ou seja, quanto maior a energia de compactação aplicada ao solo, menor será o valor da umidade ótima para esse solo.

Figura 3: Curva de compactação de um solo para diferentes energias de compactação



Fonte: Compactação de Solos (2018).

Esse fenômeno das energias mencionado anteriormente geralmente é explicado pelo fato de que quanto maior for o esforço de compactação, os grãos dos solos são forçados a ficar mais próximos uns dos outros. Já a respeito da umidade, com pouca umidade, irá surgir o atrito grão-a-grão que dificulta o esforço de compactação, impedindo o seu entrosamento completo, de forma a atingir grandes densidades.

Por fim, partindo para o processo de compactação do solo em campo, ele pode ser feito tanto manualmente quanto por meio de equipamentos de pressão, impacto e/ou vibração. Embora os dois meios sejam eficientes, o uso de equipamentos mais modernos possui a vantagem de reduzir consideravelmente o tempo de trabalho em troca do seu custo mais elevado. Além disso, o universo de compactação é muito amplo, sendo necessário e executado em aterros dos mais diferentes portes, em obras de arte especiais e até obras mais simples como rodovias, galpões, prédios e residências, sempre com o intuito de fornecer ao solo a capacidade de carga suficiente para suportar os esforços solicitantes.

Dentre todos os aspectos relevantes já citados envolvendo a compactação dos solos, ainda podemos destacar outra utilização importante desse ensaio que é na determinação dos parâmetros de compactação dos solos, na fase de projeto de obras de terra, com a finalidade não só de conhecê-los, mas também utilizá-los para execução de ensaios especiais (permeabilidade, adensamento, cisalhamento direto e triaxiais).

2.2 Consistência dos solos

A consistência de um solo está relacionado ao estado físico em que o mesmo se encontra, devido a presença de umidade. Os limites de consistência são justamente os valores de teor de umidade que separam um estado de consistência de outro. Estes limites são determinados empiricamente e são utilizados nos diversos sistemas de classificação do solo, além de refletir em uma série de propriedades dos solos finos, como tipo do argilo-mineral, sua atividade, sua estrutura e sua superfície específica.

Sob o ponto de vista geotécnico o comportamento dos solos não pode ser considerado bem definido sem que haja conhecimento dos limites de consistência do mesmo (Limites de Atterberg). De acordo com Budhu (2007) o solo pode apresentar comportamentos distintos devido a características intrínsecas dos minerais presentes em sua composição e conhecendo somente sua distribuição granulométrica não é suficiente para realizar sua caracterização. Tomando como exemplo um solo argiloso, o seu comportamento pode variar bastante de acordo com o seu teor de umidade. A partir daí, tem-se a importância da definição dos limites que demarcam as fronteiras entre os estados líquido, plástico, semi-sólido e sólido desse solo na presença de água.

Um ponto a ser destacado é de que, segundo a NBR 7250:82, a plasticidade é a propriedade de solos finos de se submeterem a grandes deformações permanentes, sem sofrer ruptura, fissuramento ou variação de volume apreciável. Em outras palavras, a plasticidade é a propriedade do solo de ser “moldado” sob umidade sem fissurar ou romper. Baseado nisso, temos que a plasticidade é muito importante para a descrição de solos finos, visto que os mesmos não são bem caracterizados pelo ensaio de granulometria.

A consistência está diretamente ligado com o conceito de plasticidade, uma vez que a consistência é justamente a facilidade relativa com a qual o solo pode ser deformado. As argilas também podem ser subdividas quanto sua consistência em: muito mole, mole, média, rija, muito rija e dura, variando também para cada uma, seu valor de resistência.

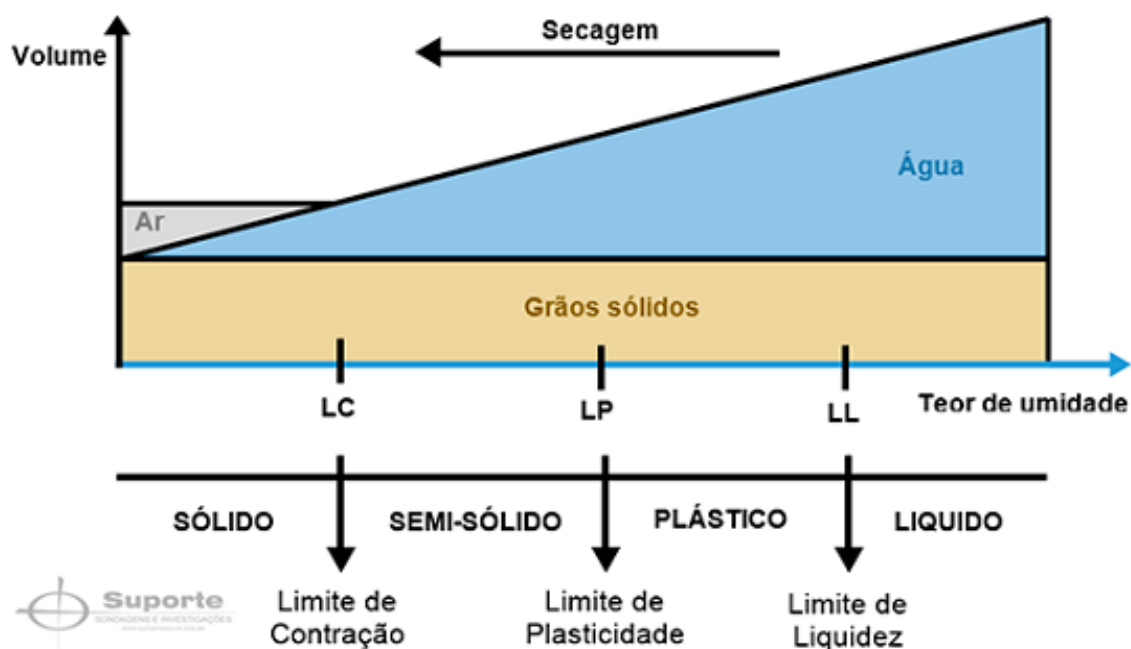
Os estados de consistência se dividem em 4 grupos: líquido, plástico, semi-sólido e sólido. No estado líquido o solo não possui forma própria e não apresenta resistência ao

cisalhamento. No estado plástico, para um determinado teor de umidade, o solo pode ser moldado, variando sua forma, porém sem apresentar variação de volume e nenhum fissuramento. Já no estado semi-sólido, o solo tem aparência de sólido, entretanto apresenta variação de volume com a variação da umidade. Por último, no seu estado sólido, o solo apresenta aparência de sólido, mas não apresenta variação de volume de acordo com a variação de umidade do solo.

Esses limites de consistência ou limites de Atterberg dividem os estados de consistência abordados anteriormente e são métodos de avaliação da natureza de solos criado por Albert Atterberg, grande estudioso e engenheiro do século XIX. Inicialmente Atterberg propôs uma análise indireta do comportamento da fração fina do solo na presença da água. Posteriormente, essa metodologia foi adaptada e padronizada por Arthur Casagrande.

Todos os conceitos mencionados acima podem ser visualizados perfeitamente através da figura 4, na qual representa esquematicamente a composição do solo e a variação dos limites e estados de consistência de acordo com o aumento da quantidade de água presente.

Figura 4: Estados característicos e limites dos solos finos



Fonte: Consistência do Solo (2017).

O teor de umidade que separa o estado plástico do estado líquido é chamado de limite de liquidez (LL). É o valor de umidade abaixo do qual o solo tem comportamento plástico. O limite de liquidez é realizado de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6459:2016, na qual é utilizado o aparelho de Casagrande para se medir o número de golpes necessário para fechar uma abertura criada com o cinzel.

A umidade que delimita o estado semi-sólido do plástico é conhecido como limite de plasticidade (LP). Abaixo desse valor o solo começara a fissurar ao tentar ser moldado. O limite de plasticidade é realizado de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7180:2016, na qual é moldado um cilindro, a partir da amostra do solo, que será passado em uma placa de vidro esmerilhada até que rompa com o mesmo diâmetro de um gabarito.

Dessa forma, podemos dizer que o limite de plasticidade é a umidade em que a água livre começa a existir em excesso, ou seja, numa quantidade maior do que aquela necessária para satisfazer a adsorção forte. Outra interpretação do LP é sendo o teor de umidade limite,

abaixo do qual o solo perde a plasticidade, deformando-se com mudança de volume e trincamento.

Após realizado os ensaios para determinação do limite de liquidez e de plasticidade, as amostras desses ensaios ainda são levadas para uma estufa a fim de se obter seus respectivos teores de umidade e seus limites. Tendo em mãos esses dados, é possível calcular e estabelecer outros parâmetros relativos ao solo, como o índice de plasticidade (IP), o índice de compressão (Cc) e a atividade da argila (A).

Além do limite de liquidez e do limite de plasticidade, também temos o limite de contração (LC) que pode ser entendido como o valor de umidade no qual o solo passa do estado semi-sólido para o estado sólido. Em outras palavras, é o teor no qual qualquer perda de umidade não provocará uma diminuição no volume.

Por fim, o índice de plasticidade (IP) do solo pode ser obtido pela diferença matemática entre o LL e o LP. Dessa forma, ele indica o caráter de plasticidade do solo, ou seja, quanto maior for o IP, mais plástico será o solo.

É importante salientar que os ensaios de consistência realizados com maior frequência são para definir o LL e o LP, uma vez que esses limites, quando interpretados em conjunto com a análise granulométrica do material, nos permitem classificar a amostra de solo. Dentre as principais formas de classificação de solos podemos citar a metodologia do sistema unificado de classificação dos solos (ASTM-SUCS) e o sistema de classificação americano HRB-AASHTO que possui uma classificação visando aplicações rodoviárias, sendo bastante empregado no Brasil e mais conhecido mundialmente.

3. MATERIAS E MÉTODOS - METODOLOGIA

Este trabalho foi fundamentado a partir da manipulação, concepção e análise de características e dados dos mais variados tipos de solos brasileiros. Para isso, foi necessário realizar a coleta dos parâmetros desses solos brasileiros visando a criação um banco de dados. A criação do banco de dados foi uma tarefa realizada em equipe, e os dados destes solos foram obtidos a partir de artigos que já foram publicados no Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) e estão disponíveis em sua biblioteca virtual. Com isso, foram analisados e lidos todos os artigos da COBRAMSEG dos anos de 2002, 2010, 2012, 2016 e 2018.

Dentro dos milhares de artigos analisados, foram separados e analisados apenas os que continham a caracterização do solo em que foram realizados pelo menos o ensaio de compactação com seu respectivo teor de umidade ótimo com sua respectiva energia utilizada e o ensaio do limite de plasticidade com seu respectivo valor. Muitos artigos possuíam apenas um dos dois parâmetros principais necessários, fazendo com que fossem descartados do banco de dados e conseqüentemente da análise realizada.

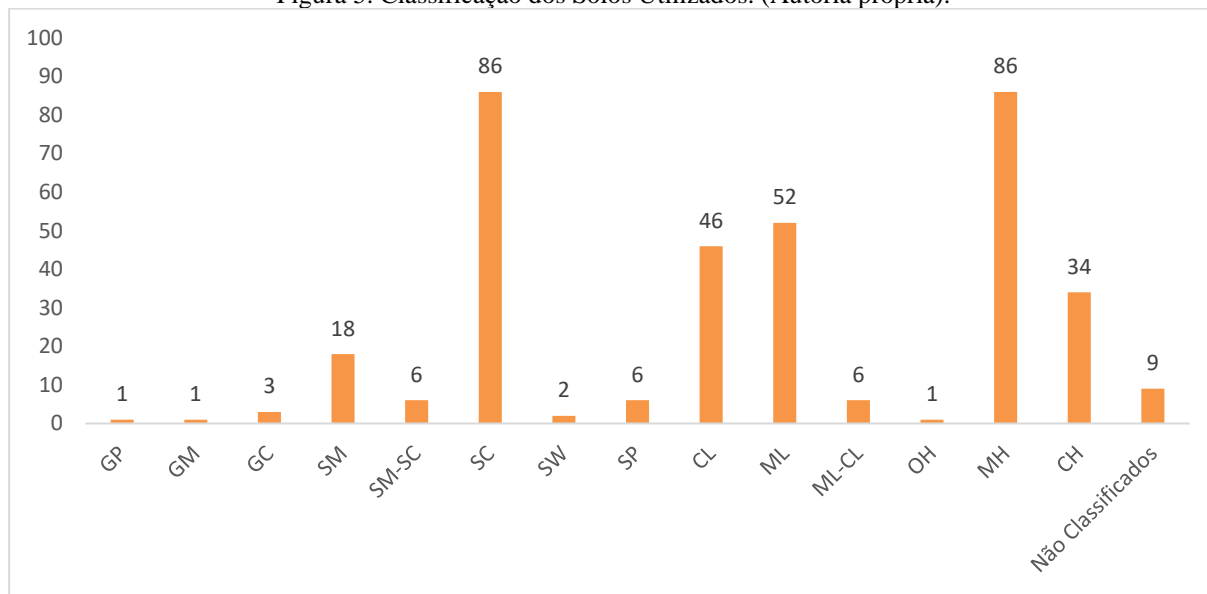
Além disso, também foi incluído no banco de dados todos os outros dados disponíveis a respeito do solo, como a sua localização, sua classificação, sua origem, sua composição granulométrica, seus índices físicos e seus outros parâmetros de compactação, seus outros limites de consistência, entre outras informações relevantes.

Por fim, uma vez realizado a coleta de todos os artigos disponíveis na COBRAMSEG e já com o banco de dados com 357 amostras de solo e 408 pontos de referência em mãos, foi estabelecido gráficos com linhas de tendência lineares que auxiliaram na análise dos dados dos solos obtidos. Além disso, foram estabelecidos não só uma correlação linear geral para todos os tipos de solo, mas também correlações de acordo com o tipo de solo (grosso ou fino) e de acordo com a energia utilizada no ensaio (normal, intermediária ou modificada).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da avaliação das 357 amostras de solo, foi possível observar que houve a predominância dos solos MH e SC, classificados de acordo com a Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Além disso, foi constatado também um número relevante de solos CL, ML e CH (Figura 5). Com isso, esse gráfico nos permite demonstrar que o estudo conta com universal amostral vasto, dispondo de solos com as mais variadas características e composições.

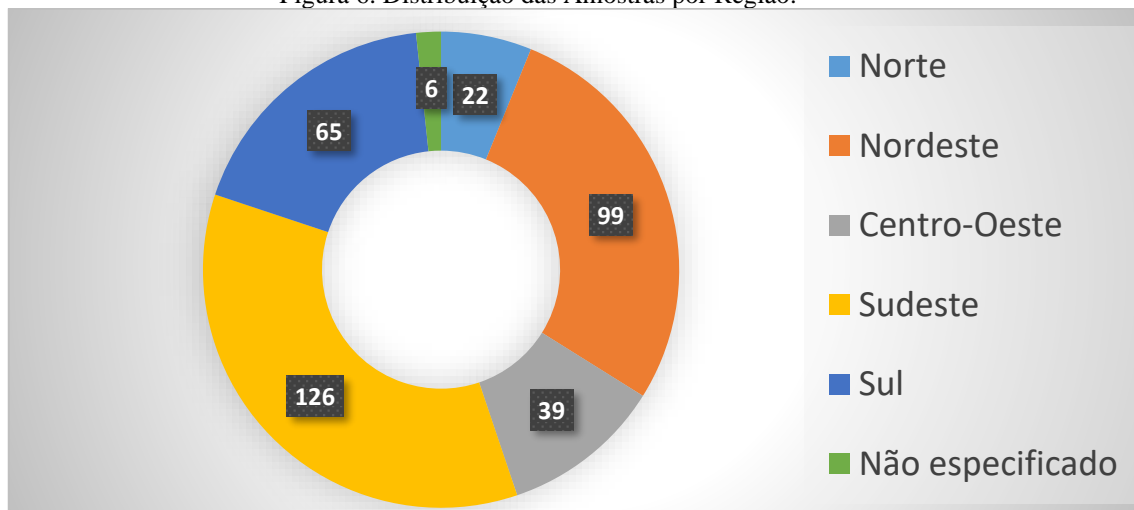
Figura 5. Classificação dos Solos Utilizados. (Autoria própria).



Fonte: Autoria Própria (2021).

Para a análise das correlações, como já mencionado anteriormente, foi coletado amostra de solos das mais diferentes regiões do Brasil, objetivando ter uma menor tendência de resultado devido à presença de solos pertencentes a uma mesma formação geológica, os quais têm composições e comportamentos similares. Entretanto, apesar de apresentar solos de todas as regiões brasileiras, podemos destacar as regiões Nordeste e Sudeste que juntas são responsáveis por possuírem pouco mais de 63% das amostras de solo, como pode ser visto perfeitamente pela classificação representada abaixo pela figura 6.

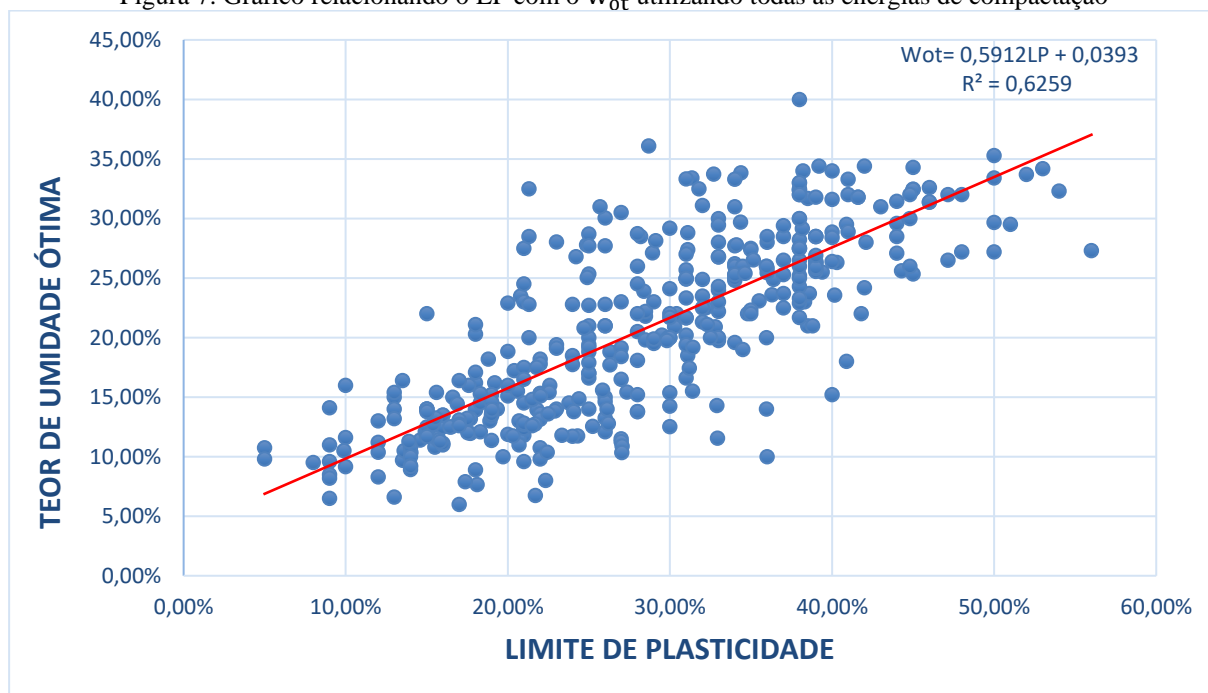
Figura 6. Distribuição das Amostras por Região.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Com todas as etapas realizadas e verificações feitas, foi feito um gráfico de dispersão utilizando recursos do Microsoft Office Excel relacionando o limite de plasticidade com a umidade ótima de todos os solos. Seus pontos possuem todos os três tipos de energia utilizados na área da geotecnia, elencando uma nuvem de 408 pontos das 357 amostras distintas de solos coletadas. Após análise do gráfico abaixo (figura 7), pode-se perceber uma certa tendência linear com os pontos, mas ao contrário do esperado e adotado usualmente nos ensaios de compactação, essa linearidade não possui uma angulação próxima a 45°, referente a ideia principal que os valores de limite de plasticidade coincidem com os valores de teor de umidade ótimo. Além disso, ainda nos torna conveniente estabelecer uma relação entre o LP e o $w_{ót}$, em que sua angulação está próxima de 30° e é regida pela equação $w_{ót} = 0,5912LP + 0,0393$.

Figura 7. Gráfico relacionando o LP com o $w_{ót}$ utilizando todas as energias de compactação



Fonte: Autoria própria (2021).

Além da análise da correlação linear, também foi utilizado a função “CORREL” disponível na análise estatística do Microsoft Office Excel que nos permite conhecer o coeficiente de correlação entre os parâmetros, o que nos retornou um valor de 0,79. Também foi calculado a média e o desvio padrão dos parâmetros, o que resultou uma média com cerca de $28,11\% \pm 8,44\%$ para o limite de plasticidade e de $20,54\% \pm 6,56\%$ para o teor de umidade ótima.

Outro ponto que podemos notar é a dispersão das amostras que, para os padrões comuns, é relativamente alta, porém para a área da mecânica dos solos o gráfico está satisfatório e está condizente com a realidade, tendo em vista que as amostras englobam vários tipos de solos das mais variadas regiões do Brasil.

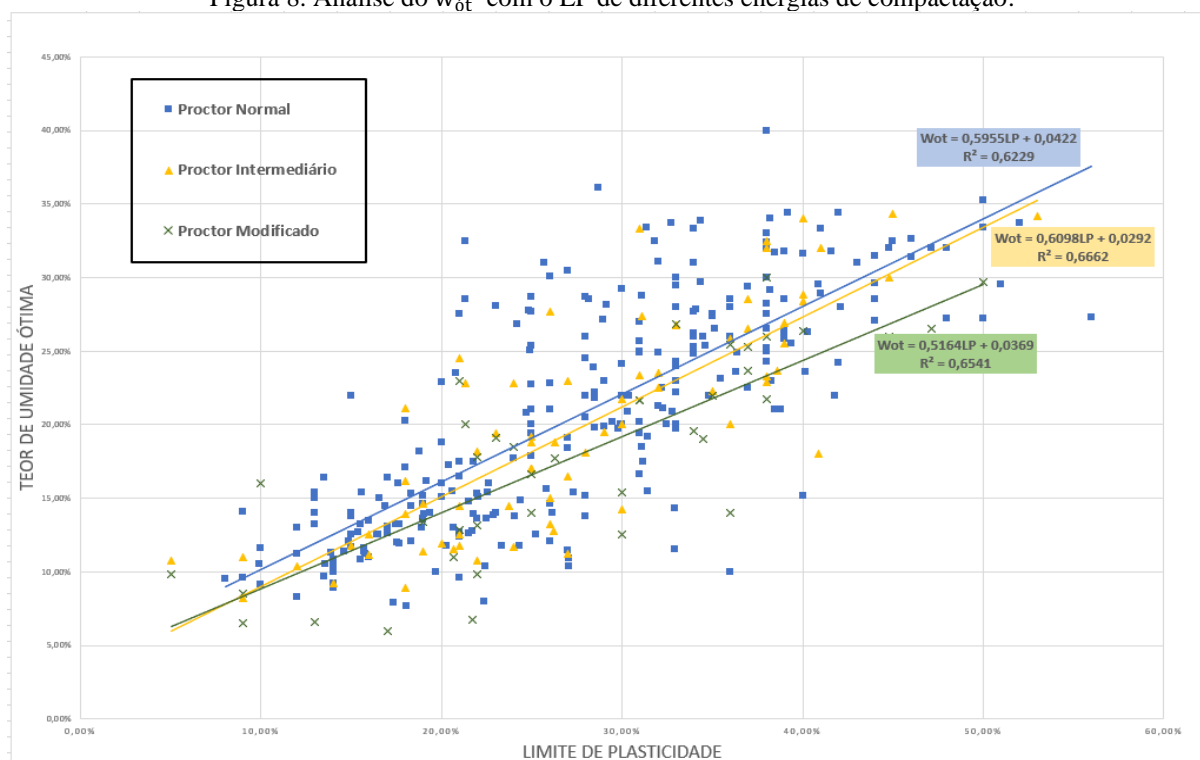
Para certificar que essa tendência continua a ocorrer em qualquer tipo de energia de compactação, foi elaborado um novo gráfico de dispersão, com base nas suas três energias de compactação. Assim, os 408 pontos foram divididos em três grupos, sendo o maior deles, o grupo referente à energia normal de compactação, com 298 pontos, seguido do proctor intermediário com 71 pontos, e, por fim, o modificado com 39 pontos.

O mesmo procedimento de análise da correlação linear foi feito agora para o gráfico abaixo, representado pela figura 8. Com isso, foram elaboradas três novas equações e três novos

respectivos ângulos relacionando-as com suas respectivas energias de compactação, são elas: $w_{ót} = 0,5955LP + 0,0422$ para a energia de compactação normal, com cerca de $30,7^\circ$ de inclinação; $w_{ót} = 0,6098LP + 0,0292$ para a energia intermediária e com inclinação de aproximadamente $31,4^\circ$; e $w_{ót} = 0,5164LP + 0,0369$ referente à energia modificada, em que sua inclinação está próxima a $27,3^\circ$. Com isso, é possível notar como as retas estão relativamente próximas umas às outras, além disso, as angulações também não foram afetadas consideravelmente, ou seja, todas tendem para uma inclinação próxima de 30° .

Mesmo dividindo a análise em diferentes tipos de energia aplicada, o proctor intermediário e modificado ainda não pôde dar um resultado similar a hipótese inicialmente feita em que o limite de plasticidade e o teor de umidade ótimo seriam coincidentes. Todas as energias de compactação possuíram uma similaridade linear com a Figura 7, levando a crer que não importa qual energia esteja sendo utilizado, ela não irá alterar essencialmente os valores de limite de plasticidade e umidade ótima. Além disso, podemos constatar também que a sua condição de dispersão também não foi substancialmente alterada.

Figura 8. Análise do $w_{ót}$ com o LP de diferentes energias de compactação.

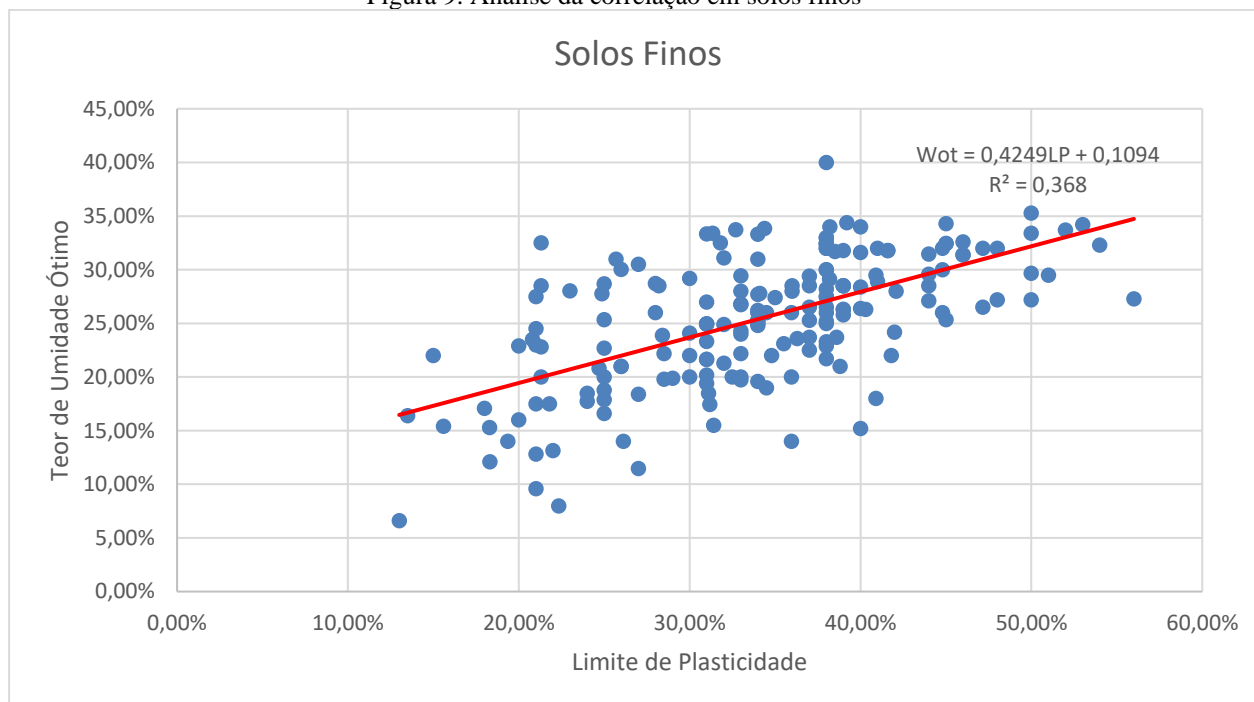


Fonte: Autoria própria (2021)

Além da análise feita acima dividindo os solos quanto a energia aplicada, também foi realizado essa análise de correlação entre o LP e o $w_{ót}$ dividindo os solos quanto à sua granulometria. Dos 357 pontos obtidos, 158 eram solos finos, 100 eram solos grossos e 99 deles não possuíam a composição granulométrica.

Primeiramente, com relação aos solos finos, foi feita a análise com 158 pontos, ou seja, 158 pontos de solos que em sua granulometria é composta com mais de 50% de Argile e Silte. Nessa análise foi obtida a reta $w_{ót} = 0,4249LP + 0,1094$ com uma angulação de 23° , como pode ser visto pela figura 9 logo abaixo:

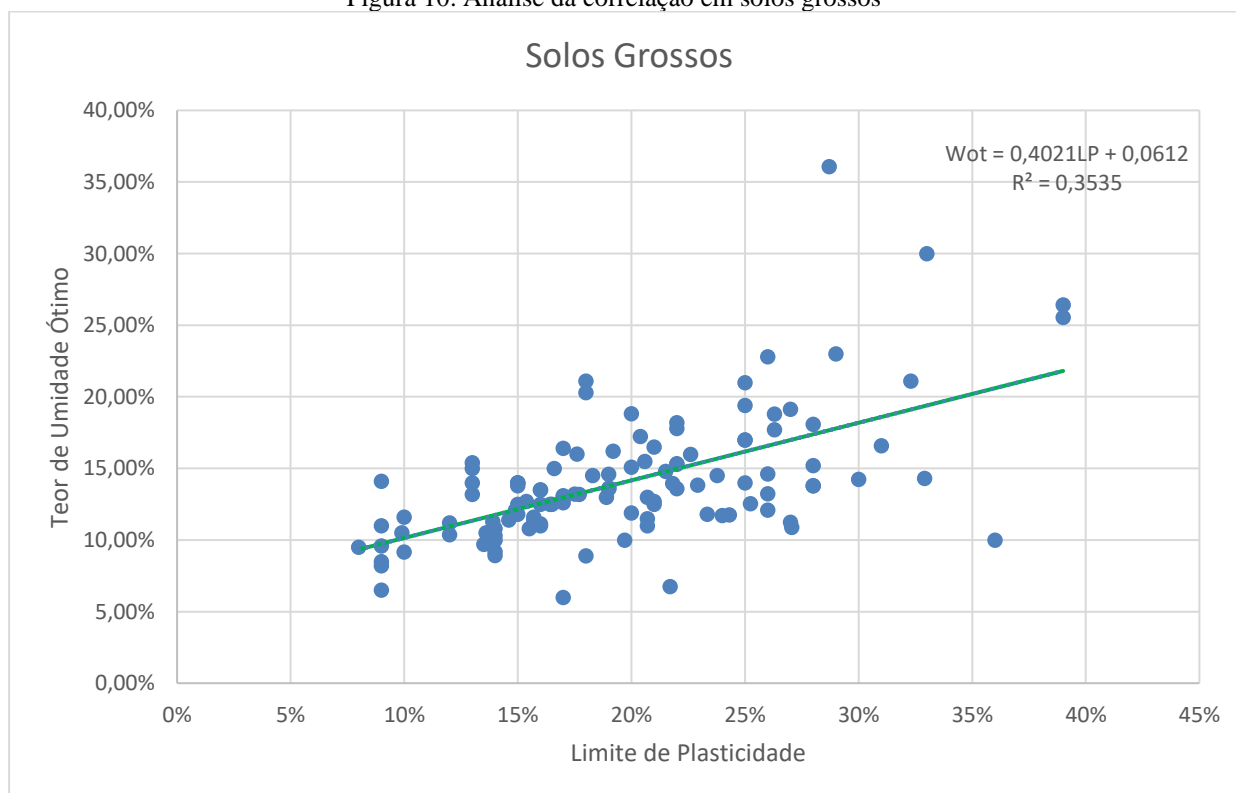
Figura 9. Análise da correlação em solos finos



Fonte: Autoria própria (2021).

Excluindo os 99 solos que não possuíam classificação, foi feita ainda a análise dos 100 solos restantes classificados como grossos, ou seja, em sua composição possuía mais de 50% de areia e pedregulho. A reta obtida nessa análise foi $w_{ot} = 0,4021LP + 0,0612$ com uma angulação de 22° , como pode ser visto perfeitamente pela figura 10 representada logo abaixo.

Figura 10. Análise da correlação em solos grossos



Fonte: Autoria própria (2021).

5. CONCLUSÃO

Visto a relevância dos valores de umidade ótima e dos limites de Atterberg na Engenharia Civil, mostrou-se importante uma análise de uma tendência observada na prática geotécnica em a umidade ótima e o limite de plasticidade apresentarem valores semelhantes. Objetivando fazer a análise a partir de um conjunto de dados mais diversificado, analisou-se a classificação e região de origem de cada solo utilizado, possuindo amostras de todas as cinco regiões brasileiras, mesmo não havendo equivalência nos números de amostras por região.

Em relação a classificação de acordo com o SUCS, foi obtido solos de 14 classificações distintas, mesmo que praticamente 50% das amostras de solo estavam distribuídos em apenas duas classificações. Porém, baseado na grande quantidade de solos e na presença dos mais variados tipos, podemos inferir que não houve tendência de resultado na análise.

Após a análise das 357 amostras de solo, retiradas de artigos publicados na COMBRAMSEG nos mais variados anos, em que se unindo em um único grupo todas as energias de compactação utilizadas para cada solo obteve-se 408 pontos de dados, foi possível analisar o comportamento linear da umidade ótima de cada dado juntamente ao seu valor do limite de plasticidade.

Concluiu-se por fim, que não há o comportamento esperado, ou seja, não há nenhuma relação em que o valor da umidade ótima é próximo ou coincidente ao limite de plasticidade. Mesmo separando os solos em diferentes tipos de energia aplicada e para diferentes grupos de granulometria, esse comportamento não foi alcançado. Entretanto, com a análise realizada nesse estudo, percebeu-se que há uma correlação viável entre esses dados, representada pela equação $w_{ót} = 0,5912LP + 0,0393$, para qualquer uma das três energias anteriormente citadas, a qual sua representação gráfica é uma reta com inclinação próxima a 30°.

Esses dados obtidos podem ser utilizados para auxiliar na estipulação inicial do valor da umidade ótima no ensaio de compactação, uma vez conhecido o limite de plasticidade de tal solo. Além disso, esse conhecimento pode se estender para outros ramos dos ensaios laboratoriais e até auxiliar engenheiros em campo que necessitem ter conhecimento prévio ou ter ideia do comportamento do solo através de valores relacionados na correlação desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). *NBR-7182 Solo - Ensaio de compactação*.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). *NBR-7250:1982 - Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos*

BARDET, J.P. (1997). **Experimental Soil Mechanics**. By Prentice-Hall, Inc., Simon & Schuster/A Viacom Company, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 579 p.

BUDHU, Muni. **Soil mechanics and foundations**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 634 p.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; RODRIGUES, J. Martinho de A. . **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2015.

CONSISTÊNCIA DO SOLO – **Ensaio Geotécnicos – Ensaio de Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP)**. São Paulo/SP, 17 de janeiro de 2017. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/consistencia-do-solo-ensaios-geotecnicos-ensaios-de-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/33/>. Acesso em: 21/07/2021.

COMPACTAÇÃO DE SOLOS - **Ensaio Geotécnicos - O Ensaio e as Energias de Compactação. Suporte Solos**. São Pedro/SP, 17 de julho de 2018. Disponível em <<https://www.suportesolos.com.br/blog/compactacao-de-solos-ensaios-geotecnicos-o-ensaio-e-as-energias-de-compactacao/68/>>. Acesso em: 27/07/2021.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO, **Ensaio de Compactação**. Disponível em <<https://directiva.eng.br/servico/ensaio-de-compactacao/>>. Acesso em 10/02/2022.

FERNANDES, M. **Sebenta de Mecânica dos Solos**, Vol.I. FEUP, Porto, 1994.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R. R. **Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction**. Advances in Soil Sciences, New York, v.6, p.65-100, 1987.

PEREIRA, Caio. **Compactação de solos**. Escola Engenharia, 2013. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/compactacao-de-solos/>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PROCTOR, R.R. **Fundamental principles of soil compaction**. *Engineering News Record*, v.111, n.3, p. 245-248, ago./set. 1933.

RIBEIRO, S. P . T. **Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008** - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. **Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.460-464, sept./dec. 2000.

TRINDADE, T. P., LIMA, D. C., CARVALHO, C. A. B., MACHADO, C. C., PEREIRA, R. S. **Compactação dos solos**. Universidade Federal de Viçosa. 2003.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**, São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977, 509p.