



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS CÂMPUS ANÁPOLIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS NA CURVA
CARACTERÍSTICA

JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO

ORIENTADOR (A): Prof. Ds. Ângela Custódia Guimarães Queiroz

ANÁPOLIS

2021

JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS NA CURVA
CARACTERÍSTICA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Anápolis, como requisito parcial para conclusão de curso.

Orientador (a): Prof. Ds. Ângela Custódia Guimarães Queiroz.

ANÁPOLIS, 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cardoso, Josiene Chrystina Ribeiro

C268a Análise estatística da distribuição do índice de vazios na curva característica. / Josiene Chrystina Ribeiro. – Anápolis: IFG, 2021.
74 f. : il. color.

Orientadora: Prof. Dra. Ângela Custódia Guimarães Queiroz.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Câmpus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2021.

1. Análise estatística. 2. índice de vazios. 3. curva característica. I. Queiroz, Ângela Custódia Guimarães Queiroz, orient. II. Título.

CDD 624

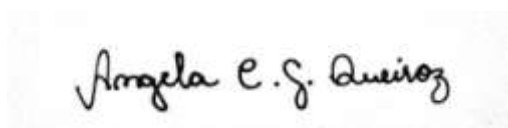
JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS NA CURVA
CARACTERÍSTICA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Anápolis, como requisito parcial para conclusão de curso.

Orientador (a): Prof. Ds. Ângela Custódia Guimarães Queiroz.

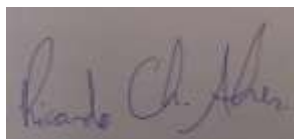
APROVADO EM: 22 / 02 / 2021



ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ, D.Sc. (IFG)
(ORIENTADORA)



MARIA TÂMARA DE MORAES GUIMARÃES SILVA, D.Sc. (IFG)
(EXAMINADOR INTERNA)



RICARDO CHAVEIRO ALVES, ENG CIVIL
(EXAMINADOR EXTERNO)

ANÁPOLIS, 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso.

Matrícula: 20151060130229.

Título do Trabalho: Análise estatística da distribuição do índice de vazão na curva característica.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.

() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 22 / 02 / 2021.

Josiane Christina R. Cordova

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

“O que vale na vida não é o ponto de
partida e sim a caminhada, caminhando
e semeando, no fim terás o que colher.”

(Cora Coralina)

Dedicatória

À minha querida avó Maria Conceição Pereira Cardoso (em memória), cuja presença foi essencial na minha vida. Aos meus pais, Eliene Ribeiro de Souza e Josemar Pereira Cardoso a quem devo tudo que sou e tenho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Eliene e Josemar, agradeço por todo amor e cuidado que fui criada, pelo apoio durante todos esses anos de graduação, por batalharem comigo dia após dia, por me ajudarem sem medir nenhum esforço e sempre com um sorriso no rosto e um abraço acolhedor.

À minha avó Maria da Conceição Pereira Cardoso, que infelizmente não está mais presente em vida, mas que será sempre lembrada e guardada em meu coração. Agracio muito por toda ajuda e por todo apoio que me deu durante toda minha formação e lamento muito não estar comigo neste momento para comemoração.

Agradeço aos meus irmãos, Chrystiano Álex, Wallison Jonathans e Roger Deyvid, por sempre me motivarem, acreditarem em mim e estarem dispostos a me ouvir e aconselhar. Às minhas tias que me ajudaram e oraram por mim durante todo o período da graduação.

De forma muito especial agradeço minha amiga Paula Renata, que foi meu grande alicerce durante os primeiros anos de curso, por todas as noites de estudos e todos os trabalhos executados juntas. Por me fazer acreditar no meu melhor. Reconheço toda a ajuda e suporte tanto na vida acadêmica como no pessoal e no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, a minha amiga Sarah Borges Vasconcelos, que é minha grande ouvinte e conselheira. À minha prima Isabela Lima e minha amiga Stephanie Borges pessoas que me motivaram para fazer o vestibular e festejaram cada etapa dessa graduação junto comigo.

Ao meu namorado, Paulo Alexandre por todo amor, cuidado e paciência, por sempre me motivar e celebrar as minhas conquistas como se fossem dele.

Agradeço, aos meus companheiros (as) de curso, Ana Paula Silva, Dayse Viana e Pedro Ricardo, que sempre me apoiaram e estiveram dispostos a me ouvir, aconselhar e trazer um pouco de alegria aos meus dias. Sem vocês meus dias de aula seria mais difícil.

Agradeço, à minha orientadora, Ângela Custódia Guimarães Queiroz por ter me orientado no presente Trabalho de Conclusão de Curso com seu grande conhecimento, por ser uma mulher que inspira ao qual me espelho.

Agradeço, ao Instituto Federal de Goiás (IFG), pela formação de qualidade e de forma gratuita que me foi propiciada.

Agradeço, por fim, e não menos importante a todos os professores e demais colegas da Instituição que sempre estiveram ao meu lado, compartilhando conhecimentos.

RESUMO

A determinação da curva característica é essencial para a compreensão do comportamento do solo não saturado, pois representa a capacidade do solo de armazenar água quando submetido a diferentes valores de sucção. O índice de vazios inicial pode determinar a forma das curvas características dos solos estudados. Via de regra, os ensaios para a obtenção da curva característica são realizados tendo em consideração o índice de vazios constante. Porém, a literatura apresenta estudos que demonstram a influência do índice de vazios na curva característica (QUEIROZ, 2010). Dentro da Engenharia Civil/Geotécnica a estatística tem sido um importante instrumento para análise de dados, nessa perspectiva, este trabalho apresenta um estudo estatístico da distribuição do índice de vazios na curva característica, com foco na variabilidade e na influência desse parâmetro sobre a curva. Os resultados obtidos indicaram que os índices de vazios se ajustam a uma distribuição de Frequência Normal e que a construção da curva característica depende também da variabilidade do índice de vazios.

Palavras - chave: Análise Estatística. Índice de vazios. Curva característica.

ABSTRACT

The determination of the characteristic curve is essential for understanding the behavior of unsaturated soil, as it represents the capacity of the soil to store water when subjected to different suction values. The initial void index can determine the shape of the characteristic curves of the studied soils. As a rule, the tests for obtaining the soil-water characteristic curve are performed taking into account the constant void index. However, the literature presents studies that demonstrate the influence of the void index on the soil-water characteristic curve. (QUEIROZ, 2010). Within Civil / Geotechnical Engineering, statistics has been an important instrument for data analysis, in this perspective, this work presents a statistical study of the distribution of the voids index in the soil-water characteristic curve, focusing on the variability and influence of this parameter on the curve. The results obtained indicated that the void indexes fit a Normal Frequency distribution and that the construction of the characteristic curve also depends on the variability of the void index.

Key words: Statistical Analysis. Void Ratio. Soil-water Characteristic Curve.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CV coeficiente de variação

e índice de vazios

e_w Índice de água

H_0 Distribuição teórica

KPa Quilo Pascal

K-S Kolmogorov-Smirnov

MIP Mercury Intrusion Porosimetry (Porosimetria por Intrusão de Mercúrio)

MPa Mega Pascal

NBR Normas Brasileiras

PPG-UnB Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

s Sucção

S Desvio padrão amostral

S_n Valores amostrais

S_r Grau de saturação

SWRC The soil-water retention curve

u_a Poropressão

u_w Poropressão da água

W Umidade gravimétrica

w_M Umidade macroscópico

w_m Umidade microscópico

w_{Sat} Umidade de saturação

w_{res} Teor de umidade residual

WP4 Dewpoint PotentialMeter

α Nível de Significância

θ_w Umidade volumétrica

σ Tensão Total

λ_s Umidade com a sucção

ρ_0 Pressão de vapor do ar

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elemento e fases do solo não saturado	20
Figura 2.2 - Forma da Curva característica por Tamanho dos Poros	22
Figura 2.3 - Curvas características de sucção para diferentes solos	23
Figura 2.4 - Equipamento completo placa de sucção	25
Figura 2.5 - Procedimento ensaio placa de sucção	25
Figura 2.6 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro	26
Figura 2.7 - WP4C (Dewpoint PotentiaMeter)	28
Figura 2.8 - Curva característica típica de solos compactados	29
Figura 2.9 - Provável variação da área de água nos diferentes estágios da curva	30
Figura 2.10 - Histerese da curva característica	32
Figura 2.11 - Efeito do índice de vazios na curva característica	34
Figura 2.12 - Previsão da curva característica para diferentes valores	35
Figura 2.13 - Modelo de Distribuição Normal	38
Figura 3.1 - Metodologia para estudo estatístico	45
Figura 4.1 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas A e B	48
Figura 4.2 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas C e D	49
Figura 4.3 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas E F	49
Figura 4.4 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas F2 e F3	50
Figura 4.5 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas F4 e F5	50
Figura 4.6 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G e G2	51
Figura 4.7 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G3 e G4	51
Figura 4.8 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G5 e H	52
Figura 4.9 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas H2 e H3	52
Figura 4.10 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas H4 e H5	53
Figura 4.11 - Exportação do SPSS para os testes de normalidade	54
Figura 4.12 - Gráficos Q-Q Plot Curvas A e E	56
Figura 4.13 - Gráficos Q-Q Plot Curvas G4 e G5	56
Figura 4.14 - Demonstração de diferentes Q-Q Plots	57
Figura 4.15 - Gráfico Q-Q Plots Curva A (ajustado)	58
Figura 4.16 - Gráfico Q-Q Plots Curva G4 (ajustado)	58
Figura 4.17 - Gráfico Q-Q Plots Curva G5 (ajustado)	59
Figura 4.18 - Gráfico das curvas A	61

Figura 4.19 - Gráfico das curvas B.....	61
Figura 4.20 - Gráfico das curvas C.....	62
Figura 4.21 - Gráfico das curvas D.....	62
Figura 4.22 - Gráfico das curvas E.....	63
Figura 4.23 - Gráfico das curvas F.....	63
Figura 4.24 - Gráfico das curvas F2.....	64
Figura 4.25 - Gráfico das curvas F3.....	64
Figura 4.26 - Gráfico das curvas F4.....	65
Figura 4.27 - Gráfico das curvas F5.....	65
Figura 4.28 - Gráfico das curvas G.....	66
Figura 4.29 - Gráfico das curvas G2.....	66
Figura 4.30 - Gráfico das curvas G3.....	67
Figura 4.31 - Gráfico das curvas G4.....	67
Figura 4.32 - Gráfico das curvas G5.....	68
Figura 4.33 - Gráfico das curvas H.....	68
Figura 4.34 - Gráfico das curvas H2.....	69
Figura 4.35 - Gráfico das curvas H3.....	69
Figura 4.36 - Gráfico das curvas H4.....	70
Figura 4.37 - Gráfico das curvas H5.....	70

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medição da sucção total.....	27
Tabela 2 - Equações que relacionam teor de umidade do Quanty.....	27
Tabela 3 - Método de ajuste Dummer	31
Tabela 4 - Descrição dos Elementos da Estatística	37
Tabela 5 - Etapas do teste de hipótese	39
Tabela 6 - Valores críticos para a estatística do teste de Komolgorov-Smirnov.....	41
Tabela 7 - Teores de umidade e índice de vazios teóricos	44
Tabela 8 - Índice de Vazios Obtidos	45
Tabela 9 - Índice de vazios: relações estatísticas	47
Tabela 10 - Resultados teste K-S.....	54
Tabela 11 - Valores Skewness.....	55
Tabela 12 - Transformação Box-Cox	57
Tabela 13 - Resultados teste K-S após Transformação	59
Tabela 14 - Intervalos de confiança para a média	60

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	12
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE QUADROS E TABELAS	15
SUMÁRIO	16
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. OBJETIVOS	19
1.2. ESCOPO DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. SOLOS NÃO SATURADOS	19
2.2. CURVA CARACTERÍSTICA: CONCEITOS E MÉTODOS	21
2.2.1. Métodos de medidas da sucção	23
2.2.1.1. Placa de Sucção.....	24
2.2.1.2. Ensaio de Papel Filtro	26
2.2.1.3. Psicrômetros (WP4C)	27
2.2.2. Pontos importantes da Curva Característica	28
2.2.3. Equações de Ajuste para a Curva Característica	31
2.2.4. Histerese	32
2.3. ÍNDICE DE VAZIOS E SUA INFLUÊNCIA NA CURVA CARACTERÍSTICA..	33
2.4. ESTUDO ESTATÍSTICO	35
2.4.1. Conceitos Básicos da Estatística.....	36
2.4.2. Distribuição Normal	37
2.4.3. Teste de Hipótese.....	38
2.4.4. O teste Kolmogorov-Smirnov (KS).....	40
2.5. DISTRIBUIÇÃO NÃO NORMAL	42
3. METODOLOGIA	43
3.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA	45

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	46
4.1. RELAÇÕES ESTATÍSTICAS	46
4.2. HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS.....	48
4.3. TESTE K-S	53
4.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS PONTO A PONTO	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

Visto que primordialmente os estudos eram voltados apenas aos solos saturados, uma grande maioria de normas e estudos são embasados para eles. No entanto, com o grande desenvolvimento de regiões áridas e semiáridas do mundo aumentou-se o interesse pela prática de engenharia geotécnica em solos não saturados. Um grande número de problemas geotécnicos clássicos como estabilidade de taludes, estruturas de contenção de taludes, pavimentos, fundações superficiais e profundas têm sido motivo de estudos em função do comportamento do solo não saturado (FEUERHARMEL, 2003).

Uma relevante relação necessária para interpretar a resposta de um solo não saturado é a curva característica. A análise e interpretação da curva característica pode ser utilizada no desenvolvimento de outras relações fundamentais para a previsão do comportamento do solo não saturado (FEUERHARMEL, 2003).

Segundo Queiroz (2010) os ensaios para a obtenção da curva característica são realizados considerando o índice de vazios constante. Apesar disso, a literatura apresenta diversos trabalhos que demonstram a influência do índice de vazios na curva característica. As variações no índice de vazios podem ocasionar modificações nos poros do solo e em suas ligações, alterando em consequência o grau de saturação. Assim, as variações do índice de vazios afetam diretamente a curva característica, não podendo esta ser representada por uma curva única, que não prevê mudanças no grau de saturação (GALLIPOLI et al., 2003).

O uso da estatística no estudo da variabilidade das propriedades do solo tem se tornado cada vez mais comum, baseando-se na análise descritiva geral dos dados como, a média, o desvio padrão, variância e o coeficiente de variação (CV), onde os maiores coeficientes de variação indicam maiores oscilações da propriedade, e também por meio dos testes de hipótese e da Distribuição Normal (PAIVA, 2009).

É pertinente associar a ferramenta estatística a uma hipótese do problema geotécnico: “a influência do índice de vazios na curva característica”. Visando analisar através de dados a variabilidade do índice de vazios ao longo da curva característica e sua influência (QUEIROZ, 2010).

1.1. OBJETIVOS

Acreditando na relevância do tema, este trabalho tem por objetivo geral a realização de uma análise estatística da distribuição do índice de vazios em curvas características de um solo tropical compactado em diferentes condições de umidade e densidade.

Por objetivo específico, esta pesquisa pretende:

- Analisar os valores estatísticos, a Distribuição Normal, através do teste de hipótese Kolmogorov-Smirnov (KS).
- Apresentar os resultados dos valores estatísticos por meio de histogramas, tabelas e gráficos.
- Verificar se os dados da amostra se ajustam com as hipóteses feitas.

1.2. ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em 5 Capítulos. O primeiro consiste na introdução ao tema, no qual apresenta o problema da pesquisa e a importância do estudo da influência do índice de vazio na curva característica. São apresentados também o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

No segundo é apresentada a revisão bibliográfica onde alguns tópicos foram destacados, como: solos não saturados, curva característica, seus conceitos e métodos, a influência do índice de vazio na curva característica e a explicação do estudo estatístico que utilizado.

O terceiro se refere à metodologia do trabalho, especificando as etapas de desenvolvimento.

O quarto capítulo descreve os resultados obtidos e o quinto capítulo das considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

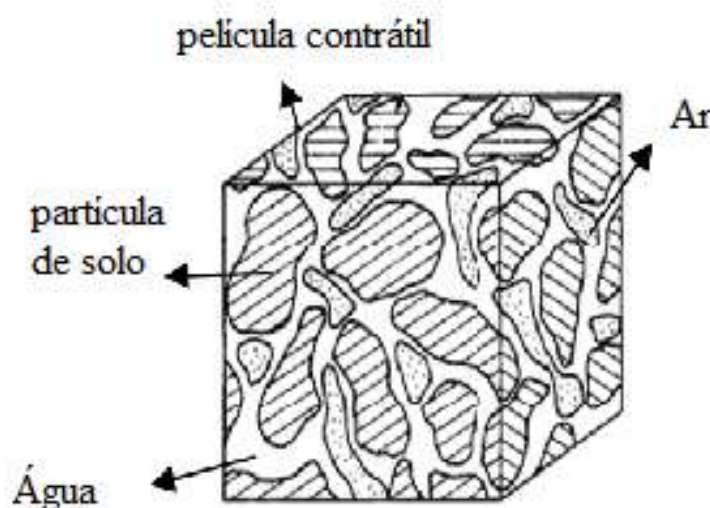
2.1. SOLOS NÃO SATURADOS

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), os estudos que abrangem solos não saturados são de relevância para a mecânica dos solos desde a inclusão da mesma como

disciplina da engenharia. A relevância é justificada por haver muitas obras de engenharia que abrangem solos não saturados como aterros, barragens, estabilização de taludes.

Os solos não saturados são encontrados na natureza como um sistema multifásico composto por quatro fases: líquida, gasosa, sólida e, uma membrana contrátil (Figura 2.1). Quando a fase de ar é contínua, a membrana contrátil interage com as partículas de solo influenciando o comportamento mecânico do solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Figura 2.1 - Elemento e fases do solo não saturado



Fonte: modificado de FREDLUND & RAHARJO (1993)

O comportamento mecânico dos solos não saturados tem grande reflexo da sucção. Esta pode ser definida conforme Marinho (1997) “a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação”. A sucção total é composta por duas componentes de sucção: a matricial e a osmótica. A sucção matricial é a energia da água livre do solo, que está adjunta ao fenômeno da capilaridade devido à tensão superficial do solo. A sucção osmótica está relacionada com a presença de íons e outros componentes na água do solo (FREDLUND & RAHARJO, 1993).

A sucção varia com relação inversa à quantidade de água, isto é, ela tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação ($S = 100\%$), e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero (QUEIROZ, 2015).

Conforme, Queiroz (2015), diversos modelos constitutivos destinados aos solos não saturados foram formulados (Gallipoli et al., 2003, Wheeler et al., 2003, Sheng et al., 2004, Alonso et al., 2010, Chiu et al., 2014). No qual adicionaram algumas características do comportamento não saturado, como efeitos do teor de umidade, índice de vazios, grau de saturação e a histerese quando a curva característica de sucção do solo obtida através dos processos de secagem e molhagem produz trajetórias distintas. O comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados deve ser estudado em conjunto, e não isoladamente, visto que acontece completa dependência entre eles.

Um modo de interligar esse comportamento é a aplicação da curva característica (SWRC) em ambas as análises, pois a sucção influencia a parte hidráulica, associa com o grau de saturação, com reflexo também na parte mecânica. Com isso, pode-se conceituar que a curva analisa o comportamento mecânico (QUEIROZ, 2015).

2.2. CURVA CARACTERÍSTICA: CONCEITOS E MÉTODOS

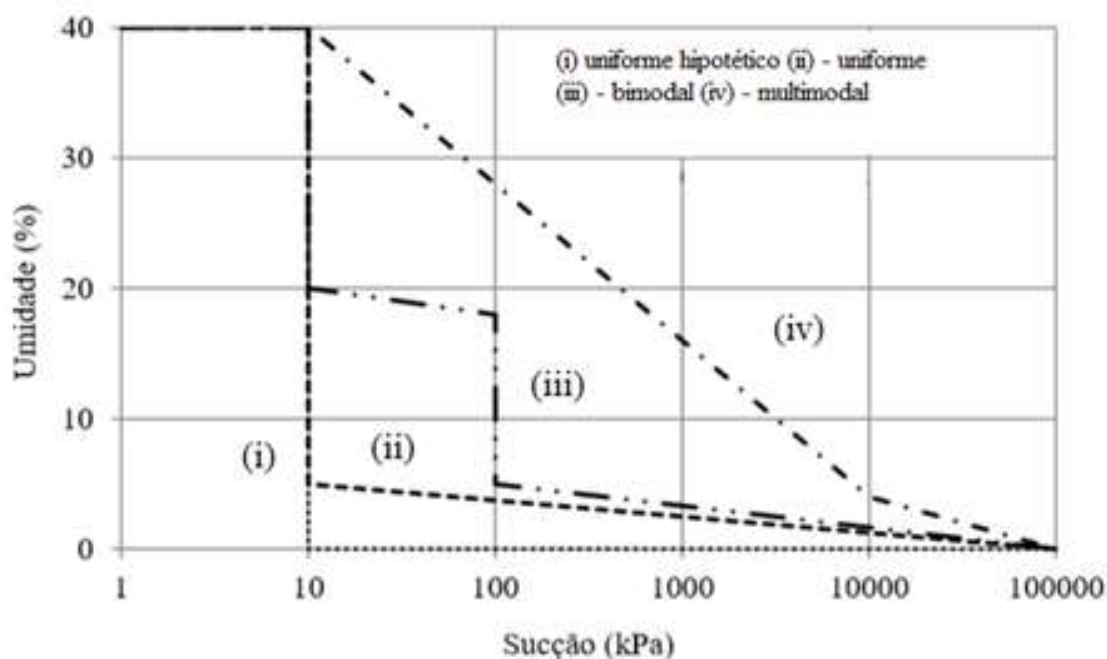
A curva característica, também denominada curva de retenção de água do solo reproduz graficamente a relação entre a quantidade de água existente nos vazios do solo: umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ_w), grau de saturação (S_r) ou índice de água (e_w) pela sucção (SILVA, 2009).

A determinação da curva característica do solo tem sido um artifício importante para a análise do desempenho das propriedades hidráulicas do solo não saturado (Cichota & Jong van Lier, 2004). Sua aplicabilidade é bastante vasta tanto nos meios tecnológicos como no habitual, pois paralelo ao seu conhecimento é possível avaliar demais propriedades do solo como água disponível, condutividade hidráulica não-saturada, além de balanço hídrico e porosidade drenável estimando-se a variabilidade do armazenamento de água no solo (MELLO et al., 2005).

De acordo com Marinho (2005) a maior parte das curvas de retenção de água do solo possuem configuração em “S”, e essa configuração ocorre pela influência direta da distribuição de poros do material. A Figura 2.2 apresenta formas gerais de curva conforme sua distribuição de poros. Ela apresenta três diferentes condições em

que os poros podem ser encontrados: uniforme (i,ii); bimodal ou dois tamanhos predominantes (iii); e, em muitos tamanhos, multimodal (iv).

Figura 2.2 - Forma da Curva característica por Tamanho dos Poros

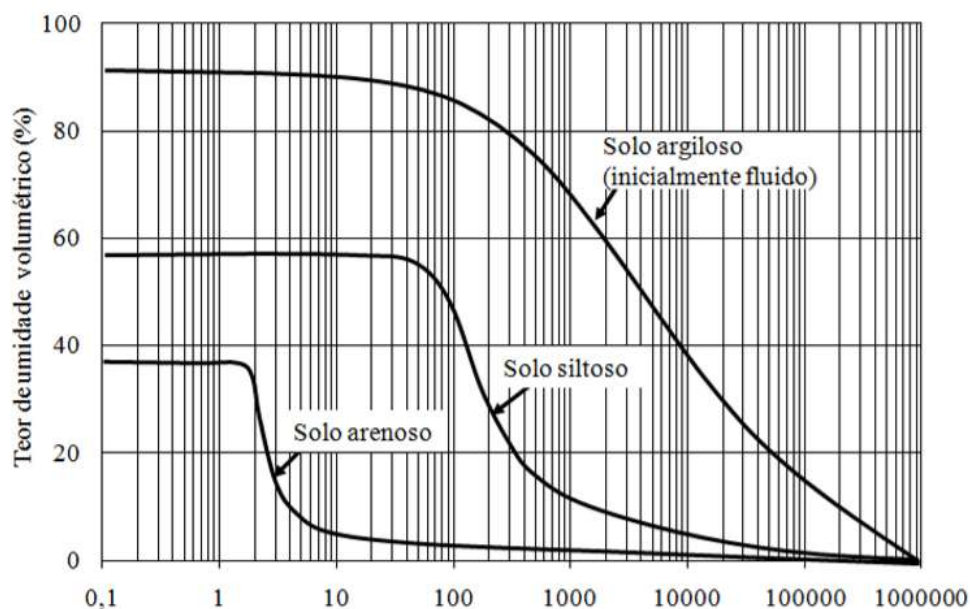


Fonte: modificado de MARINHO (2005)

A forma da curva característica é um atributo da influência do volume e da distribuição de seus poros, e de sua adsorção e estrutura. Dessa maneira, para valores menores de sucção, o teor de água presente no solo tem como fator determinante o efeito da capilaridade e a distribuição dos poros. No entanto, para valores maiores de sucção, a textura e a superfície específica possuem um maior reflexo que a estrutura do solo, considerando que a água esteja adsorvida nas partículas sólidas (SOARES, 2005).

Várias condições podem vir a influenciar a curva característica como: a composição granulométrica, a estrutura e o efeito da temperatura e a mineralogia. Além desses merece ênfase a história de tensões a que o solo foi submetido, abrangendo tanto as aplicações de tensões efetivas (mecanicamente aplicadas), como também as trajetórias de secagem e molhagem, aumentando e reduzindo a sucção, de modo respectivo. (QUEIROZ, 2015). Na Figura 2.3 podem-se observar típicas curvas características de sucção de secagem para diferentes tipos de solos, onde o teor de umidade saturado e o valor de entrada de ar, geralmente crescem com a plasticidade e quantidade de finos do solo (FREDLUND; XING, 1994).

Figura 2.3 - Curvas características de sucção para diferentes solos



Fonte: FREDLUND; XING (1994 *apud* BORGES,2010)

Os solos manifestam dois meios de armazenamento de água: na macroestrutura, em forma de água livre e meniscos, a sucção atuante está associada à capilaridade; ou, na microestrutura, como água adsorvida; a sucção, nessas condições, é governada pelas ligações físico-químicas (Romero e Vaunat, 2000). O teor de umidade do solo é a soma de duas contribuições, isto é, do teor de umidade macroscópico (w_M) e do teor de umidade microscópico (w_m) (QUEIROZ, 2015).

2.2.1. Métodos de medidas da sucção

Diversas pesquisas foram objetivadas para medição da sucção, tanto para o desenvolvimento de novos métodos como para verificação dos antecessores. Para que isso ocorra os dispositivos de medição devem interagir de formas diretas ou indiretas com o solo. De forma direta são aqueles que fazem a medição de energia da água dos poros. Enquanto a indireta se obtém um parâmetro relacionado com a sucção do solo por meio de uma calibração (LOPES, 2006).

Como exemplo de equipamentos que utilizam o método direto tem-se: placa de sucção, câmara de pressão e tensiômetro. E os métodos indiretos relacionam a umidade no meio poroso, aos fenômenos físicos e como modelos temos o ensaio de papel filtro, ponto de congelamento, sensor de condutividade térmica e o psicrômetro.

Um breve relato sobre os métodos de medidas de sucção empregados nesse trabalho será apresentado a seguir.

2.2.1.1. Placa de Sucção

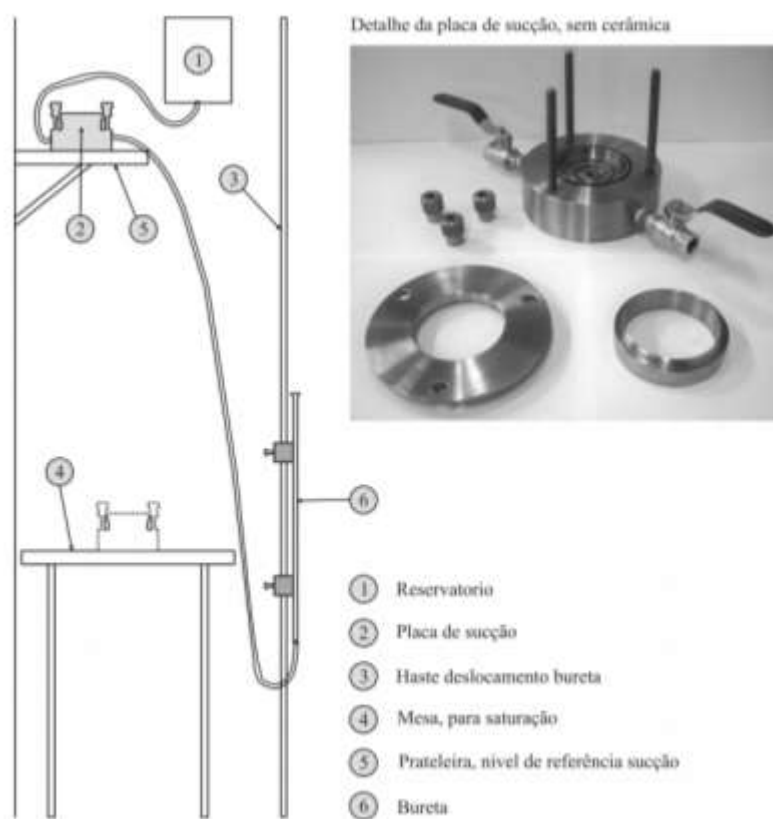
Neste método uma amostra é colocada em contato com uma placa porosa, saturada, cujo valor de entrada de ar é maior que à sucção que se almeja medir. Pela placa é definida uma alteração, aplicando diretamente uma sucção à parte inferior do sistema, enquanto a parte superior mantém-se à pressão atmosférica. Após o tempo necessário para atingir o equilíbrio hidráulico, retira-se a amostra e estabelece a umidade. Por essa técnica estipula-se apenas a sucção matricial do solo, pois a placa é permeável aos íons dissolvidos na água (PRESA et al., 1988).

De forma mais clara Silva (2009) explica que o método se baseia em determinar um gradiente de pressão em uma placa porosa, que está sob pressão atmosférica em sua parte superior, pela aplicação direta de sucção na parte inferior da placa, e assim é encontrada a sucção mátrica, salientando que a placa é permeável aos íons dissolvidos na água.

O grande impasse desse método está na ameaça da água cavitatar sob pressões em torno -1atm, afetando assim a determinação de pressões negativas na água. Para tentar amenizar essa ameaça desenvolveu-se a placa de sucção apresentada na Figura 2.4 usada para os valores de sucção (≤ 16 kPa). O princípio de funcionamento é a aplicação direta de uma carga hidráulica negativa na amostra, mantendo a pressão de ar sob condições atmosféricas. A carga hidráulica negativa é limitada a 100 kPa devido à possibilidade de cavitação dentro do tubo de drenagem (FEUERHARMEL et al., 2006).

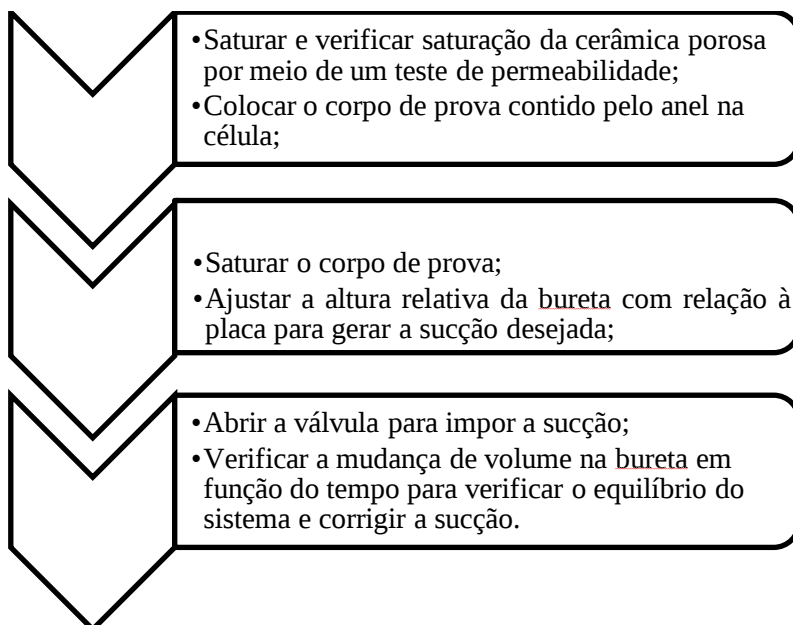
Conforme, Otálvaro o equipamento da placa de sucção é composto por três sistemas principais: sendo o primeiro composto por uma célula de aço inox constituída por três peças: base, anel para amostras e anel superior. O outro sistema de saturação é constituído por um reservatório de cinco litros e uma superfície que garante uma diferença de nível de 1,5 m em relação ao reservatório; e por último o sistema de imposição da sucção, composto por uma prateleira colocada a 2,3 m do nível do piso do laboratório, um tubo guia para deslocar verticalmente a bureta provendo uma diferença de nível de 1,7 m, e uma bureta de 50 ml graduada. O passo a passo para o procedimento de ensaio na placa de sucção está ilustrado na figura 2.5 (OTALVARO, 2013).

Figura 2.4 - Equipamento completo placa de sucção



Fonte: OTALVARO (2013)

Figura 2.5 - Procedimento ensaio placa de sucção



Fonte: modificado de OTALVARO (2013)

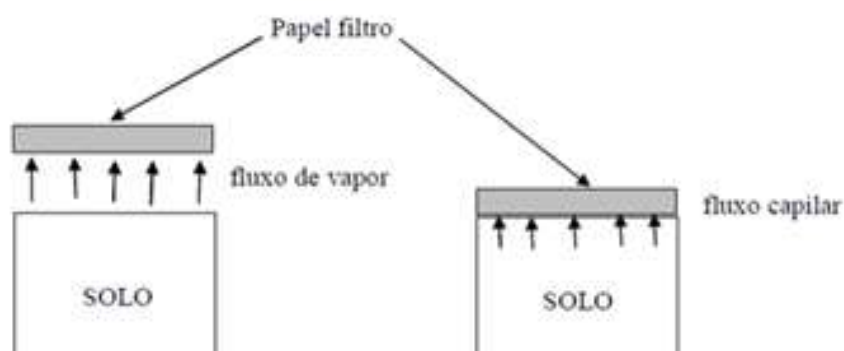
2.2.1.2. Ensaio de Papel Filtro

Segundo, Queiroz (2015), “o ensaio de papel filtro consiste em colocar uma amostra de solo em contato com um papel filtro, de calibração conhecida, em um ambiente hermeticamente fechado até que o sistema entre em equilíbrio”.

O método fundamenta-se na habilidade de meios porosos de absorção ou perda de certa quantia de água quando estão em contato, direto ou indireto, em um ambiente fechado, até chegarem à estabilidade de pressão. Nessa estabilidade, os valores de umidade do solo e do papel filtro são diferentes, porque, possuem a mesma sucção. Então o equilíbrio é atingido quando o fluxo de fluido ou vapor findar (LOPES, 2006).

No ensaio de papel filtro o fluxo pode ocorrer de duas maneiras: por meio de vapor ou por capilaridade, como mostra a Figura 2.6 (MARINHO.1997). Na situação em que o fluxo ocorre por meio de vapor, a sucção que será medida é a total, dado que para a saída das moléculas de água do interior do solo, estas deverão vencer as forças capilares e osmóticas. Caso o fluxo ocorra por capilaridade a sucção determinada é a mátrica, pois o fluxo ocorre através das partículas de solo e das fibras do papel filtro, sem que haja influência das forças causadas pela presença de sais dissolvidos na água (QUEIROZ, 2015).

Figura 2.6 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro



Fonte: MARINHO (1995)

Na determinação da sucção total, o tempo de equilíbrio de pressão entre o solo e o papel filtro pode ser considerado pequeno para altos níveis de sucção (sucções acima de 1,5 MPa). Para sucções baixas, esse tempo passa a ser maior, podendo ser mais que 30 dias quando se atinge sucções menores que 100 kPa. A Tabela 1 apresenta

tempos de equilíbrio para o papel filtro medindo várias faixas de sucção total (MARINHO, 1997).

Tabela 1 - Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medição da sucção total

Nível de Sucção (Kpa)	Tempo de equilíbrio (dias)
0-100	Indeterminado > 30
100-250	30
250-1000	15
>1000	7

Fonte: MARINHO (1994)

Borges et al. (2010), após realizar um estudo sobre o papel filtro Quanty, afirma que este pode ser empregado para medição de sucção pelo método de papel filtro conforme tabela 2.

Tabela 2 - Equações que relacionam teor de umidade do Quanty

Faixa de Umidade	Equação Sucção (Kpa)	Papel Filtro
$w > 55\%$	$e^{[(161,44-w)/24,07]}$	Quanty
$\leq 55\%$	$e^{[(79,782-w)/6,26]}$	Quanty

Fonte: AUTOR (2020)

O ensaio de papel filtro tem grande favoritismo pelo seu custo e sua facilidade, contudo, a sua utilização necessita de bastante cuidado em todo seu desempenho, mas principalmente na determinação do teor de umidade do papel, e em sua análise, já que os resultados estão muito ligados aos procedimentos realizados (QUEIROZ 2015).

2.2.1.3. Psicrômetros (WP4C)

Os psicrômetros são dispositivos capazes de medir a sucção atuante no solo por meio de dados de umidade relativa. Na aquisição dos dados usados nesse trabalho foi empregado o equipamento WP4C (Dewpoint PotentiaMeter). O WP4C (figura 2.7) é fundamentado na técnica do ponto de orvalho, que é a temperatura à qual o vapor de

água presente no ar passa para o estado líquido na forma de pequenas gotas por condensação (QUEIROZ, 2015).

Figura 2.7 - WP4C (Dewpoint PotentiaMeter)



Fonte: QUEIROZ (2015)

Esse instrumento mede o potencial hídrico pelo equilíbrio da fase líquida da amostra com a fase gasosa em uma câmara fechada. Quando o potencial de água da amostra e o ar da câmara chegam a equilíbrio, as temperaturas do ar e da amostra são definidas. E de modo recíproco as pressões de vapor no momento em que ocorre a condensação.

O WP4C mede sucção total, em uma escala de 0 a 300 MPa, com a precisão variando com o intervalo de leitura. As mais relevantes desvantagens apresentadas por esse método são a grande intervenção da variação da temperatura do ambiente em que acontece o ensaio e a pequena dimensão da amostra e como vantagem é uma excelente alternativa ao ensaio de papel filtro, visto que esse elimina notavelmente a influência do operador, além da rapidez para realizar os ensaios (QUEIROZ, 2015).

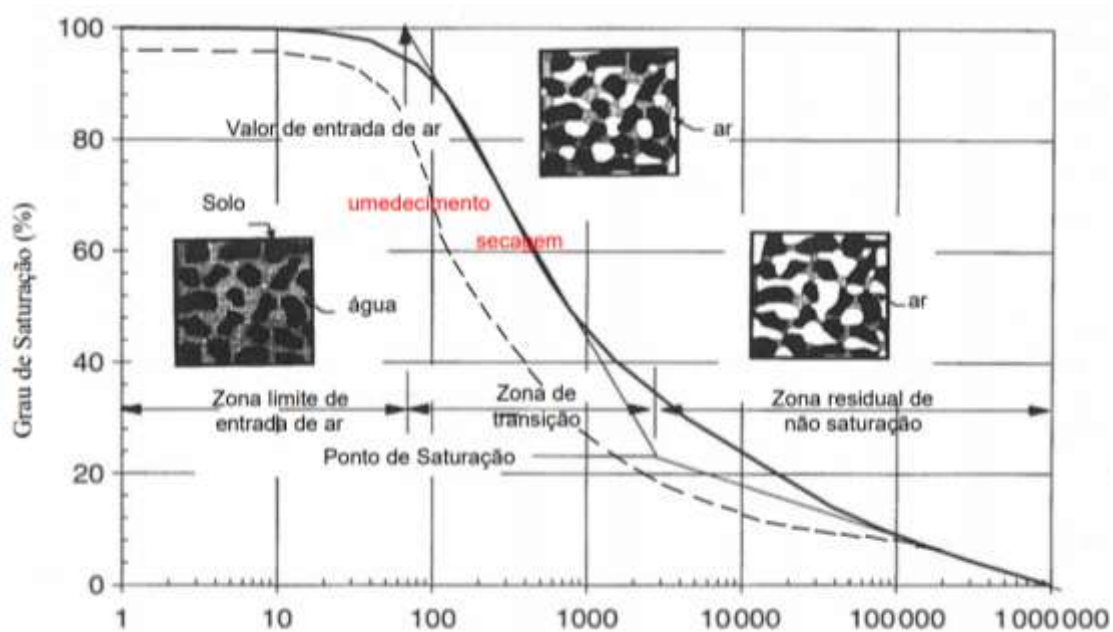
2.2.2. Pontos importantes da Curva Característica

Conforme Vanapalli et al.(1999), a curva característica pode ser representada graficamente em escala aritmética quando a faixa de sucção empregada é pequena(0-1000 kPa), ou em uma escala semi-log quando a faixa de sucção é grande. As grandes partes das aplicações no ramo da engenharia estão ligadas aos pequenos

valores de sucção (< 500 kPa), Valores de sucção de aproximadamente 1.000.000 kPa e o correspondente teor de umidade (ou grau de saturação) são usados para a definição das condições de contorno em análises de fluxo em solos não saturados.

Na figura 2.8 é exposta uma curva característica comum de solo compactados para valores de sucção de 0 a 1.000.000 kPa . Vários resultados experimentais indicam a sucção de 1.000.000 kPa como o máximo valor de sucção da curva característica, isto é, confere esse valor de sucção para os solos apresentarem valor próximo de zero. Logo na Figura 2.8 pode-se identificar os pontos primordiais da curva característica (valor de entrada de ar e ponto de saturação residual) e os estágios identificáveis de dessaturação (zona de efeito limite de entrada de ar, zona de transição e zona residual de não saturação) (VANAPALLI, 1999).

Figura 2.8 - Curva característica típica de solos compactados



Fonte: Vanapalli et al.(1999 *apud* FEUERHARMEL ,2003).

- Zona de efeito limite de entrada de ar

É o primeiro estágio abordado na curva característica, inicia-se com o valor de sucção próximo a zero e vai até chegar à sucção correspondente ao valor de entrada de ar. Nessa etapa quase todos os poros do solo mantêm-se com água, ou seja, os meniscos de água em contato com as partículas de solo ou agregado estão na forma consistente. Pela figura 2.9 ilustrou-se a variação da área de água em diferentes etapas de dessaturação do solo (Vanapalli et al., 1996).

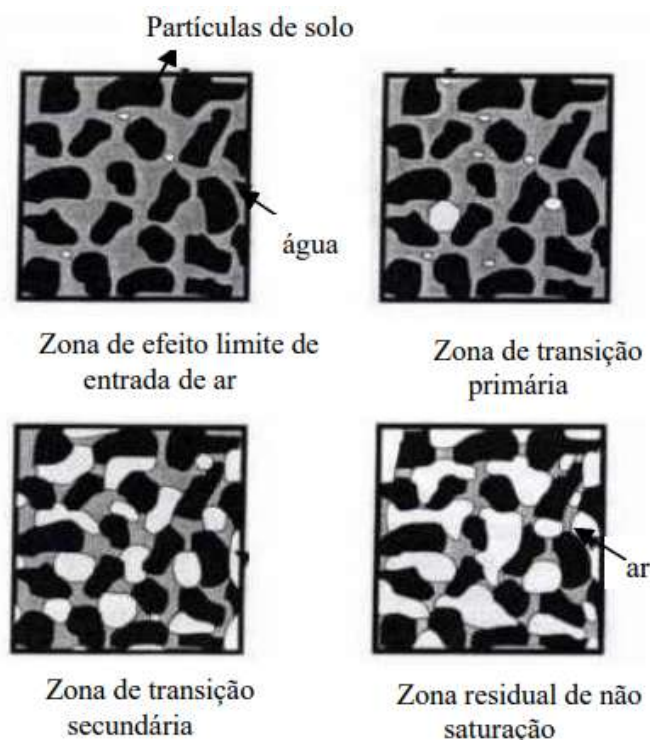
- Zona de transição

É a etapa seguinte da curva característica, a qual inicia na sucção correspondente ao valor de entrada de ar e termina na correspondente ao ponto de saturação residual. O solo começa a dessaturar-se no estágio de transição e grau de saturação abaixa consideravelmente com o aumento da sucção. A quantia de água nos contatos entre as partículas ou agregados diminui com a progressiva dessaturação, ou seja, o menisco de água que se encontra ao redor das partículas começa a perder a forma contínua. (FEUERHARMEL, 2003). A Figura 2.9 retrata respectivamente a área de água nas etapas de transição primária e secundária.

- Zona residual de não saturação

De acordo com Vanapalli et al., (1996). A etapa final da curva característica é o estágio residual de não saturação que inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, isto é, a relação entre o teor de umidade muito próximo a zero. Nessa etapa grandes aumentos de sucção direcionam a pequenas variações no teor de umidade. A dessaturação acontece principalmente pelo resultado do movimento de vapor que decorre até que o teor de umidade do solo atinja o equilíbrio com a pressão de vapor existente em seus arredores.

Figura 2.9 - Provável variação da área de água nos diferentes estágios da curva



Fonte: Vanapalli et al.(1999 *apud* FEUERHARMEL,2003).

2.2.3. Equações de Ajuste para a Curva Característica

Os modelos de ajuste para as curvas características são usados para representar os dados alcançados em laboratório, tendo em vista que estes expressam, muitas vezes, de forma desconexa. A importância de se empregar tais ajustes é fundamental quando se aplica modelagem numérica para extrapolar e interpolar os resultados experimentais que ainda não são existentes (QUEIROZ, 2015).

As equações de ajuste podem ser lineares ou não lineares, e ter complexidades diferentes. No entanto, o objetivo é comum: reproduzir parte das feições da curva de retenção, incluindo a forma e alguns parâmetros de referência, como umidade de saturação (w_{Sat}), valor de sucção onde surgem os primeiros vazios não preenchidos totalmente por água (AEV), teor de umidade residual (w_{res}) e razão de variação da umidade com a sucção (λ_s) (OTALVARO, 2013).

Estas equações variam quanto ao número de parâmetros envolvidos, e pode-se dizer que, geralmente, quanto maior o número de parâmetros de ajuste, maior a flexibilidade e capacidade de ajuste da equação (BORGES, 2010). Porém, em excesso priva-se a sua principal vantagem, que é a simplificação.

Os dados usados nesse trabalho foram tirados dos resultados obtidos em ensaios de determinação da curva de retenção pelo método do papel filtro e foram ajustados pelo método proposto por Durner (1994), conforme tabela 3. A escolha veio mediante a análise de dois critérios: disponibilidade dos parâmetros requisitados pelo modelo de ajuste e adequação desse modelo ao solo em estudo. (QUEIROZ, 2015).

Tabela 3 - Método de ajuste Dummer

Equação	Parâmetros
$e_w = \frac{e^i}{[1 + (a_i \cdot s)^{n_i}]^{1-1/n_i}}$	$a_i \quad n_i$
Fonte: AUTOR (2020)	

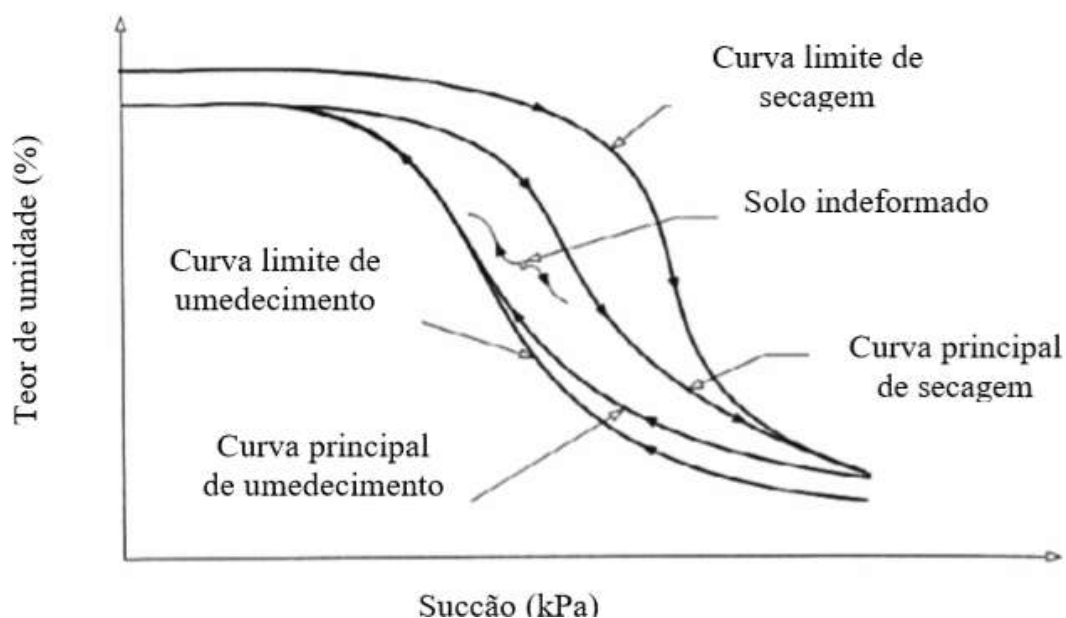
2.2.4. Histerese

A curva característica sofre histerese, quando, o teor de umidade correspondente em uma estipulada sucção do solo para o caminho de molhagem é menor do que o caminho de secagem. (BORGES, 2010).

Hillel (1971), citado por Gerscovich (2001), apontou os principais fatores responsáveis pela histerese de curvas características: a não uniformidade geométrica dos vazios, a presença de ar retido no solo ou até mesmo variações estruturais decorrentes de processos de fluxo que podem propiciar fenômenos de inchamento, ressecamento ou envelhecimento.

Melgarejo et al. (2002) afirmam que a curva característica de uma amostra de solo com determinadas condições iniciais cairá dentro de uma região delimitada por uma curva limite de secagem e uma curva limite de umedecimento, que correspondem respectivamente à curva superior e a curva inferior exibida na Figura 2.10 para uma amostra de solo reconstituída. A primeira trajetória de umedecimento ou secagem de uma amostra é chamada de curva principal, a seguinte de curva secundária e todas essas trajetórias caem entre as curvas limites. A curva característica para uma amostra indeformada também cairá dentro desta região e provavelmente estará entre as curvas principais obtidas para o mesmo solo na condição reconstituída.

Figura 2.10 - Histerese da curva característica



Fonte: MELGAREJO et al, (2002)

2.3. ÍNDICE DE VAZIOS E SUA INFLUÊNCIA NA CURVA CARACTERÍSTICA

Considerava-se que a curva característica era única para um propenso solo. No entanto, Gallipoli et al. (2003) sustentaram que as variações no índice de vazios causavam modificações nos poros do solo e em suas ligações, alterando em consequência o grau de saturação. Dessa forma a relação saturação/sucção não é exclusiva para um solo, visto que existe a dependência do índice de vazios. Na generalidade, os ensaios para a obtenção da curva característica são realizados considerando o índice de vazios constante. No entanto, a literatura apresenta diversos trabalhos que demonstram a influência do índice de vazios na curva característica. (QUEIROZ, 2010).

A relação entre grau de saturação e sucção para um dado solo não pode ser única por pelo menos duas razões:

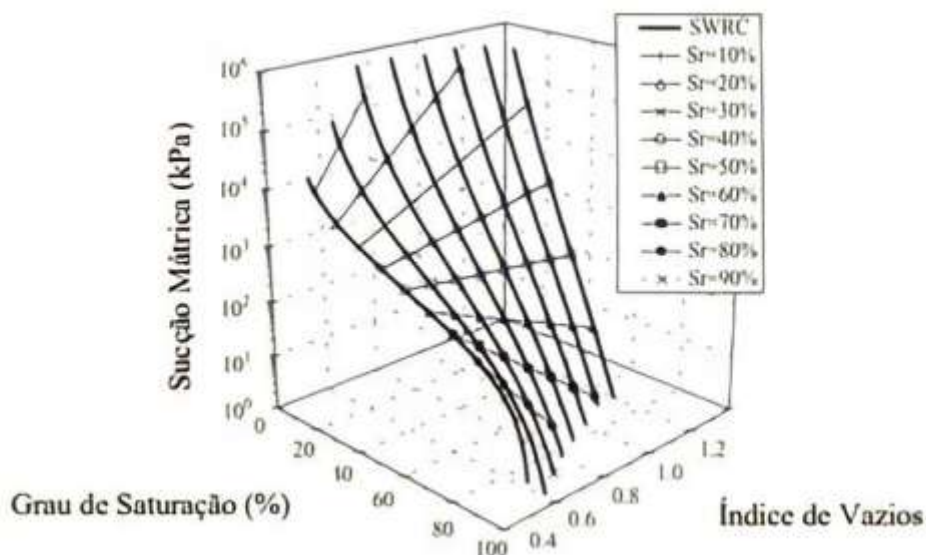
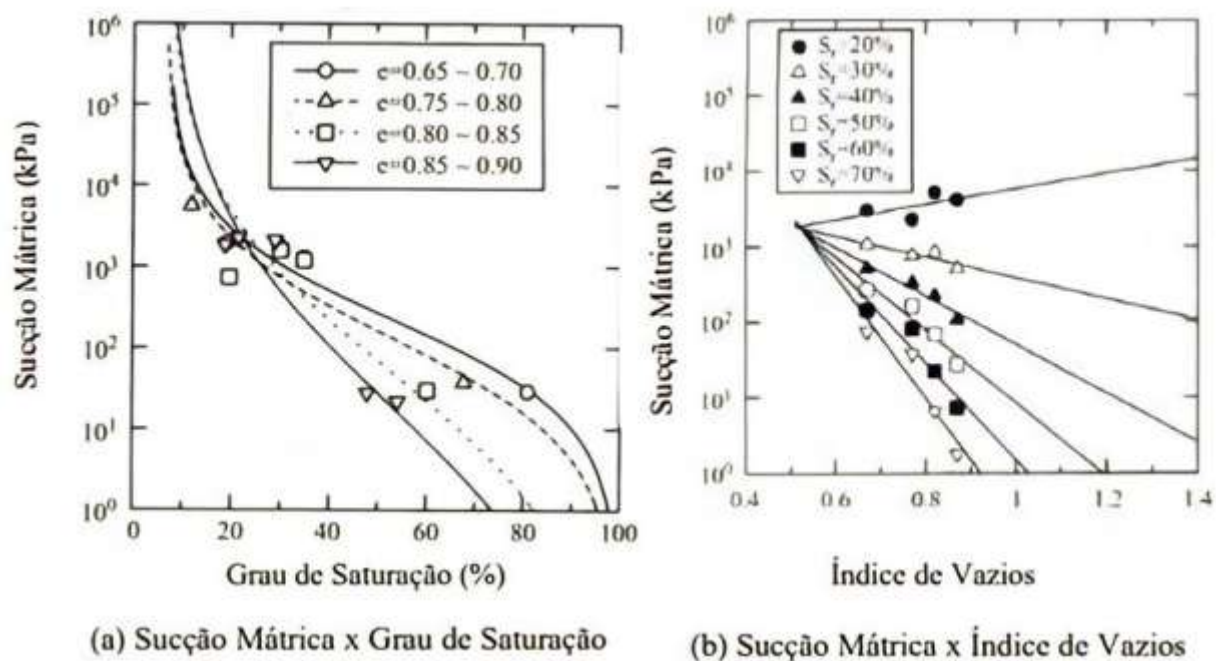
(a) Em um solo deformável, a variação do índice de vazios produzirá alterações nas dimensões dos vazios que causarão correspondente variação na curva característica;

(b) Em um solo rígido, a ocorrência de “histerese hidráulica” resulta em uma curva característica com trajetórias de umedecimento e secagem diferentes.

Variações irreversíveis no grau de saturação ocorrerão durante o carregamento e o descarregamento caso haja uma variação inconvertível do índice de vazios. Desse modo, as variações do índice de vazios afetam diretamente a curva característica, não podendo esta ser representada por uma curva única, que não prevê mudanças no grau de saturação (GALLIPOLI et al., 2003).

Segundo Sugii et al. (2002 *apud* FEUERHARMEL, 2003), a influência da curva característica com o índice de vazios pode assumir um modelo tridimensional: grau de saturação x sucção mátrica x índice de vazios. A figura 2.11 apresenta as principais considerações do estudo apresentado pelos autores. A Figura 2.11 (b) demonstra a relação entre sucção mátrica e índice de vazios para vários graus de saturação. A relação entre essas variáveis converge para uma determinada condição, dada por um índice de vazios próximo ao limite de contração e uma sucção próxima do “ponto de murcha”. A Figura 2.11 (c) apresenta o modelo tridimensional para previsão da curva característica levando em consideração o índice de vazios.

Figura 2.11 - Efeito do índice de vazios na curva característica



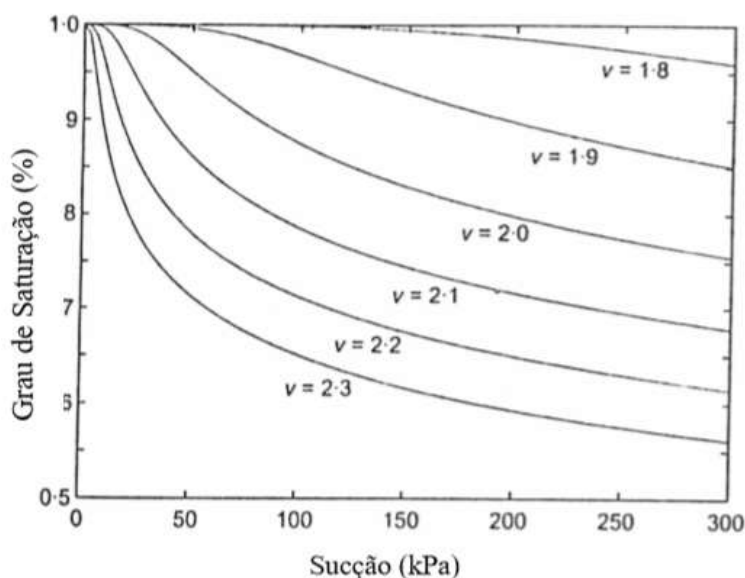
Fonte: Sugii et al. (2002 *apud* FEUERHARMEL, 2003)

Gallipoli et al. (2003) difundiram uma relação para a variação do grau de saturação de um solo não saturado associado a variação do índice de vazios, (através da expressão do volume específico (v), onde ($v = 1 + e$)). A hipótese adotada pelos autores é de que, na ausência de efeitos de histerese, existe uma única relação entre grau de saturação (S_r), sucção (S) e volume específico (v).

A Figura 2.12 apresenta uma série de curvas características para diferentes valores de v . Os autores afirmaram que, quando o volume específico decresce, a

dimensão os vazios e a conexão entre os vazios diminui e o solo requer um valor de sucção mais alto para produzir um dado grau de saturação, ou seja, para um valor fixo de grau de saturação a sucção obtida é maior quanto menor for o volume específico (GALLIPOLI et al., 2003).

Figura 2.12 - Previsão da curva característica para diferentes valores



Fonte: GALLIPOLI et al, (2003)

2.4. ESTUDO ESTATÍSTICO

A estatística tem um papel de suma importância dentre as diversas pesquisas científicas, particularmente na análise e interpretação de resultados adquiridos. Nos dias atuais, os estudos estatísticos têm uma vasta usabilidade nos ramos científicos englobando também a Engenharia Civil/Geotécnica (QUEIROZ, 2010).

A teoria clássica da estatística baseia-se na distribuição contínua mais importante e mais utilizada que é a distribuição normal, referenciada como curva normal ou curva de Gauss. Sua importância em análise matemática resulta do fato de que muitas técnicas estatísticas, como análise de variância, regressão e alguns testes de hipóteses, assumem e exigem a normalidade dos dados (PAIVA, 2009).

A distribuição normal é um dos principais tipos de distribuição amostral, isto é, é uma distribuição teórica que descreve o comportamento de uma determinada estatística ou estimador. É realizada com a estimação de parâmetros e os testes de hipóteses. Como os valores relacionados com a população são denominados

“parâmetros”, os testes paramétricos estudados comportam uma diversidade de suposições fortes a que o seu emprego deve subordinar-se aos dados extraídos de populações com distribuição normal (VIALI, 2008).

Segundo Paiva (2009), trabalhos de pesquisa a qual estudam a variabilidade das propriedades do solo com o uso da estatística clássica, baseando-se na análise descritiva geral dos dados como, a média, o desvio padrão, variância e o coeficiente de variação (CV), onde os maiores coeficientes de variação indicam maiores oscilações da propriedade possibilitando uma primeira visão dos aspectos gerais destes dados.

2.4.1. Conceitos Básicos da Estatística

A estatística é definida por Teixeira (1995) como o conjunto de técnicas que usufrui de dados, classificação, apresentação e representação objetivando a sua utilização e interpretação dentro de um processo decisivo.

O estudo da estatística pode ser dividido em três áreas: descritiva, probabilística e inferencial. A descritiva tem a função de descrever os dados, organizando-os de acordo com sua natureza. Para isso, utiliza-se tabelas, gráficos, curvas e medidas descritivas. A probabilística é utilizada para avaliar hipóteses associadas a determinados fenômenos aleatórios envolve uma margem de risco para estudá-la emprega-se métodos e técnicas apropriadas do seu fundamento. Por meio da estatística inferencial é possível generalizar conclusões a respeito de uma população utilizando-se dados provenientes de uma amostra. (SOUZA, 2016).

Após o entendimento do comportamento dos dados e como eles estão distribuídos fazem-se necessárias outras ferramentas que apontem característica da população como as medidas de tendência central e de dispersão.

Sendo assim a medida de tendência central mais correntemente empregada é a média, e para entender as medidas de dispersão e variabilidade dos valores são aplicadas a variância, o desvio-padrão e o coeficiente de variação (CV) (TEIXEIRA, 1995). Conforme especificados na tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos Elementos da Estatística

Elementos da Estatística	Equação	Descrição
Média	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	É o quociente entre a soma de todos os valores observados e o número total de observações. Considerando um conjunto n de observações, $x_1, \dots, x_n$, a média aritmética $\bar{x}$.
Variância	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	É a medida que se obtém somando os quadrados dos desvios das observações da amostra, relativamente à sua média, e dividindo por n ou por n-1
Desvio Padrão	$S = \sqrt{s^2}$	O desvio padrão s é a raiz quadrada da variância. s^2 .
Coefficiente de variação	$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \%$	É uma medida relativa de variabilidade, útil para comparação entre conjuntos de dados, pois quantifica a concentração dos dados em torno da média de séries distintas.

Fonte: Modificado de Fonseca (2006)

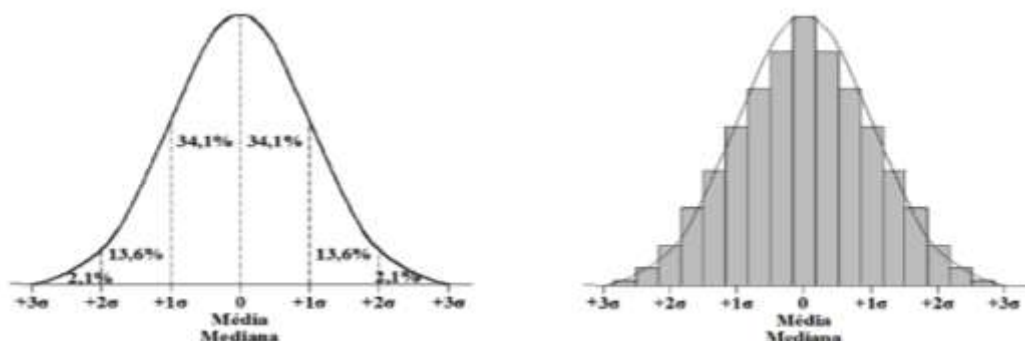
2.4.2. Distribuição Normal

De acordo com Viali (2008), a distribuição normal é classificada como uma distribuição de probabilidade, isto é, uma distribuição teórica que descreve o comportamento de uma determinada estatística ou estimador.

É representada por um gráfico simétrico, em forma de sino (Figura 2.13), ao qual pode ser representado pela função densidade de probabilidade (Equação 1). Esta equação é especificada por dois parâmetros: a média populacional, $\mu \in \mathbb{R}$, e o desvio padrão populacional, $\sigma > 0$, ou o equivalente a variância populacional, σ^2 . Quando a distribuição dos dados é Normal, a média se encontra no centro da distribuição e esta possui o mesmo valor da mediana e da moda, devido à simetria da curva (Lopes et al. 2013).

$$F(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \mu \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Figura 2.13 - Modelo de Distribuição Normal



Fonte: LOPES et al. (2013)

Lopes et al. (2013) afirmam que uma grande quantidade de métodos estatísticos supõe que seus dados provêm de uma distribuição Normal, permitindo que seja utilizada a maioria das técnicas de inferência estatística, por exemplo: a estimação e os testes de hipóteses. Existem disponíveis alguns testes para avaliar se a distribuição de um conjunto de dados adere à distribuição normal.

A realização de um teste de adequação de ajustamento visando verificar se os dados da amostra se ajustam com as hipóteses feitas, ou seja, se realmente a variação do índice de vazios nas curvas características estudadas se adequam a uma Distribuição Normal de Frequência, se faz necessária (QUEIROZ, 2010).

2.4.3. Teste de Hipótese

Em conformidade com Viali (2008), alguns itens devem ser levados em conta na escolha da prova estatística para cada situação, como a forma como a amostra foi obtida, a natureza da população da qual se extraiu a amostra e o tipo de mensuração do conjunto de valores numéricos e a do tamanho da amostra disponível. Quando determinados a natureza da população e o método de amostragem ficará estabelecido o modelo estatístico.

Associado a cada teste estatístico tem-se um modelo estatístico e condições pré estabelecidas, o teste estatístico é validado sob estas condições. Nem sempre é possível verificar se todas as condições do modelo foram satisfeitas e neste caso tem-se que admitir que estas condições foram satisfeitas. As condições do modelo estatístico são denominadas teste de hipóteses. Um teste de hipóteses deve seguir os passos descritos na tabela 5 (VIALI, 2008).

Tabela 5 - Etapas do teste de hipótese

Etapas	Descrição
Formular as hipóteses	Estabelecer as hipóteses nula (H_0) e alternativa. Toma-se uma amostra das variáveis sobre um determinado parâmetro, tendo formulado a hipótese nula é conveniente determinar qual será a hipótese alternativa.
Estabelecer a estatística (estimador) a ser utilizado	A estatística utilizada deve ser definida e sua distribuição teórica determinada.
Fixar o nível de significância (α) do teste	É possível determinar o valor crítico, que é um valor lido na distribuição amostral da estatística considerada por meio de tabelas. Este valor vai separar a região de crítica (de rejeição) da região de aceitação.
Calcular a estatística teste (a estimativa)	Através da amostra obtida calcular a estimativa que servirá para aceitar ou rejeitar a hipótese nula. Dependendo do tipo de hipótese alternativa este valor servirá para aceitar ou rejeitar H_0
Tomar a decisão	Se o valor da estatística observada na amostra estiver na região crítica rejeitar H_0 , caso contrário aceitar H_0
Conclusão	Enunciar a tomada da decisão em termos do problema sendo testado

Fonte: modificado de VIALI (2008)

2.4.4. O teste Kolmogorov-Smirnov (KS)

O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) é uma prova de avaliação do grau de concordância entre a distribuição de um conjunto de valores amostrais (valores observados) e determinada distribuição teórica específica. Ele testa se os valores amostrais podem possivelmente ser considerados como proveniente de uma determinada distribuição (VIALI, 2008).

O teste K-S fornece o parâmetro significância (valor de prova, valor-p), que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a distribuição teórica (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição normal. Quanto menor for a significância, menor é a consistência entre os dados e a hipótese nula (LOPES et al., 2013).

Em conformidade com Viali (2008) a distribuição teórica acumulada (H_0) é representada por $F_0(x)$ e a distribuição de frequências dos valores amostrais por $S_n(x)$. Como H_0 supõe que a amostra tenha sido obtida da distribuição $F_0(x)$ é razoável esperar que, para cada valor de x , $S_n(x)$ esteja próximo de $F_0(x)$, isto é, sob H_0 , espera-se que as diferenças entre $S_n(x)$ e $F_0(x)$ sejam pequenas conforme equação 2. O teste K-S toma a maior destas diferenças em módulo que ao qual é denominada de desvio máximo e é anotada por D_n .

$$D_n = |F_0(x) - S_n(x)| \quad (2)$$

Para aplicar a prova de Kolmogorov-Smirnov de duas amostras, constrói-se a distribuição das frequências acumuladas relativas de cada uma das amostras, utilizando os mesmos intervalos em ambas. Em cada intervalo subtrai-se uma função da outra (equação 3). Assim:

$$D_n = |S_{n1}(x) - S_{n2}(x)| \quad (3)$$

Conhecendo a distribuição de D_n é possível avaliar o seu valor observado (d_n), e decidir se este é suficientemente pequeno para que não se rejeite H_0 a um dado nível de significância α . Mais concretamente, rejeita-se H_0 , para um nível de significância α , se D_n for maior que o valor crítico, rejeitamos a hipótese de

normalidade dos dados com $(1 - \alpha)100\%$ de confiança. Caso contrário, não rejeitamos a hipótese de normalidade.

A tabela 6 mostra os valores críticos para o teste KS, sendo n a quantidade de amostra.

Tabela 6 - Valores críticos para a estatística do teste de Komolgorov-Smirnov

n	Nível de Significância (α)			
	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,4
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,2	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,2	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Valores maiores
Fonte: VIALI (2008)

Para a verificação da Normalidade por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov (KS) existem diversas ferramentas e programas estatísticos, dentre os quais o Statistical Package for Social Sciences (SPSS) versão 17.0 (SPSS, 2008). O SPSS é utilizado para a análise de dados e permite manipular, transformar, criar tabelas e gráficos que resumam as informações obtidas. As suas capacidades estão acima da análise descritiva de um conjunto de dados. Com este software procedimentos mais avançados como inferência estatística, testes de hipóteses e estatísticas multivariadas para dados qualitativos e quantitativos também são possíveis de realizar (LOPES et al., 2013).

2.5. DISTRIBUIÇÃO NÃO NORMAL

Considere-se que a não normalidade ocorre quando alguma das variáveis que descrevem um fenômeno segue qualquer distribuição de probabilidade que não seja a normal, por razões intrínsecas ao fenômeno. Como o não atendimento da suposição de normalidade dos dados pode levar a estimativas incorretas, faz-se necessário buscar por alternativas. Sendo possível aplicar uma transformação aos dados, de tal forma que os dados transformados tenham distribuição normal ou aproximadamente normal (PINO, 2014).

De acordo com Gonzalez (2009), as transformações de Box-Cox, em que dados que não são normalmente distribuídos são convertidos em dados que apresentam distribuição normal, têm sido muito utilizadas, pois são práticas e fáceis de aplicação conforme equação 4.

$$y^\lambda = \frac{(y+c)^\lambda}{\lambda} = \begin{cases} \frac{(y+c)^\lambda}{\lambda}, & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \log(y+c), & \text{para } \lambda = 0 \text{ e } y > -c \end{cases} \quad (4)$$

Onde y representa a observação original, $y(\lambda)$ representa a observação transformada, λ e c são parâmetros desconhecidos e $\log$ representa o logaritmo natural, (Box et al., 1964).

Supõe-se que para algum valor de λ e algum valor de c as observações transformadas sejam independentes e normalmente distribuídas com variância constante σ e θ , onde a é uma matriz conhecida de posto completo e θ é um vetor de parâmetros desconhecidos. A densidade de probabilidade das observações é obtida pela equação 5.

$$\frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \left[-\frac{(y^\lambda - a\theta)(y^\lambda - a\theta)}{2\sigma^2} \right] x J(\lambda, y) \quad (5)$$

Onde o Jacobiano da transformação é dado por (equação 6):

$$x J(\lambda, y) = \frac{dy^i}{dy^j} \quad (6)$$

Os parâmetros na fórmula acima podem ser estimados aplicando a teoria de máxima verossimilhança para amostras. O uso da transformação de Box-Cox antes da

análise ou da modelagem é particularmente indicado quando a variável assume apenas valores positivos (POIRIER, 1978). Draper e Cox (1969) mostram que, mesmo quando não se alcança normalidade exata com a transformação, ela pode ser aplicada, sendo capaz de obter um estimador consistente.

Para a transformação de dados que não atingirem a Normalidade por meio do método de Box-Cox existe algumas ferramentas, como o software Action Stat que através de um sistema próprio, possui confiança nas suas aplicações estatísticas utilizando uma interface simples (PORTAL ACTION, 2018).

3. METODOLOGIA

Para a realização da análise estatística da distribuição do índice de vazios nas curvas características, foram utilizados os dados da tese de doutorado intitulada “Estudo do Comportamento Microestrutural de Solos Tropicais Compactados”, de autoria de Queiroz (2015).

Para o desenvolvimento da tese foi utilizado o solo do campo experimental do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília – PPG/UnB. Nesse estudo foram coletadas amostras deformadas a 1,70 m, e nesta profundidade o solo é definido como residual maduro, e devido ao seu elevado índice de vazios, é geralmente denominado argila porosa vermelha colapsível com baixa resistência a penetração ($NSPT < 4$) (GUIMARÃES, 2002). Camapum de Carvalho et al. (1994) constataram que os solos porosos de Brasília são colapsíveis por manifestarem uma estrutura formada por micro e macroporos. As mudanças no grau de saturação ou a alteração no estado de tensões é uma das causas para o colapso do solo.

Para a determinação das curvas de retenção foi utilizado solo compactado em laboratório, seguindo o procedimento: secagem ao ar até umidade higroscópica, peneiramento na peneira nº 10, umedecimento até a umidade desejada, permitindo um repouso mínimo de 12 horas e compactação semi-estática. A compactação foi realizada em cilindro pequeno (Proctor), utilizando prensa do ensaio de CBR e Marshall, dividindo o material em três camadas, controlando a massa e o volume para garantir o índice de vazios esperado. Ela ocorreu em um único sentido, sem o controle da velocidade e tensão e com variação de ponto para ponto. As condições de compactação, teor de umidade e índice de vazios, foram definidas visando atingir os objetivos da tese, assim não se faz necessário entrar no mérito dessa escolha nesse trabalho, apenas

apresentar seus valores esperados (Tabela 7) e os seus valores realmente obtidos e usados durante o desenvolvimento deste trabalho (Tabela 8).

As curvas de retenção foram obtidas realizando os ensaios de papel filtro, placa de sucção e WP4. As metodologias de ensaio utilizadas estão descritas na sessão destinada à Revisão Bibliográfica.

Tabela 7 - Teores de umidade e índice de vazios esperados

Curva	w %	e
A	18,4	1,077
B	20,5	0,938
C	23	0,861
D	27,3	0,938
E	33	1,077
F	21,5	1,23
F2	21,5	1,179
F3	21,5	0,992
F4	21,5	0,839
F5	21,5	0,708
G	23	1,05
G2	23	1,034
G3	23	1,007
G4	23	0,91
G5	23	0,838
H	23,9	1,18
H2	23,9	1,13
H3	23,9	1,097
H4	23,9	0,998
H5	23,9	0,842

Fonte: QUEIROZ (2015)

Tabela 8 - Índice de Vazios Obtidos

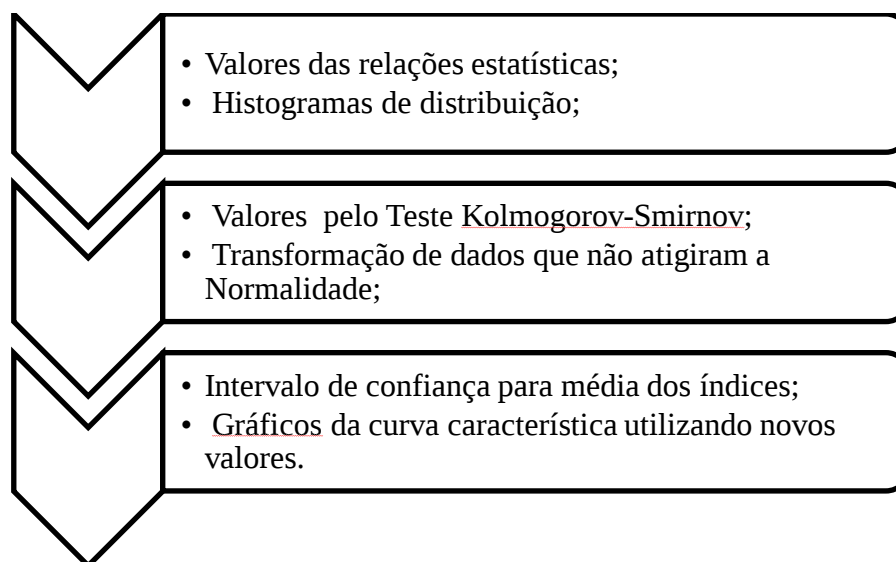
Índices de Vazios Obtidos																
Curva	Amostras															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	0,87	0,97	0,99	1,03	1,03	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,10	1,12	1,12	1,12	1,13
B	0,83	0,86	0,87	0,88	0,89	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,99
C	0,72	0,71	0,76	0,82	0,85	0,83	0,86	0,78	0,86	0,93	0,85	0,85	0,91	0,92	0,89	
D	0,87	0,84	0,92	0,91	0,87	0,76	1	0,79	0,86	0,85	0,8	0,85	0,85	0,9	1,07	0,81
E	0,94	0,95	0,97	0,98	0,95	1	0,96	0,94	0,96	0,99	0,82	1,1	0,94	0,95	0,96	0,93
F	1,29	1,26	1,25	1,23	1,3	1,26	1,22	1,16	1,24	1,24	1,29	1,29	1,21	1,18		
F2	1,13	1,1	1,09	1,16	1,09	1,09	1,18	1,13	1,09	1,05						
F3	0,98	0,96	1,03	0,98	0,97	0,96										
F4	0,71	0,76	0,76	0,8	0,78	0,8	0,81	0,8	0,81							
F5	0,68	0,63	0,67	0,66	0,65	0,69	0,72	0,68	0,65							
G	1,07	1	0,99	1,08	1,05	1	1,07	1,04	1,03							
G2	0,99	0,93	0,84	0,96	0,94	0,92	1,02	1,01	0,99							
G3	0,88	0,87	0,87	0,99	0,96	0,9	0,99	1,04	0,97							
G4	0,81	0,81	0,79	0,81	0,81	0,82	0,91	0,87	0,81							
G5	0,78	0,75	0,73	0,78	0,75	0,78	0,78	0,78	0,77							
H	1,18	1,12	1,09	1,14	1,16	1,18	1,11	1,2								
H2	1,07	1,02	1,04	1,1	1,04	1,09	1,11	1,06	0,98							
H3	1,07	1,01	1,03	1,06	1,05	1,03	1,12	1,03	1,01							
H4	1,04	1,28	1,18	0,97	1,13	1,03	1,04	1,19	0,98	1,01	0,98	1,09				
H5	0,89	0,83	0,83	0,84	0,84	0,89	0,97	0,92	0,95							

Fonte: QUEIROZ (2015)

3.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada seguindo as etapas descritas na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Metodologia para estudo estatístico



Fonte: AUTOR (2020)

Foram calculados os valores da média, desvio padrão, variância e o coeficiente de variação (CV) do índice de vazios do solo das 20 curvas características estudadas. Com esses valores devidamente organizados, analisou-se a faixa de variação aceitável, sob o ponto de vista da engenharia.

Em seguida, foram desenvolvidos histogramas da distribuição do índice de vazios das curvas. Logo depois, foram definidas a hipótese de igualdade (H_0), o nível de significância (α) e o tamanho de amostra (n).

O próximo passo tratou da verificação se os dados realmente estavam seguindo uma Distribuição Normal de frequência, para isso, foi realizado o teste de hipótese seguindo as suas etapas estabelecidas, à luz do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) com auxílio do software Statistical Package for Social Sciences (SPSS). Aos conjuntos de dados das curvas que não atingiram a condição de Normalidade, foi realizada a transformação por meio método de Box-Cox com o auxílio do software Action Stat.

A última etapa consistiu na apuração da influência do índice de vazios, pois regularmente os ensaios para a obtenção da curva característica são realizados considerando o índice de vazios constante. Intervalos de confiança para a média dos índices de vazios foram estabelecidos, e com posse desses dados gerados os gráficos das curvas características originais com índice de vazios calculados a cada ponto, utilizando os valores médios, mínimos e máximos do intervalo. Com isto verificou-se a faixa de variação gerada e a sua influência.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.RELAÇÕES ESTATÍSTICAS

Com os valores do índice de vazios pertencentes as 20 curvas características estudadas, foram devidamente calculados os valores da média, desvio padrão, variância e o coeficiente de variação (CV) de acordo com a tabela 9.

Tabela 9 - Índice de vazios: relações estatísticas

Curva	Média	Desvio Padrão	Variância	CV (%)
A	1,067	0,065	0,005	6,114
B	0,925	0,048	0,002	5,216
C	0,839	0,063	0,004	7,526
D	0,884	0,065	0,004	7,379
E	0,964	0,052	0,003	5,429
F	1,246	0,043	0,002	3,462
F2	1,111	0,038	0,001	4,317
F3	0,955	0,029	0,001	3,419
F4	0,780	0,033	0,001	4,279
F5	0,670	0,026	0,001	3,931
G	1,036	0,034	0,001	3,323
G2	0,955	0,057	0,003	5,965
G3	0,943	0,062	0,004	6,551
G4	0,827	0,038	0,001	4,601
G5	0,767	0,018	0,001	4,287
H	1,148	0,039	0,002	3,377
H2	1,056	0,042	0,002	4,006
H3	1,046	0,035	0,001	3,346
H4	1,077	0,100	0,010	9,259
H5	0,886	0,054	0,003	6,124

Fonte: AUTOR (2020)

Os valores para o coeficiente de variação apresentados na literatura variam em função dos condicionantes como o tipo de amostragem realizado, ensaios, classificações geotécnicas, número de ensaios entre outras considerações possíveis. (SOUSA,2020). Lacasse e Nadim (1996) publicaram uma tabela de coeficiente de variação (CV) para várias propriedades do solo, dentre elas o índice de vazios. Ao qual consideram o CV para o índice de vazios geralmente entre 7 e 30.

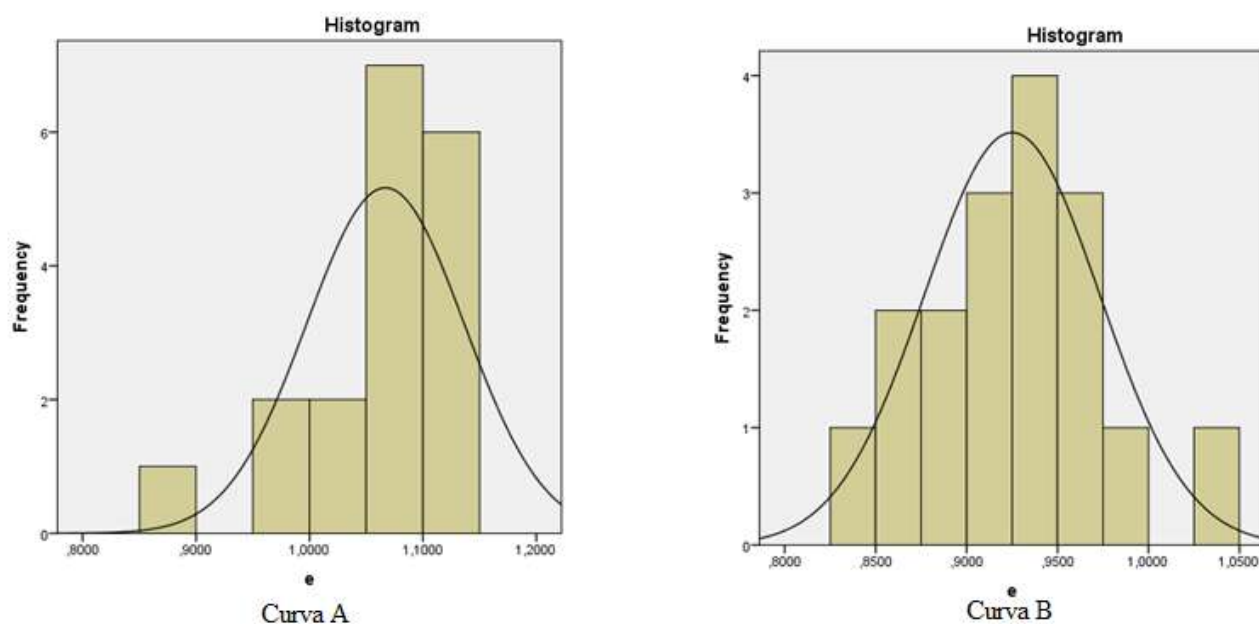
De acordo Pimentel Gomes (2000), sob o ponto de vista da engenharia e agronomia, os coeficientes de variação abaixo de 10% são considerados baixos, entre 10 e 20% são considerados moderados, altos entre 20% a 30% e superiores a 30% muito altos. Sendo assim pode-se dizer que os índices de vazios estudados possuem uma baixa variação e estão dentro de uma faixa aceitável.

4.2.HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS

O primeiro recurso para averiguação do formato da distribuição de uma variável contínua é a elaboração do histograma. O histograma é um gráfico de barras justapostas em que no eixo horizontal está a variável de interesse dividida em classes e no eixo vertical a frequência da classe correspondente (TORNAN et. Al.,2012).

No SPSS versão 18.0, uma das formas de desenvolver esse gráfico é através do menu *Analyze -> Descriptive Statistics -> Explore -> Plots marcando-se Histogram*. O sistema além de criar os histogramas com as barras criou também a curva ajustada da distribuição dos dados conforme as figuras 4.1 a 4.10.

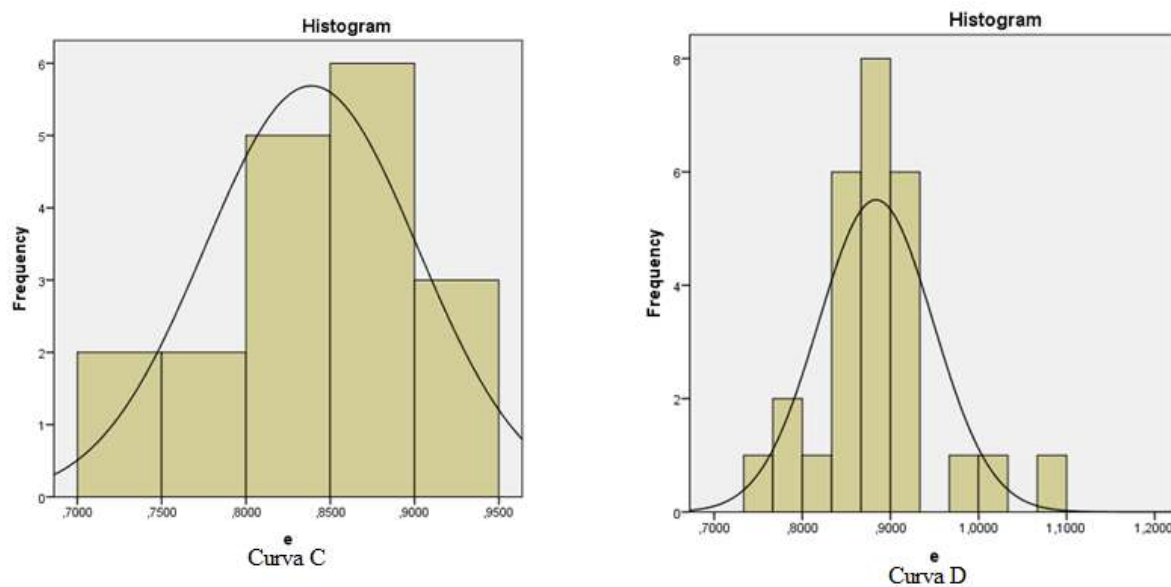
Figura 4.1 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas A e B



Fonte: AUTOR, (2020)

No Histograma da curva A não houve uma simetria, mas na Curva B é perceptível a simetria tendendo ao formato de sino da Distribuição normal.

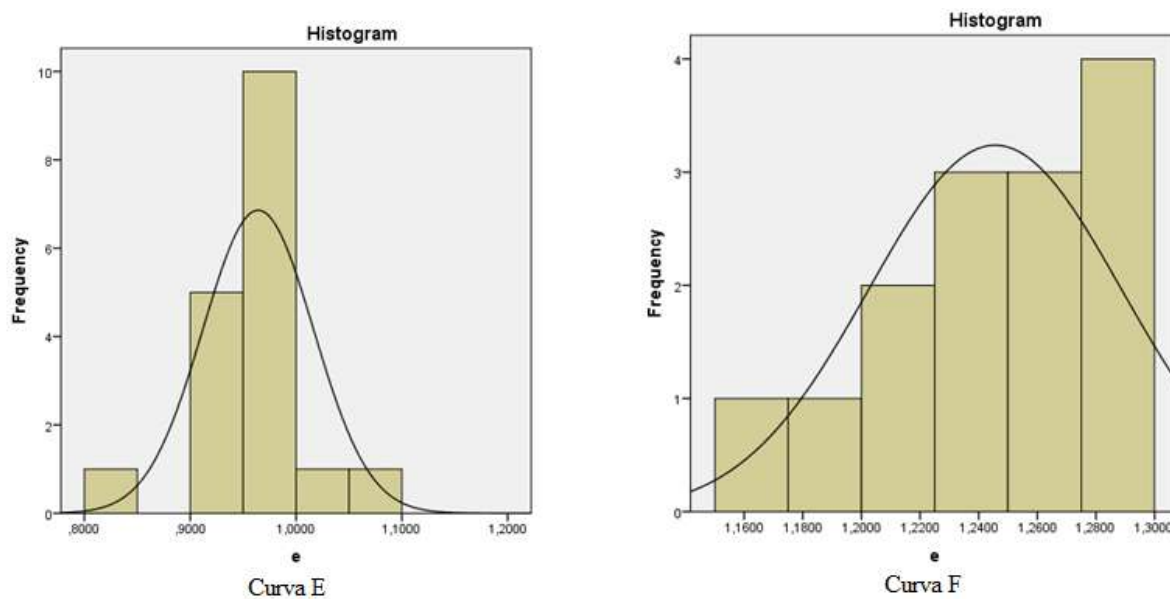
Figura 4.2 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas C e D



Fonte: AUTOR, (2020)

Nas curvas C ficou inconclusivo a questão da assimetria, na curva D já ficou clara a simetria em formato de sino tendendo então a Distribuição Normal.

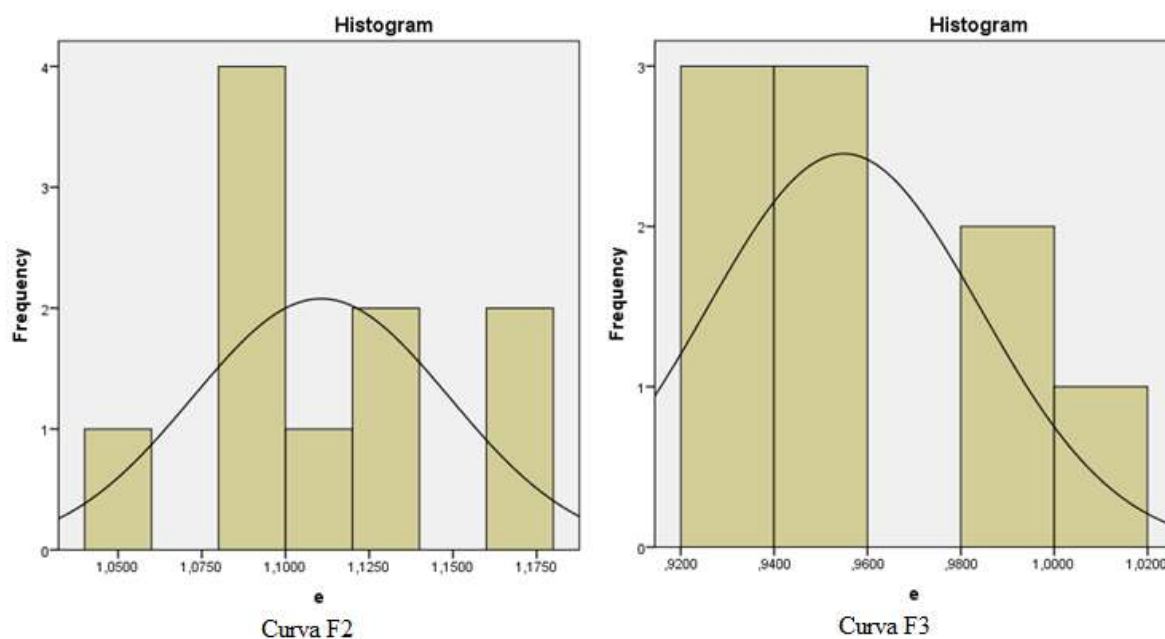
Figura 4.3 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas E F



Fonte: AUTOR, (2020)

Na curva E é notável a assimetria, já na curva F não existiu simetria na curva.

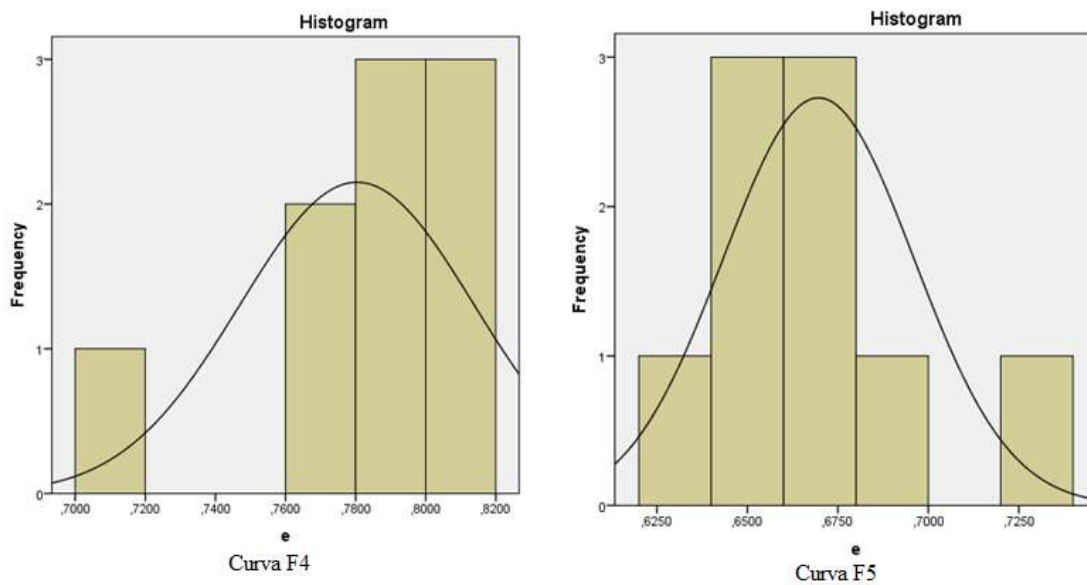
Figura 4.4 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas F2 e F3



Fonte: AUTOR, (2020)

Nas curvas F2 é perceptível uma leve assimetria, mas não conclusiva ao formato de sino e F3 não é visualmente notável assimetria.

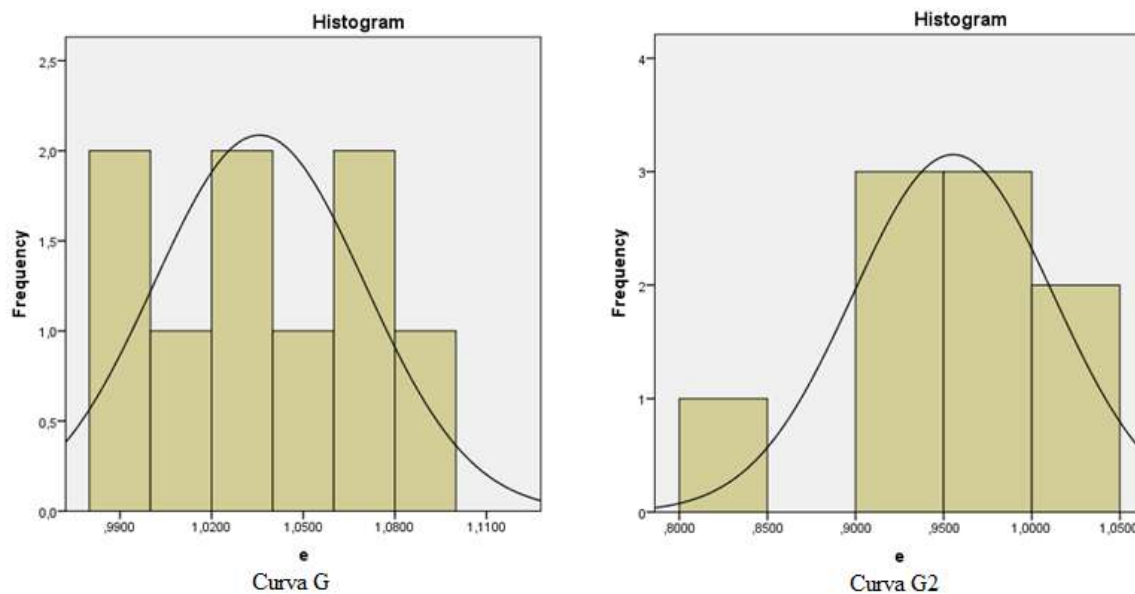
Figura 4.5 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas F4 e F5



Fonte: AUTOR, (2020)

Na curva F4 não é possível verificar a assimetria, na curva F5 é possível perceber a assimetria.

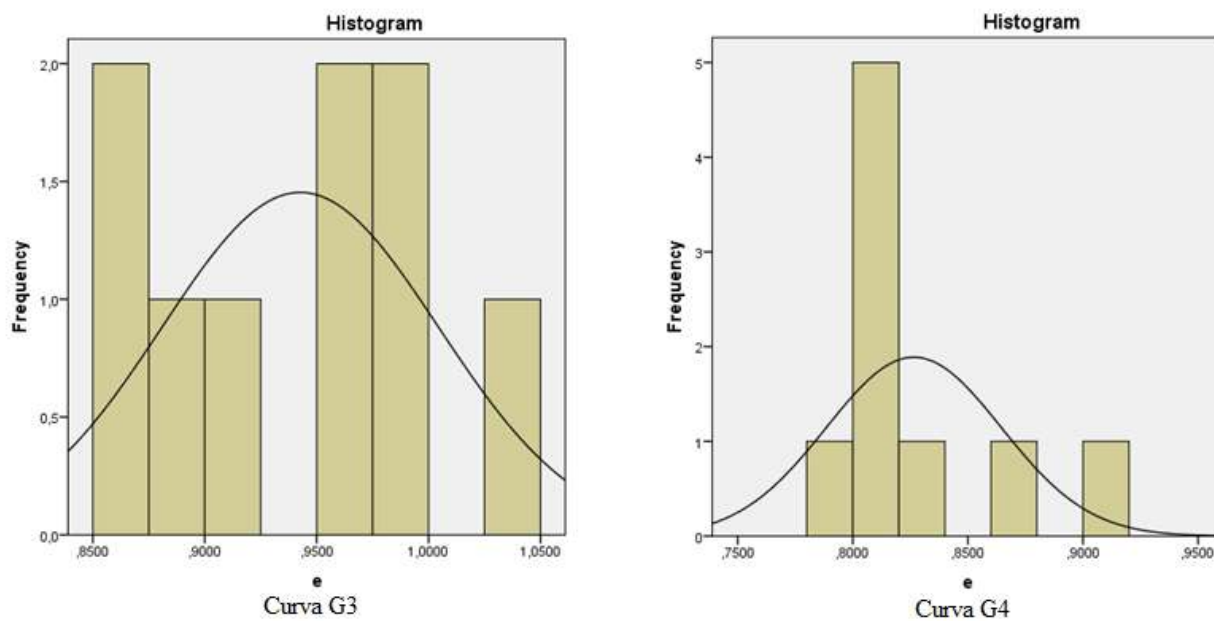
Figura 4.6 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G e G2



Fonte: AUTOR, (2020)

Nas curva G e G2 é visualmente possível verificar certa assimetria, mas não conclusiva ao formato de sino.

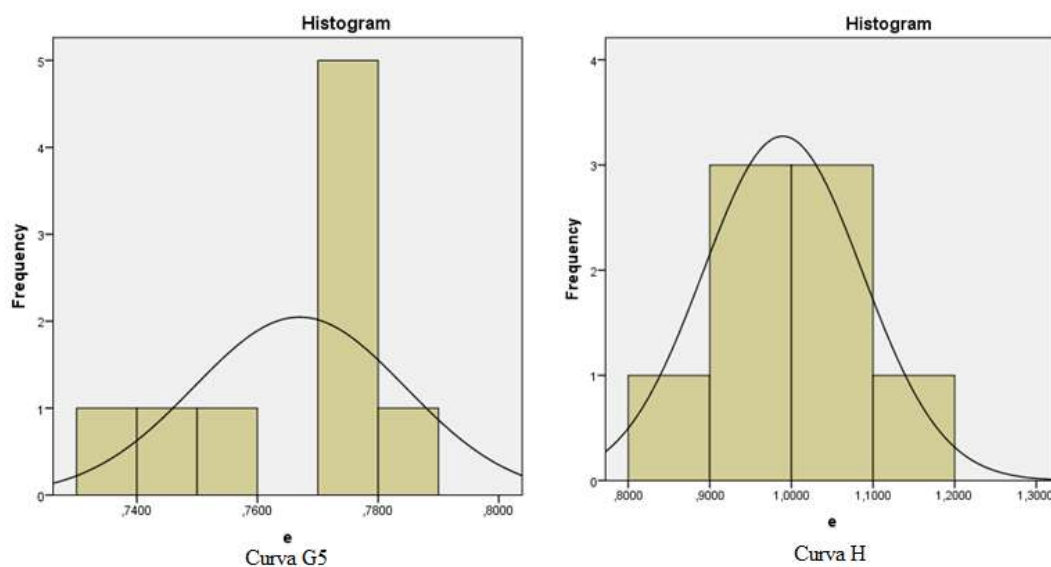
Figura 4.7 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G3 e G4



Fonte: AUTOR, (2020)

Na curva G3 é possível perceber uma leve assimetria embora na curva G4 a assimetria ficou inconclusiva.

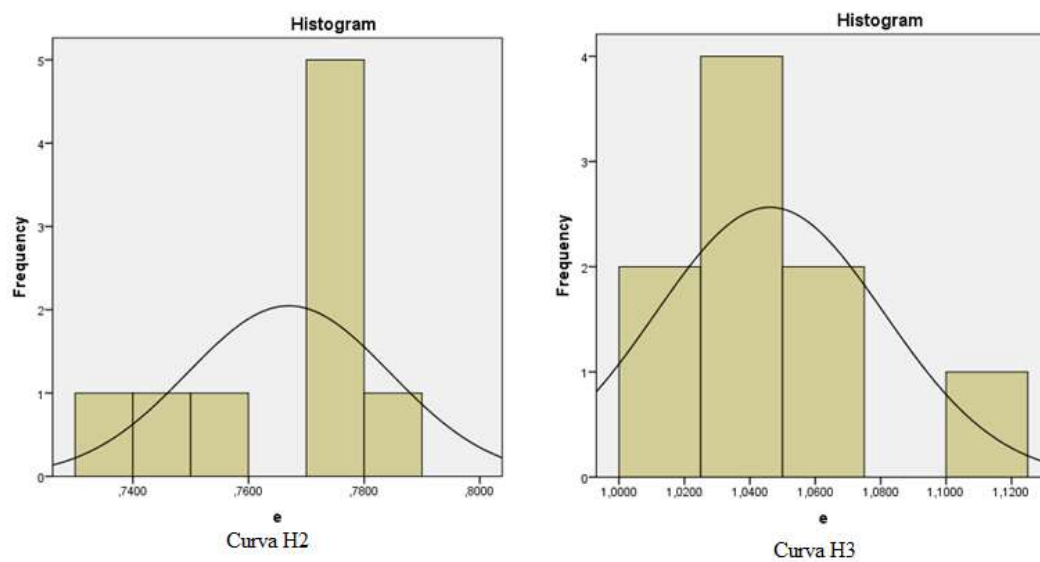
Figura 4.8 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas G5 e H



Fonte: AUTOR, (2020)

Na curva G5 é visualmente possível interpretar uma leve assimetria na curva H ficou evidente a assimetria.

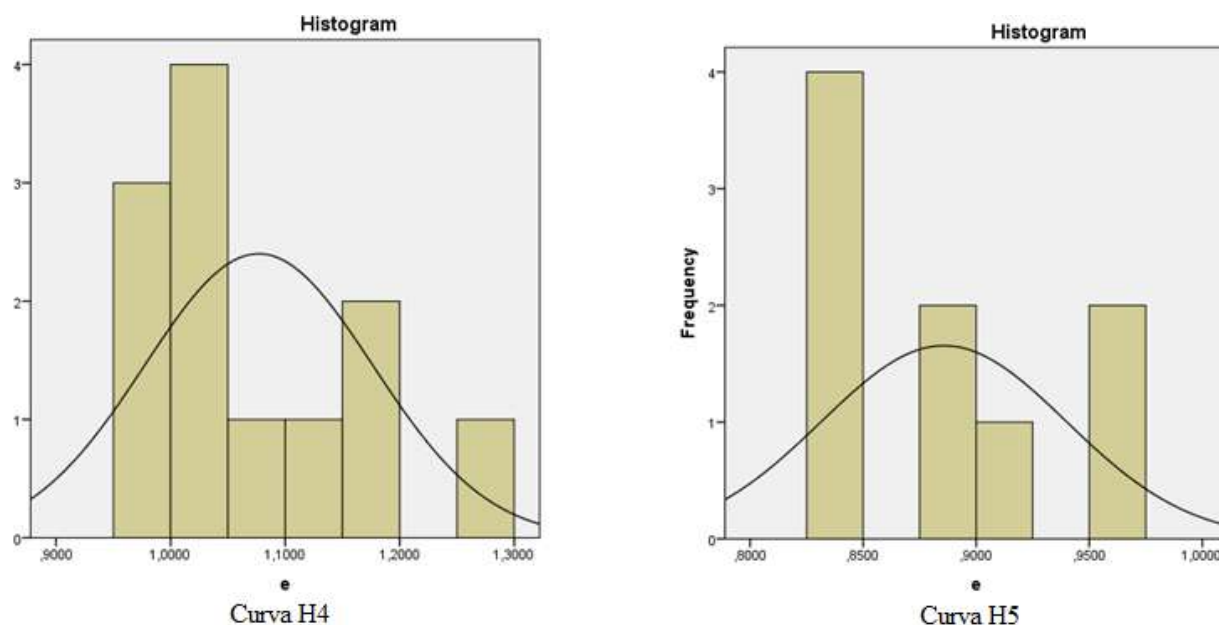
Figura 4.9 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas H2 e H3



Fonte: AUTOR, (2020)

Nas curvas H2 e H3 não foi possível verificar a assimetria em formato de sino.

Figura 4.10 - Histogramas de distribuição do índice de vazios nas curvas H4 e H5



Fonte: AUTOR, (2020)

Na curva H4 é possível verificar uma assimetria em formato de sino e H5 é possível visualizar uma assimetria.

Através dos histogramas elaborados é possível observar a média e o desvio padrão dos dados do índice de vazios de cada curva, possibilitando visualizar uma assimetria na distribuição dos dados em torno da média nas curvas (B, D, E, F2, F5, G3, H, H4 e H5) nota-se a proximidade a um gráfico simétrico, em forma de sino da distribuição Normal.

Entretanto apenas com a visualização desses histogramas não foi possível uma dedução concreta a respeito da Normalidade. O método gráfico tem a desvantagem de ser subjetivo, porque dependem de interpretação visual. Para um resultado mais objetivo, usou-se o teste não-paramétricos de aderência à distribuição Normal Kolmogorov-Smirnov.

4.3. TESTE K-S

A realização do teste de hipótese visa verificar se os dados da amostra de fato se ajustam com as hipóteses feitas, ou seja, se realmente a variação do índice de vazios nas curvas características estudadas se adequam a uma Distribuição Normal de Frequência. Para tanto, foi realizado o Teste Kolmogorov-Smirnov, através do SPSS.

No software o teste pode ser obtido em *Analyze -> Nonparametric Testes -> Legacy Dialogs -> 1-Sample KS*. Conforme exposto na figura 4.11.

Figura 4.11 - Exportação do SPSS para os testes de normalidade

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	Df	Sig.
e	,184	18	,111	,927	18	,170

Fonte: AUTOR, (2020)

Foi adotada significância (α) de 5%, ou seja, que os valores da hipótese de igualdade (H_0) fossem superiores a este para que a hipótese de distribuição normal fosse deferida. Ao lançar os dados de cada curva no programa SPSS, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados teste K-S

Kolmogorov-Smirnov				
CURVA	n	Nível de Significância (α)	H_0	Normalidade
A	16	0,05	0,012	Não se aplica
B	16	0,05	0,2	Se aplica
C	16	0,05	0,111	Se aplica
D	27	0,05	0,074	Se aplica
E	18	0,05	0,028	Não se aplica
F	14	0,05	0,2	Se aplica
F2	10	0,05	0,2	Se aplica
F3	9	0,05	0,148	Se aplica
F4	9	0,05	0,185	Se aplica
F5	9	0,05	0,2	Se aplica
G	9	0,05	0,2	Se aplica
G2	9	0,05	0,2	Se aplica
G3	9	0,05	0,2	Se aplica
G4	9	0,05	0,012	Não se aplica
G5	9	0,05	0,008	Não se aplica
H	8	0,05	0,2	Se aplica
H2	9	0,05	0,2	Se aplica
H3	9	0,05	0,2	Se aplica
H4	12	0,05	0,112	Se aplica
H5	9	0,05	0,123	Se aplica

Fonte: AUTOR, (2020).

No entanto, para Leech, et al. (2005), pode-se considerar as variáveis com normalidade aproximada aptas para testes paramétricos quando o coeficiente de assimetria (Skewness) constar entre -1 e 1. Para averiguar essa possibilidade foi feito o cálculo através do SPSS nos dados da curva que não atingiram a Normalidade pelo teste K-S e os valores alcançados estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Valores Skewness

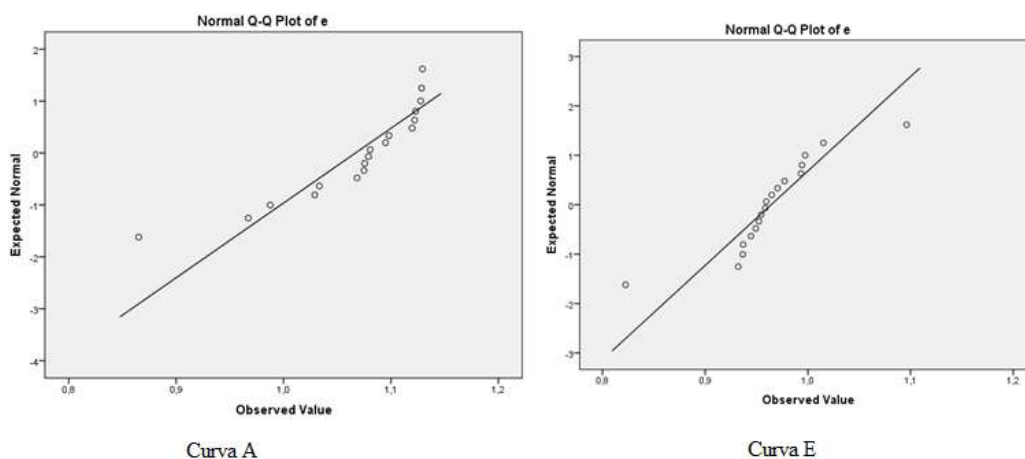
Curva	Skewness
A	-1,685
E	-0,191
G4	1,61
G5	-1,096

Fonte: AUTOR, (2020)

Com isso observou-se que apenas a curva E encontra-se dentro dessa hipótese e pode ser considerada com normalidade aproximada. Os demais dados não atingiram a hipótese de proximidade, para uma complementar análise das distribuições dos dados destas amostras, foram construídos os gráficos tipo Quantil-Quantil, ou Q-Q Plot com o intuito de avaliar de forma visual a normalidade de uma variável.

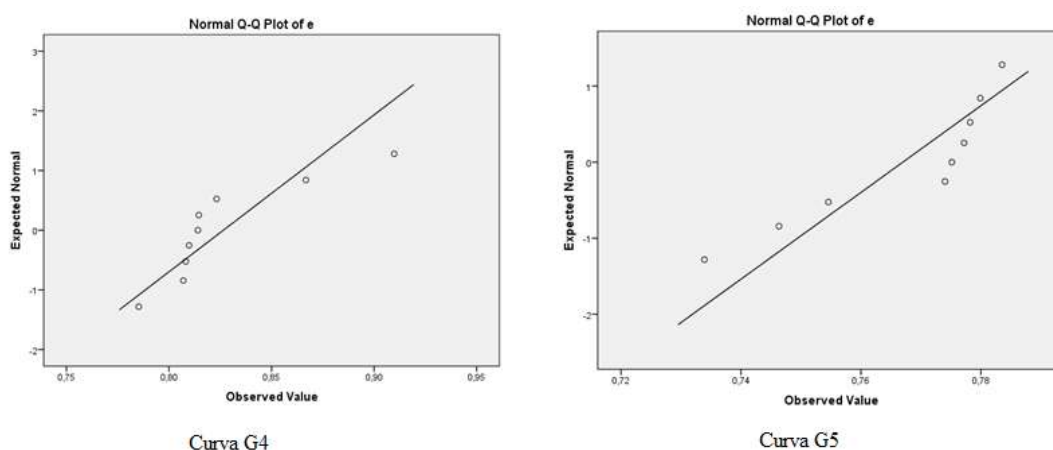
Neste gráfico, no eixo horizontal tem-se os valores observados da variável, e no eixo vertical, os valores esperados para a distribuição Normal. Se há uma boa aderência dos dados à distribuição Normal os pontos estão próximos a reta de referência apresentada no gráfico (TORNAN et. al 2012). No SPSS, encontra-se o Q-Q Plot marcando *Normality Plots with Tests*, na mesma janela onde solicitou-se o Histograma anteriormente. Nas figuras 4.12 e 4.13 foram construídos os gráficos para os dados das curvas que não apresentaram distribuição normal.

Figura 4.12 - Gráficos Q-Q Plot Curvas A e E



Fonte: AUTOR, (2020)

Figura 4.13 - Gráficos Q-Q Plot Curvas G4 e G5

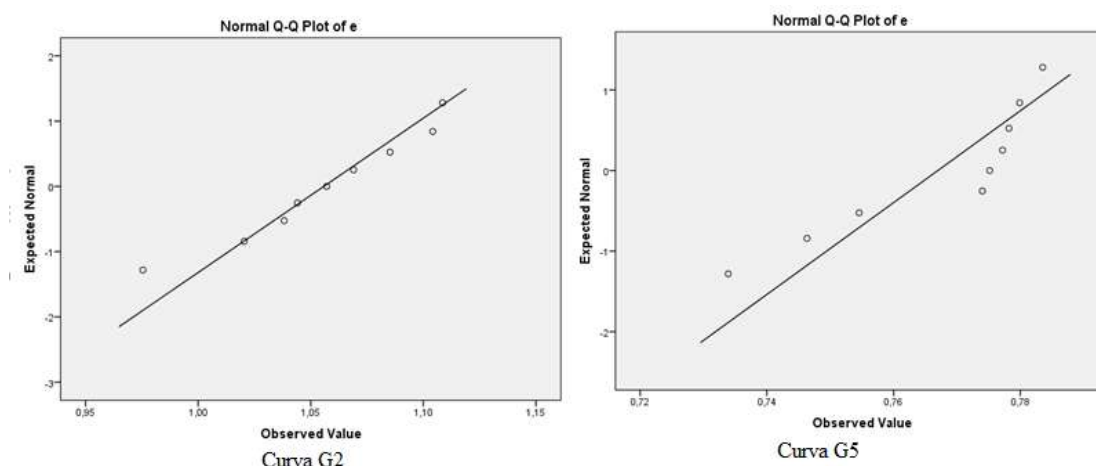


Fonte: AUTOR, (2020).

Verifica-se que há um afastamento da reta, nos dados da curva A, G3 e G4. Entretanto nos dados da Curva E percebe-se que há uma concordância e proximidade da reta. Na Figura 4.14, tem-se dois exemplos de Q-Q Plots provenientes de amostras de dados classificados como distribuição Normal (curva G2), e novamente dos dados da curva G5 que não atendeu a Normalidade.

Nota-se que os pontos da variável G2 aproximam-se bem da reta como característica da distribuição Normal, mas há uma grande dispersão para os dados da curva G5 que não atenderam a normalidade pelo teste KS.

Figura 4.14 - Demonstração de diferentes Q-Q Plots



Fonte: AUTOR, (2020)

Para os dados que não atingiram hipótese de Normalidade realizou-se a transformação Box-Cox, com uso do software de estatística Sistema *Actio* que identificou o melhor (λ) para a transformação, seguindo os passos no menu *Action Stat* - > Estatística Básica -> Transformação de Dados -> Opções -> Transformação de Box-Cox. Finalizado o processo, os resultados adquiridos foram armazenados e organizados de acordo com a Tabela 12.

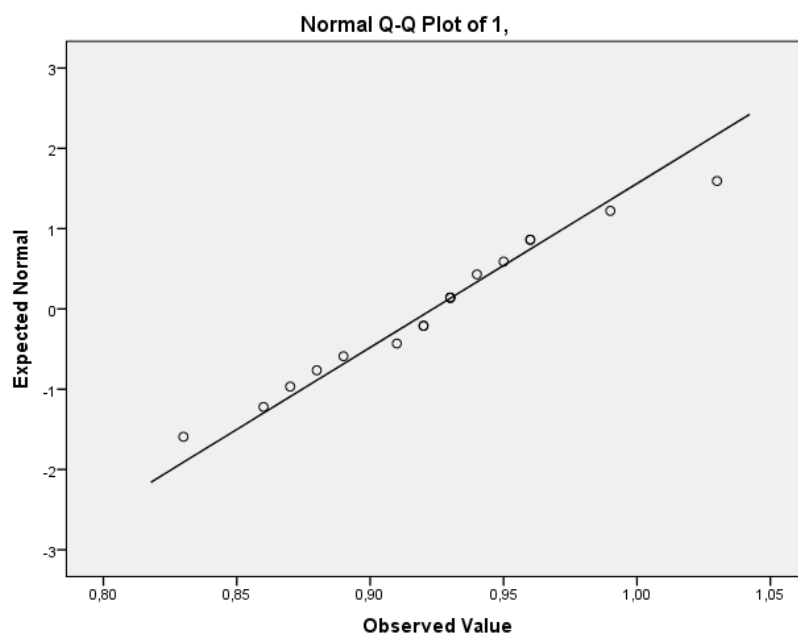
Tabela 12 - Transformação Box-Cox

Curva A e (ajustado)	Curva G4 e (ajustado)	Curva G5 e (ajustado)
0,8652	0,8	0,78
0,9672	0,81	0,75
0,9876	0,79	0,74
1,0291	0,81	0,78
1,0334	0,81	0,75
1,0684	0,82	0,76
1,0749	0,85	0,78
1,0755	0,87	0,77
1,0791	0,81	0,77
1,0807		
1,0949		
1,0981		
1,1197		
1,122		
1,1276		
1,123		

Fonte: AUTOR, (2020)

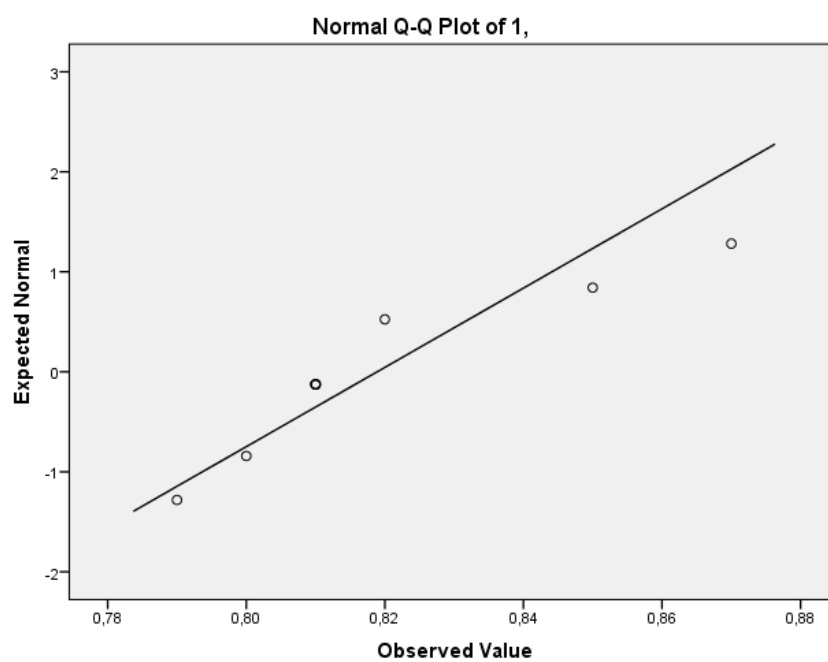
Pelos Gráficos QQ-plot apresentados na figura 4.15 a 4.17, visualiza-se que os pontos se situam bem mais próximos da reta para as variáveis.

Figura 4.15 - Gráfico Q-Q Plots Curva A (ajustado)



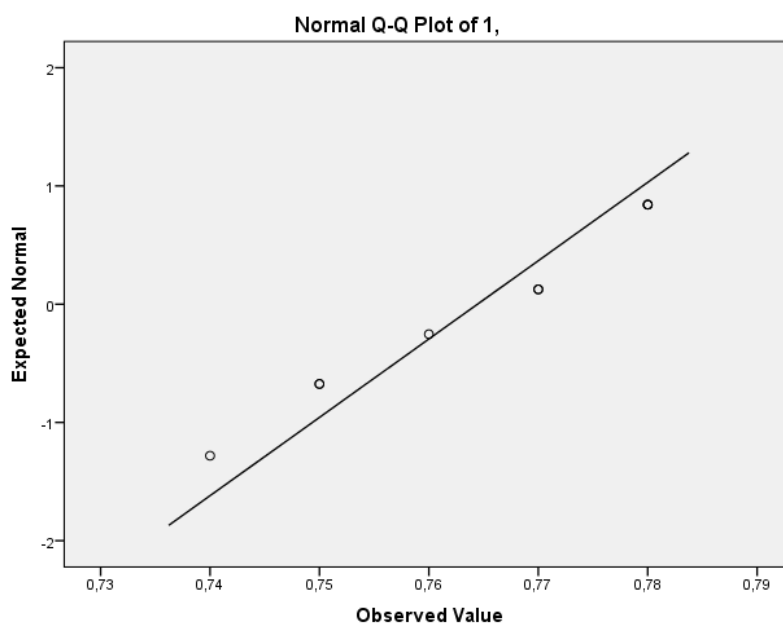
Fonte: AUTOR, (2020)

Figura 4.16 - Gráfico Q-Q Plots Curva G4 (ajustado)



Fonte: AUTOR, (2020)

Figura 4.17 - Gráfico Q-Q Plots Curva G5 (ajustado)



Fonte: AUTOR, (2020)

Novamente os valores foram inseridos no SPSS para verificação se estão assim atendendo a normalidade, os dados transformados testaram positivo a Normalidade conforme o testes K-S (Tabela 13), com isso é possível dar continuidade ao estudo.

Tabela 13 - Resultados teste K-S após Transformação

Kolmogorov-Smirnov				
CURVA	n	Nível de	H₀	Normalidade
		Significância (α)		
A	16	0,05	0,14	Se aplica
G4	9	0,05	0,16	Se aplica
G5	9	0,05	0,2	Se aplica

Fonte: AUTOR, (2020)

4.4.CURVAS CARACTERISTICAS PONTO A PONTO

Como uma das aplicações dos resultados, foi feita a construção de um intervalo de confiança baseado em amostragem por conjuntos ordenados. Deste modo, intervalos de confiança para a média dos índices de vazios de cada curva foram determinados e estão apresentados na Tabela 14. Ressaltando que foram utilizados os

dados já transformados para os conjuntos de dados que inicialmente não apresentaram Normalidade, com os dados dessas curvas já transformados foram realizados o cálculo dos limites.

Tabela 14 - Intervalos de confiança para a média

Curva	Lim. Inf.	Lim. Sup.
A	0,94	1,01
B	0,9	0,95
C	0,8	0,86
D	0,83	0,86
E	0,93	0,98
F	1,22	1,27
F2	1,09	1,13
F3	0,94	0,97
F4	0,76	0,8
F5	0,65	0,69
G	1,01	1,06
G2	0,92	0,99
G3	0,9	0,98
G4	0,74	0,76
G5	0,75	0,78
H	1,12	1,17
H2	1,03	1,08
H3	1,02	1,07
H4	1,02	1,13
H5	0,85	0,92

Fonte: AUTOR, (2020).

Estes intervalos foram determinados utilizando a equação (7).

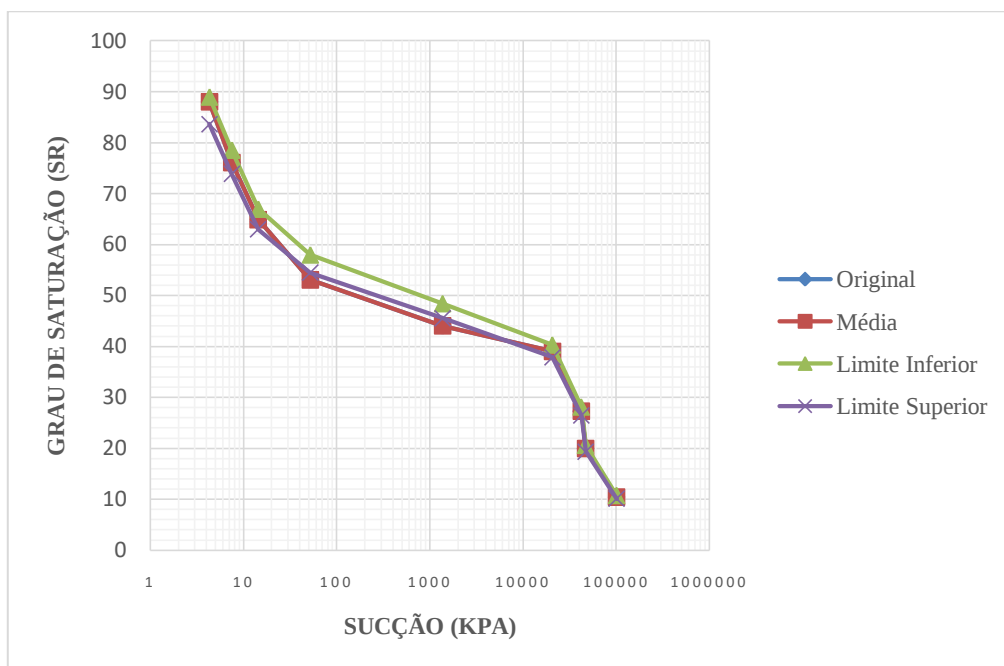
$$\bar{X} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7).$$

Onde, $\bar{X}$ é a média, s é o desvio padrão, n é o tamanho da amostra e t é a distribuição de Student.

Para calcular o valor de “t” é necessário saber qual o nível de confiança desejado (α) e o número de graus de liberdade a ser utilizado (n-1) (QUEIROZ,2010). Os intervalos apresentados na Tabela 11 possuem nível de confiança de 95%.

De posse desses dados, foram gerados os gráficos das curvas características originais e utilizando os valores médios, mínimos e máximos do intervalo. Estes gráficos estão apresentados nas Figuras 4.18 a 4.37.

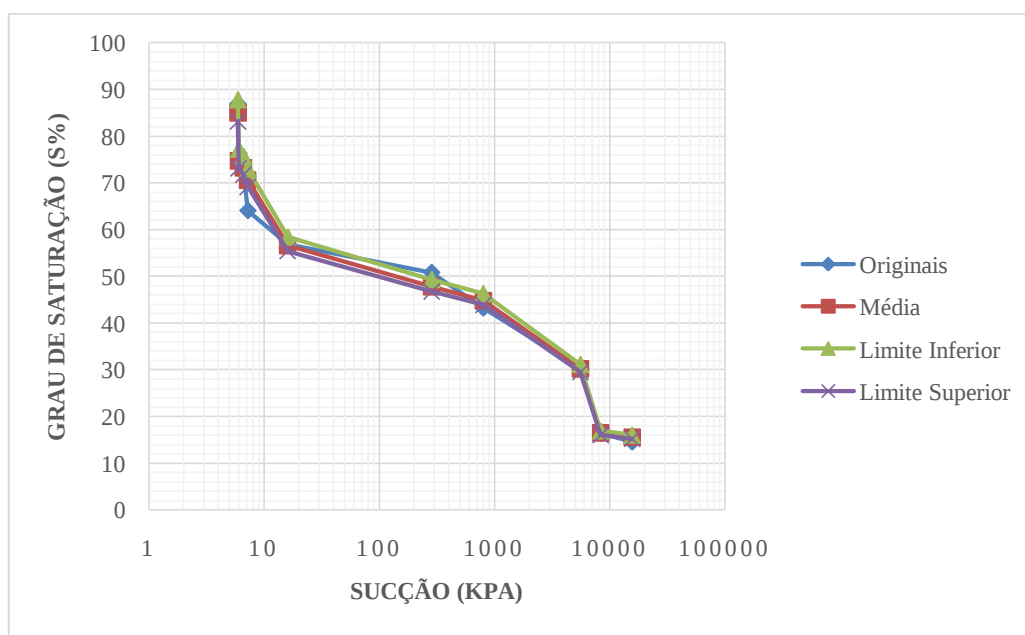
Figura 4.18 - Gráfico das curvas A



Fonte: AUTOR, (2020)

No gráfico é perceptível que a curva do Limite inferior se destacou das demais curvas.

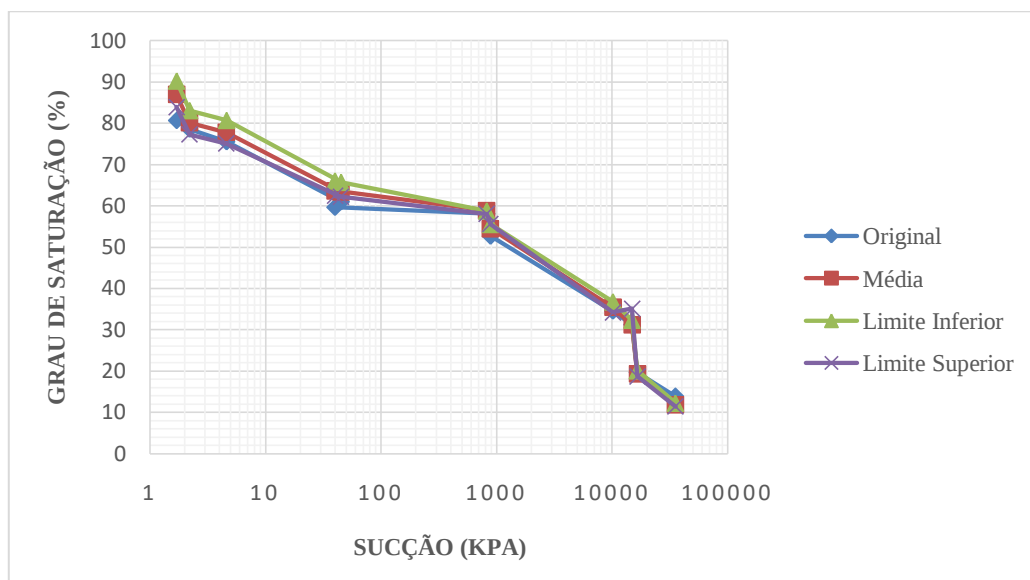
Figura 4.19 - Gráfico das curvas B



Fonte: AUTOR, (2020)

Através do gráfico é possível visualizar uma grande concordância em todas as curvas.

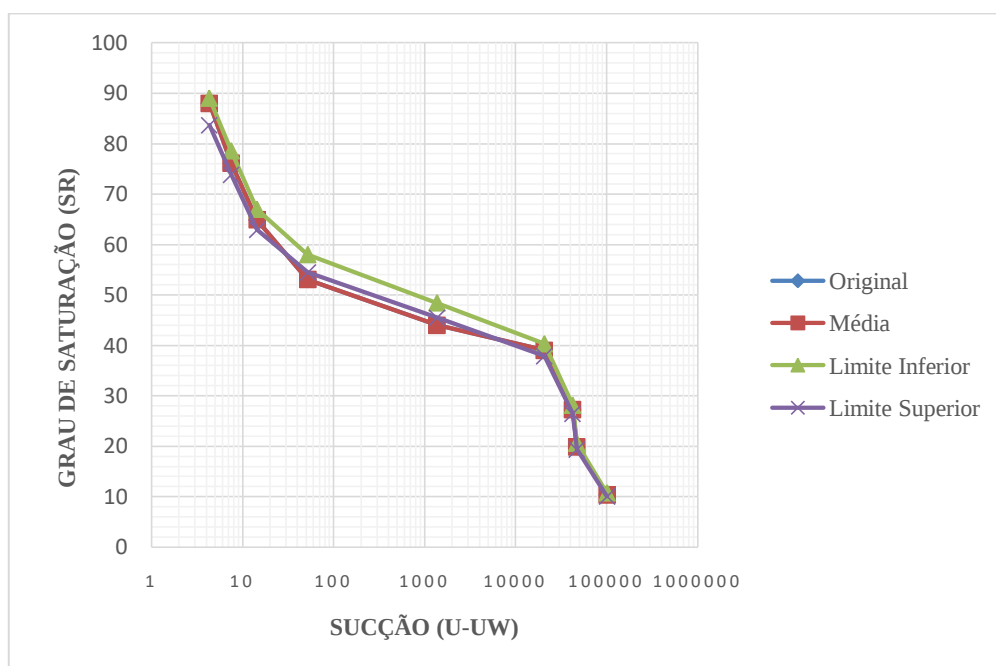
Figura 4.20 - Gráfico das curvas C



Fonte: AUTOR, (2020)

No gráfico das curvas C é possível verificar uma mudança intransigente a partir da metade da curva.

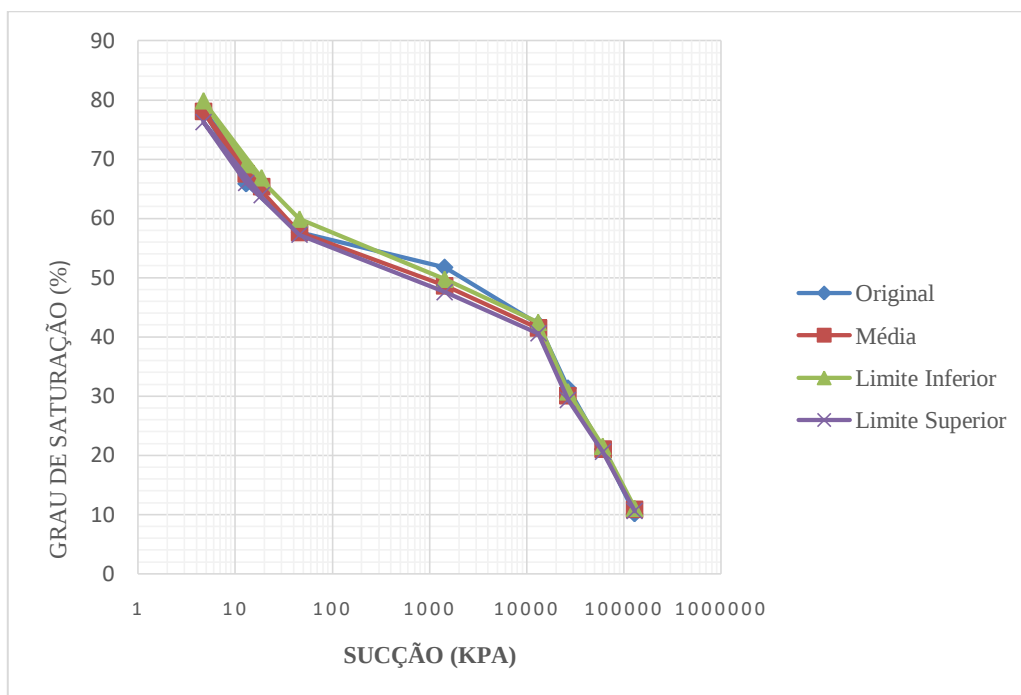
Figura 4.21 - Gráfico das curvas D



Fonte: AUTOR, (2020)

Pelo gráfico da curva D é visualmente notável que a curva do limite inferior discorda um pouco das demais, enquanto as outras estão bem próximas.

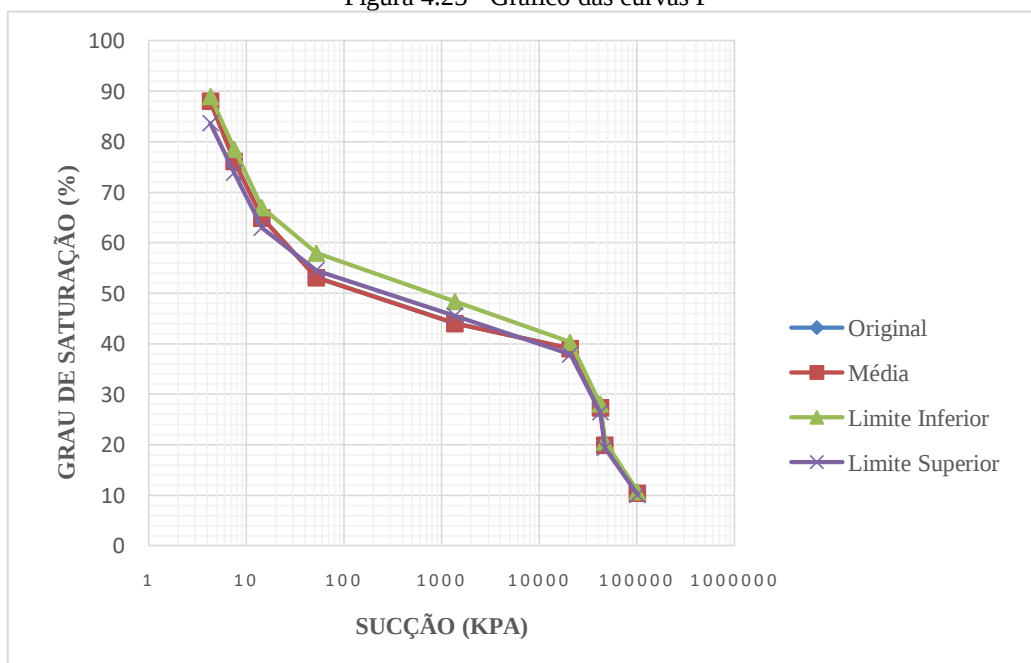
Figura 4.22 - Gráfico das curvas E



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas E apresentou boa concordância entre as curvas.

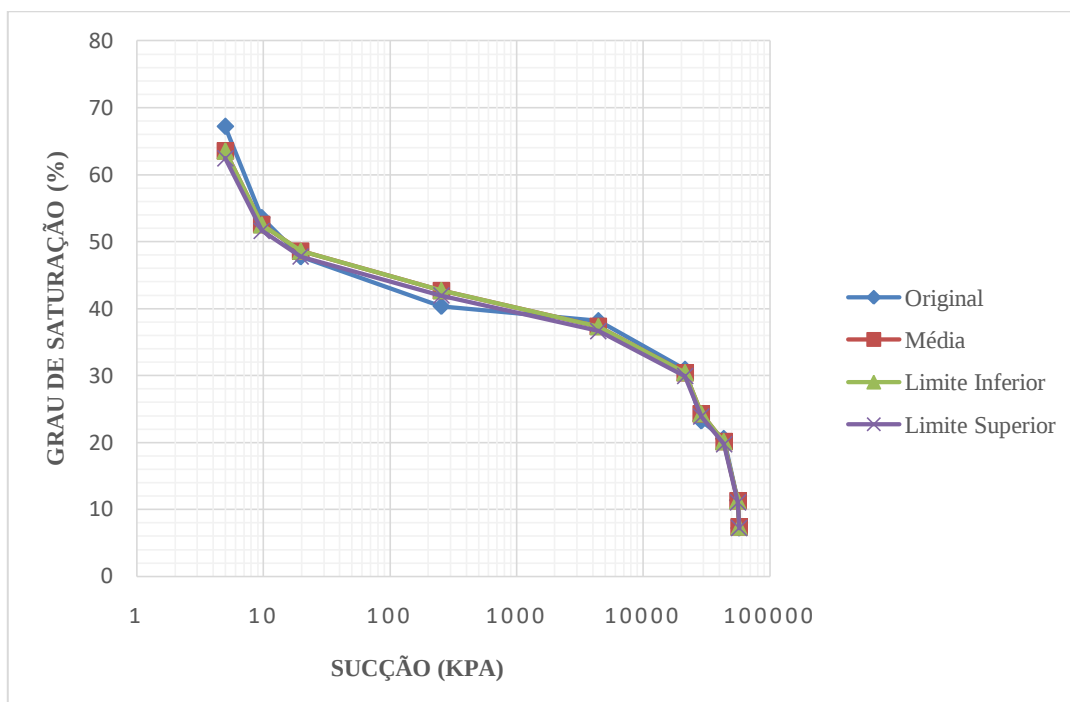
Figura 4.23 - Gráfico das curvas F



Fonte: AUTOR, (2020)

Pelo gráfico da curva F é visualmente notável que a curva do limite inferior discorda um pouco das demais, enquanto as outras estão bem próximas.

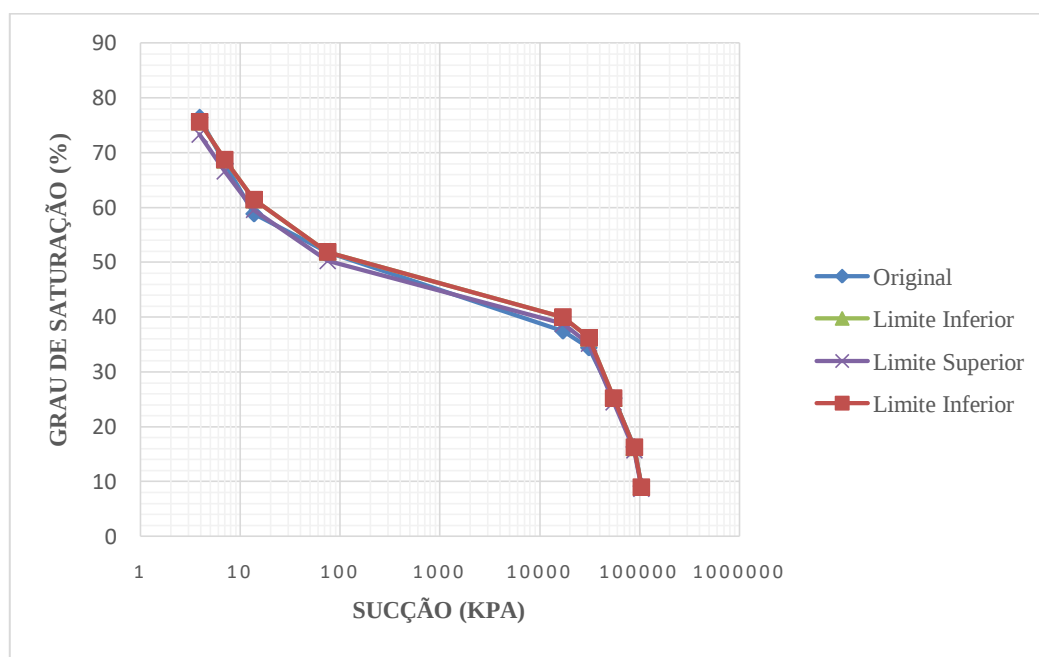
Figura 4.24 - Gráfico das curvas F2



Fonte: AUTOR, (2020).

O gráfico das curvas F2 apresentou bastante concordância entre elas.

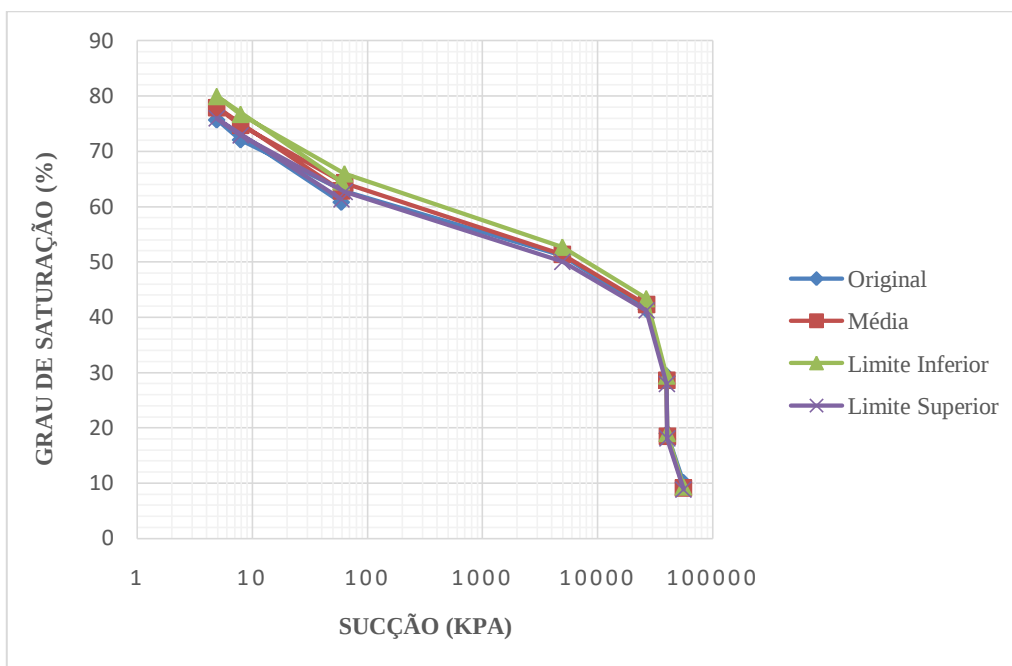
Figura 4.25 - Gráfico das curvas F3



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas F3 apresentou bastante concordância entre elas.

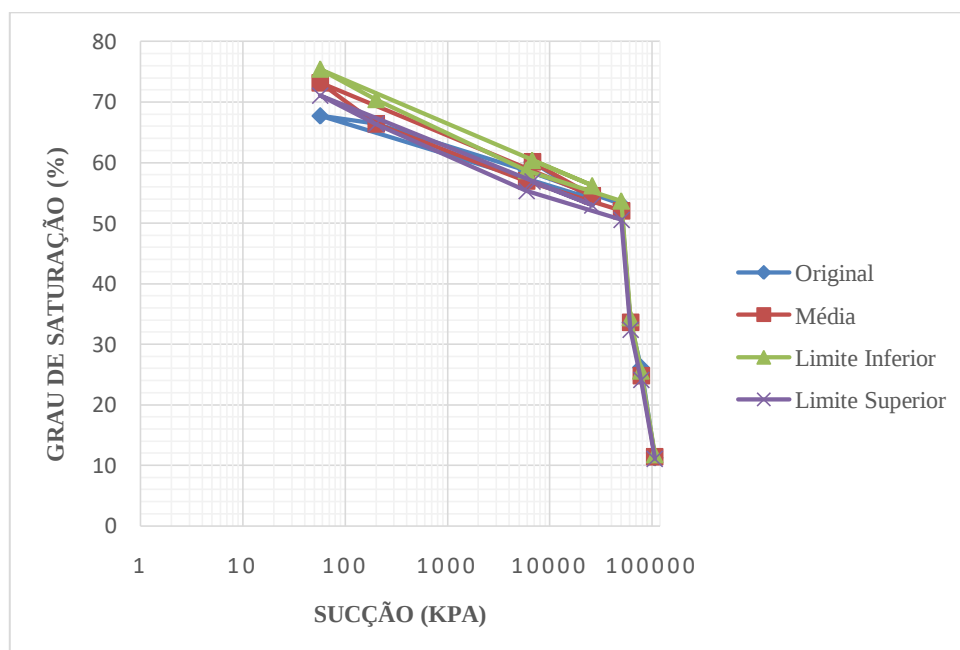
Figura 4.26 - Gráfico das curvas F4



Fonte: AUTOR, (2020)

No gráfico das curvas F4 é possível verificar uma mudança intransigente a partir da metade da curva.

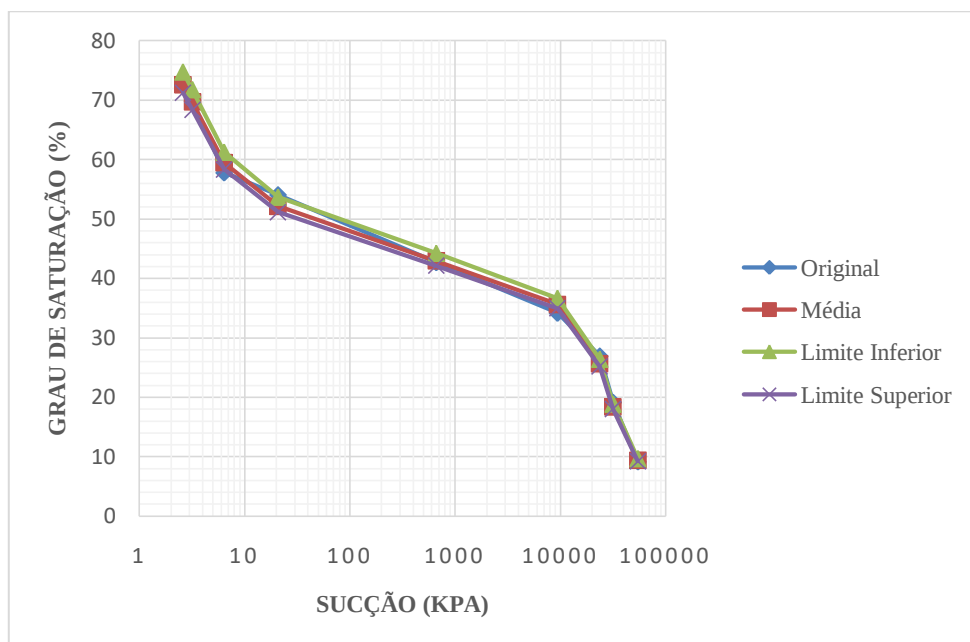
Figura 4.27 - Gráfico das curvas F5



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas F3 apresentou bastante conciliação a entre elas, e um formato diferente dos demais gráficos apresentados até o momento.

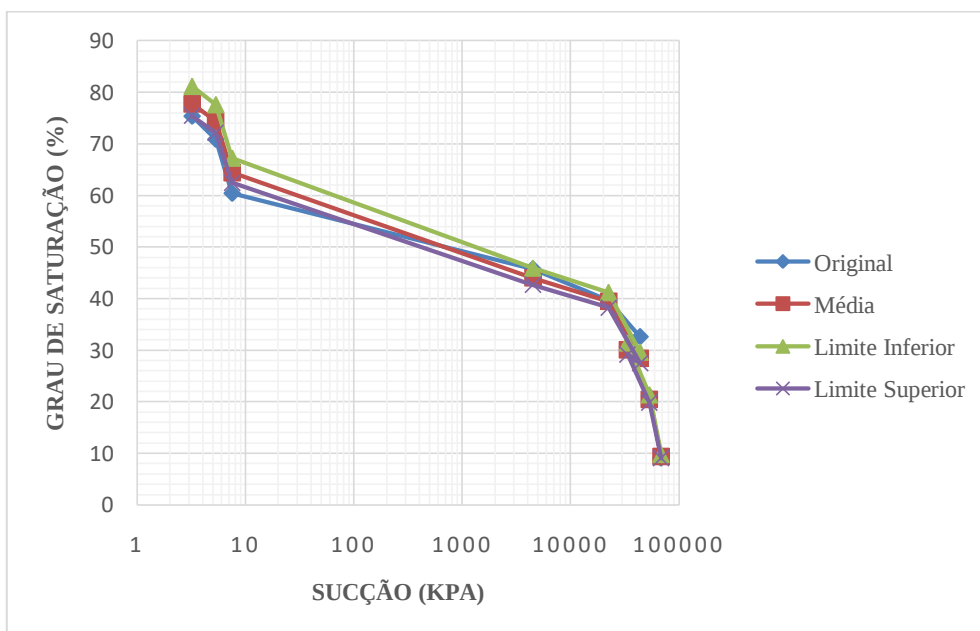
Figura 4.28 - Gráfico das curvas G



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas G apresentou bastante concordância entre elas.

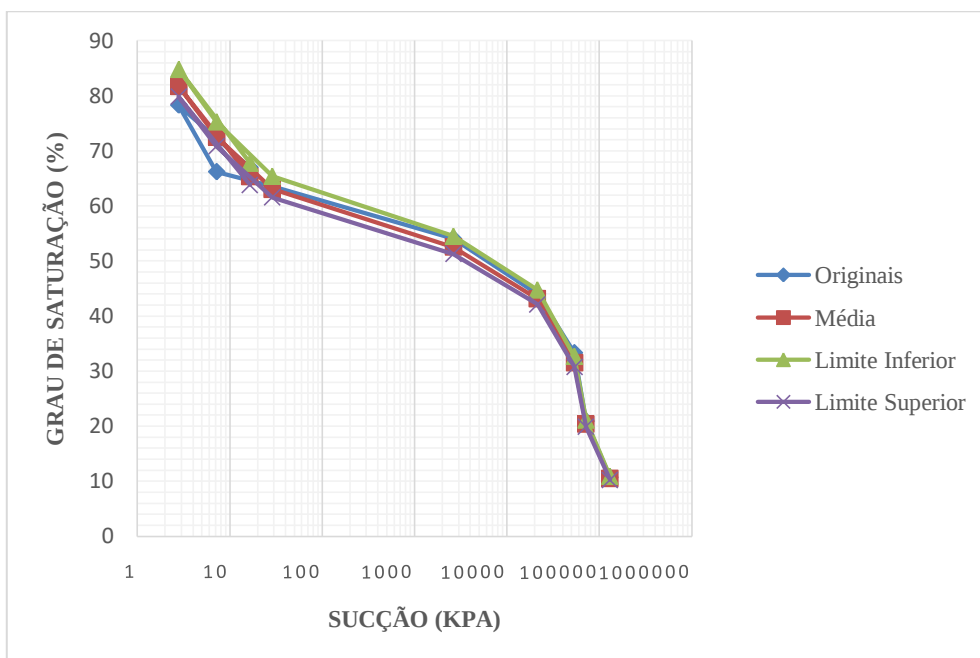
Figura 4.29 - Gráfico das curvas G2



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas G2 apresentou bastante conciliação entre elas, exceto na curva do Limite Superior que começou a apresentar diferença a partir do ponto 60 e retornou a conciliar a partir do ponto 40.

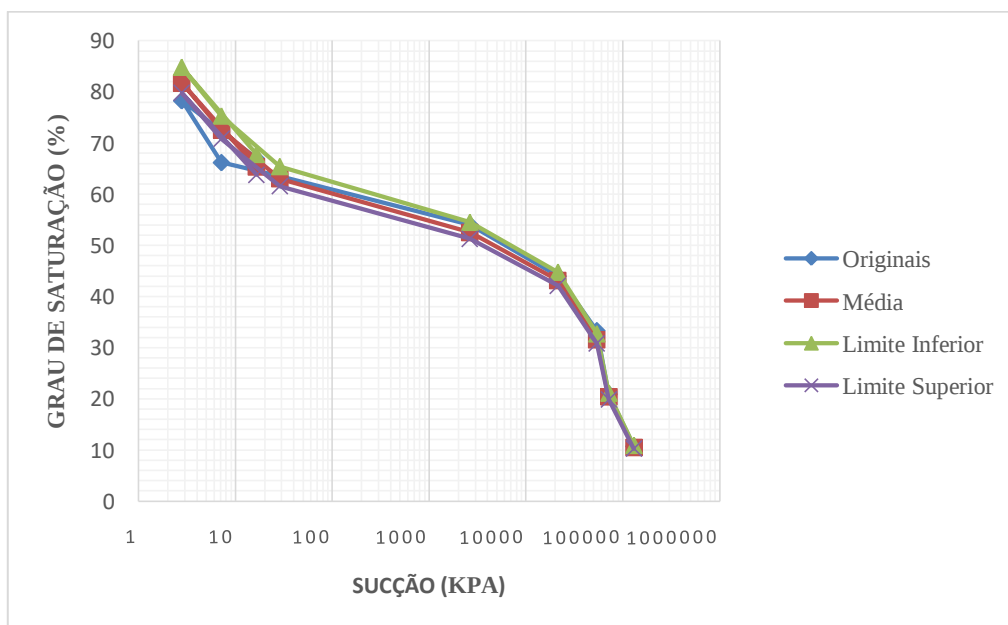
Figura 4.30 - Gráfico das curvas G3



Fonte: AUTOR, (2020)

No gráfico das curvas G3 é possível notar uma dispersão da curva original entre os pontos 60 e 70.

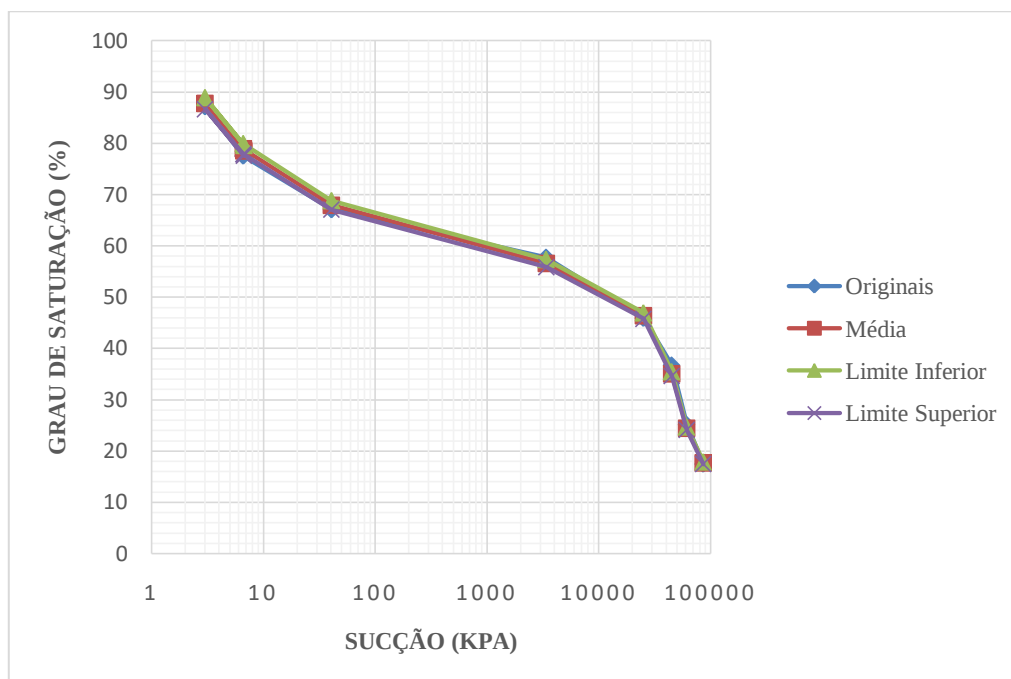
Figura 4.31 - Gráfico das curvas G4



Fonte: AUTOR, (2020)

No gráfico das curvas G4 é possível notar uma dispersão da curva original entre os pontos 80 até o 65.

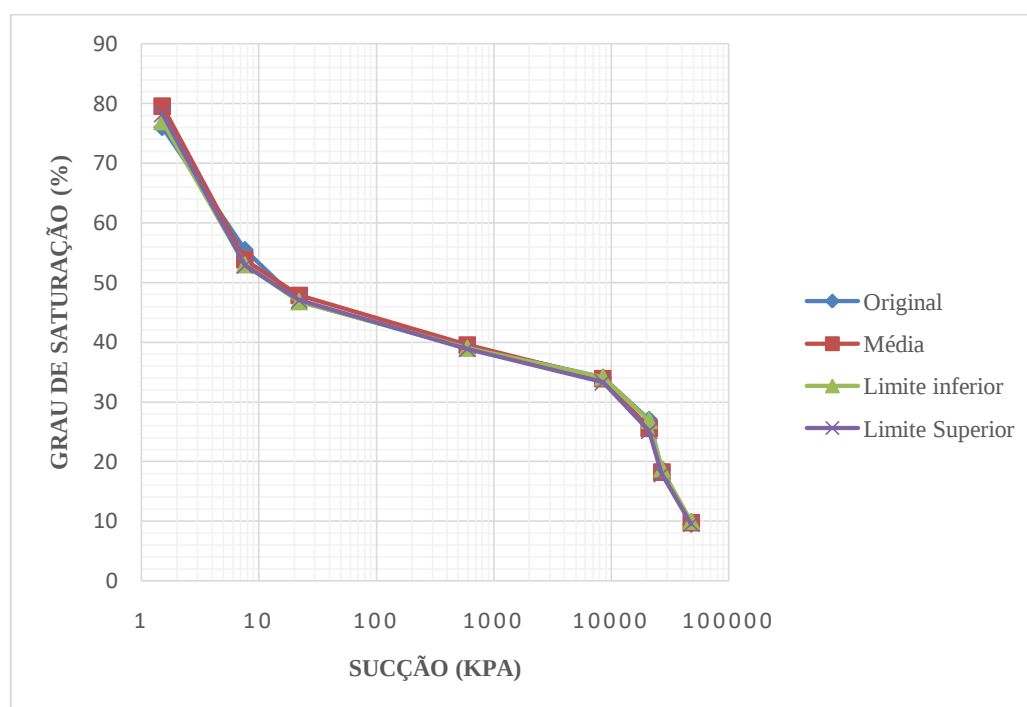
Figura 4.32 - Gráfico das curvas G5



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas G5 apresentou bastante concordância entre elas.

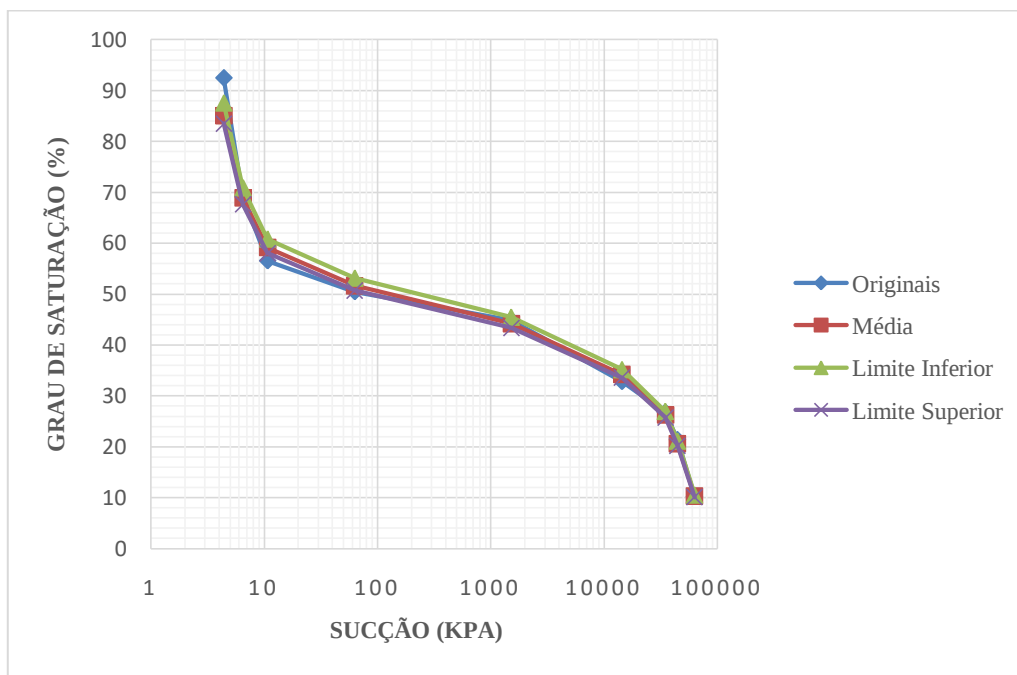
Figura 4.33 - Gráfico das curvas H



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas H apresentou bastante concordância entre as curvas.

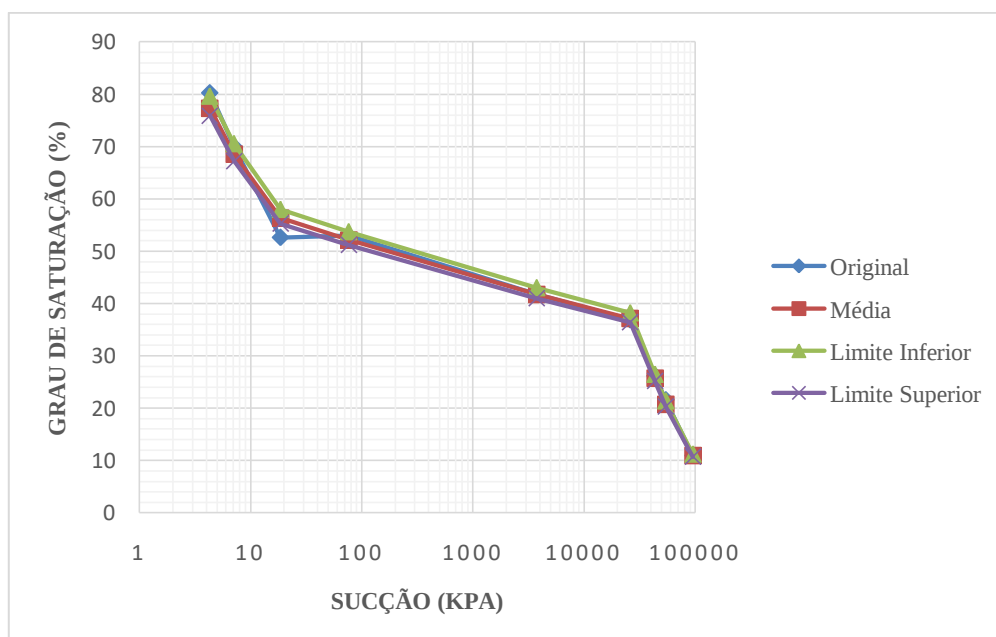
Figura 4.34 - Gráfico das curvas H2



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas H2 apresentou bastante concordância entre as curvas.

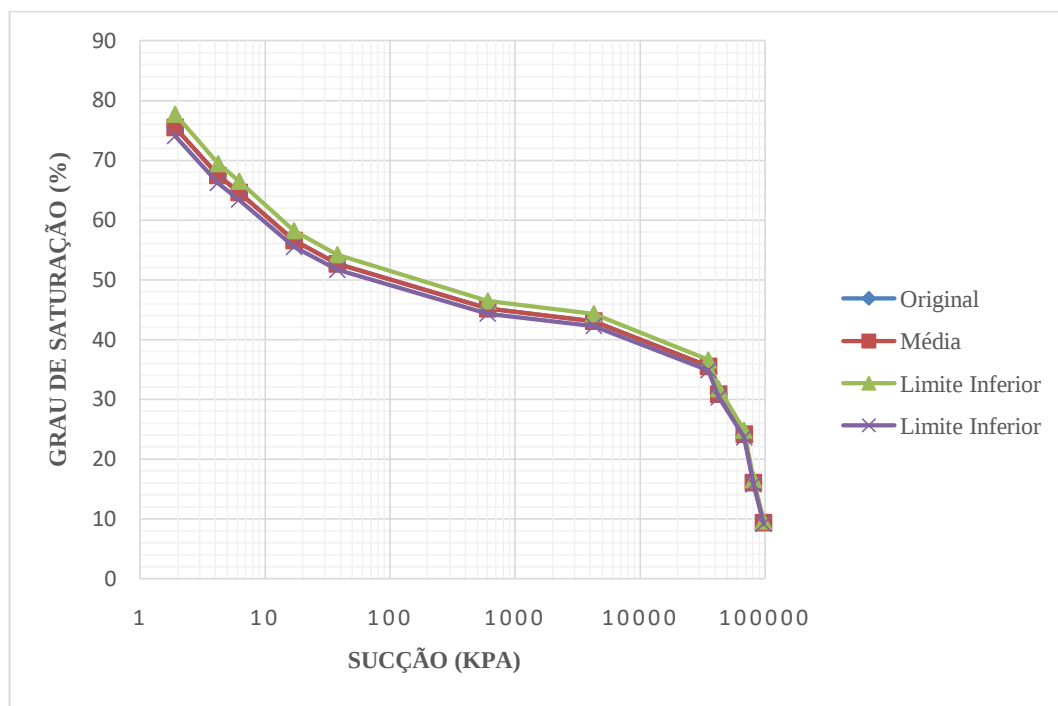
Figura 4.35 - Gráfico das curvas H3



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas H3 apresentou bastante concordância entre as curvas exceto na curva de limite original no ponto 50.

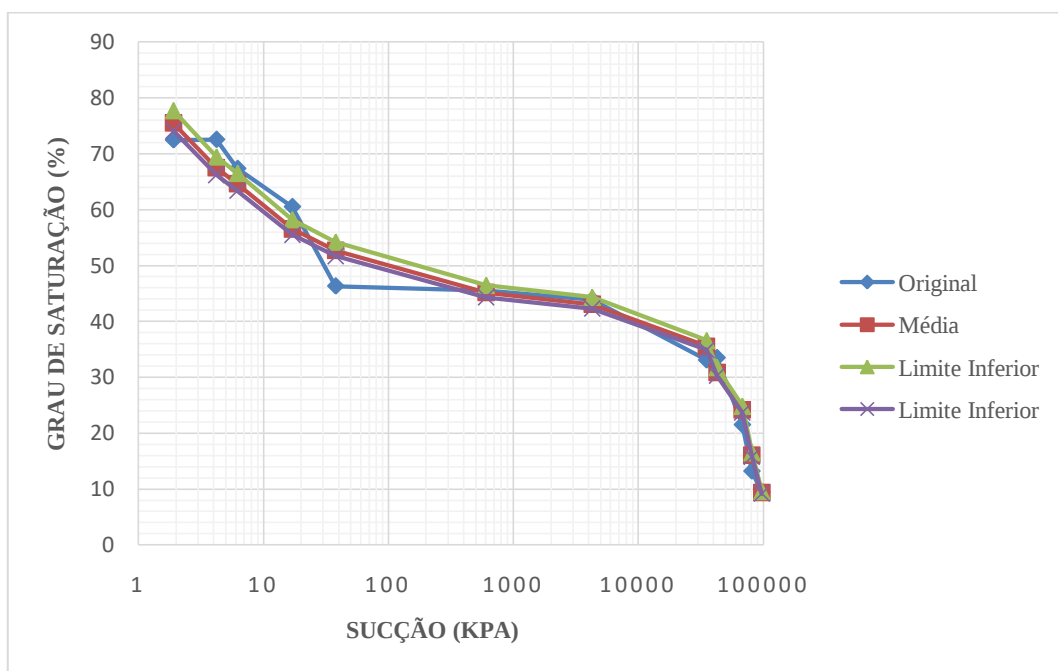
Figura 4.36 - Gráfico das curvas H4



Fonte: AUTOR, (2020)

O gráfico das curvas H4 apresentou bastante concordância entre as curvas.

Figura 4.37 - Gráfico das curvas H5



Fonte: AUTOR, (2020)

Através do gráfico das curvas H5 é notório bastante dispersão da curva original em vários pontos, entretanto houve concordância das demais curvas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo estatístico descritivo, a análise de variância, o teste Kolmogorov-Smirnov, o limite de confiança da média conferiu um aspecto de confiabilidade chegando a ser adotado um nível de confiança de 95% de certeza, de acordo com Paiva (2009) um valor muito bom para análise da variabilidade dos dados em geotecnia.

Todos os coeficientes de variação (CV) dos índices de vazios das curvas utilizadas apresentaram-se dentro de uma faixa aceitável (<9). Onde o menor valor foi da curva G (3,323) e o maior da curva H4 (9,259).

Nos testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov através da Tabela 10, constatou-se que em 4 conjuntos de dados foram rejeitadas a hipótese de Normalidade. Onde os dados da curva E se encaixaram dentro da Normalidade aproximada conforme Tabela 11, embora os outros 3 conjuntos de dados (curva A, G4 e G5) precisaram ser submetidos a transformação Box-Cox (Tabela 13) e assim novamente foram sucedidos ao teste K-S onde alcançaram a Normalidade e apresentaram um bom ajuste.

A diferença na distribuição destes 15% dos dados das curvas pode ser justificada pelas diferenças no nível e à forma da variabilidade do solo nas áreas estudadas (SOUZA et al.,1997). Mesmo em uma área de solo homogêneo, a medida de uma propriedade em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente na superfície. (BURGESS et al., 1980). Os dados utilizados nessa pesquisa passaram pelo processo de compactação o que pode gerar heterogeneidade nos corpos de provas, outra hipótese é que pode ter ocorrido algum erro na determinação do peso específico e consequentemente gerou valores incorretos no índice de vazios que destoaram dentro dos dados da curva que na verdade poderiam estar dentro da Normalidade.

É comum o tratamento de dados obtidos em ensaios por meio de conceitos da estatística clássica (Normalidade, média e desvio padrão), sendo assim, recomenda-se que testes de Normalidade sejam sempre efetuados pois tendo este conhecimento, existe a possibilidade de se escolher a maneira mais adequada para o tratamento estatístico dos dados (LOPES et al.,2013). A não comprovação dessa suposição pode acarretarem resultados e conclusões incorretas. A verificação da Normalidade permite então uma análise mais ampla dos dados e a possibilidade de examinar supostos erros, no caso de os dados não atingirem a Normalidade é possível realizar uma investigação se ocorreu por conta de alguma variabilidade do solo, ou se essa discrepância foi advinda de algum

equivoco nos ensaios ou na acoplação dos dados. A transformação matemática dos valores que não se enquadraram na Normalidades permite a correção desses supostos equivocados, entretanto devem ser devidamente investigados se cabem na prática. No caso dos dados das curvas deste trabalho que não atingiram a Normalidade, os valores transformados para satisfazerem o teste K-S não apresentaram mudança muito descomunais.

A normalidade do conjunto de dados do índice de vazio do solo possibilita, um melhor ajuste a curva característica, além da proporcionalidade em que a média e a variabilidade dos dados são constantes na área estudada. Assim, torna-se possível, através da análise exploratória dos dados admitir, em princípio, que os dados estão suficientemente simétricos.

Os valores obtidos para os limites inferior e superior da faixa apresentaram diferença de valores baixos (Tabela 14), estas distribuições não acarretaram mudança nas curvas de acordo com imagens dos gráficos (4.20 a 4.39)

De acordo com Queiroz (2010), e com fundamento nos resultados obtidos e nas análises realizadas, conclui-se que em amostras que apresentem baixa variabilidade do índice de vazios a curva característica poderia ser única e utilizar tanto valores constantes como variáveis para esse parâmetro. Entretanto, em solos com maior coeficiente de variação seria indicada a construção de uma faixa característica, e não de uma única curva.

5.1.SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões à continuidade deste projeto, propõe-se a realização de estudo semelhante para diferentes tipos de solo como silte e areia com objetivo de verificar ao máximo as variações, e o nível de variação de cada um deles. Analisar microscopicamente a provável quebra e separação das partículas de argila que ocorre durante o ciclo de secagem-umedecimento das curvas características, bem como o aspecto das amostras submetidas ao ciclo de umedecimento-secagem.

A realização de análise visando interpretar as variações do grau de saturação e do índice de vazios que podem afetar diretamente a curva característica e sua diferença de representação em apenas uma curva e assumindo o modelo tridimensional grau de saturação x sucção mátrica x índice de vazios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, C. R. **Comportamento hidráulico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia** – GO 01/02. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 143p. 2010.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society, Edinburgh**, Vol. 26, Issue 2, pp. 211-252, 1964.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I - The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Madison, v.31, n.2, p.315-31, 1980.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. **Modelo de normalização da curva característica**. 32º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, 1:96-106. 2000.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & MORTARI, D. **Caracterização geotécnica de solos porosos do Distrito Federal**. 3º Simpósio Brasileiro de Escavações Subterrâneas, ABMS/ABGE/CBT/CNPq/UnB, Brasília, DF, pp. 109-122. 1994.

CICHOTA, R. & JONG van LIER, Q. **Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo**. R. Bras. Ci. Solo, 28:585-596, 2004.

DRAPER, N. R.; COX, D. R. On distributions and their transformation to normality. **Journal of the Royal Statistical Society**, Edinburgh, Vol. 31, pp. 472-476, 1969.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. 2003.148f.Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.2003.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. JohnWiley& Sons, New York, United Sates of America, p.517, 1993.

FREDLUND , D.G. & Xing, A. **Equations** for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 31(3): 521-532,1994.

FONSECA, J.S.; MARTINS, G. DE A. **Curso de estatística**, 6ª Ed., São Paulo: Atlas, 317p. 2006.

GALLIPOLI, D.G.; WHEELER, S.J.; KARSTUNEN, M. **Modeling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil**. *Géotechnique*, v.53 n.1, p. 105-112, 2003.

GERSCOVICH, D.M.S. **Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros**. In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT01, Porto Alegre, Anais....., v. 1, p. 76-92, 2001.

GUIMARÃES, R.C. **Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-091A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 183,2002.

LEECH, N. L.; BARRET, K. C.; MORGAN, G. A. **SPSS for intermediate statistics: use and interpretation**. 2005.

LOPES, M. B. L.**Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, p.175, 2006.

LOPES, M. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **TRANSPORTES** v. 21, n. 1,p. 59–66. 2013

MARINHO, F.A.M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção**. Encontro sobre Solos Não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 112-125. 1995.

MARINHO, F. A. M. **Medição de Sucção em Solos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., Rio de Janeiro, 1997, Anais... pp. 373- 398. Rio de Janeiro: Ed. Freitas Bastos. 1997

MARINHO, F. A. M. **Nature of Soil–Water Characteristic Curve for Plastic Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(5), 654–661. doi:10.1061/(ASCE)1090- 0241(2005)131:5(654), 2005.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, C. G.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M.; LOPES, D. Modelo para determinação dos parâmetros da equação de Van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v9. n1. p23-29. DEAg/UFCG., Campina Grande, PB, 2005.

MELGAREJO, M.L.; RIDLEY, A.M.; DINEEN, K.. **A comparison of the soil water characteristic curves for reconstituted and undisturbed samples of a colluvium from Rio de Janeiro**. In: 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, v. 1, p. 313-316, 2002.

OTÁLVARO, I. F. C. **Comportamento Hidromecânico de um Solo Tropical Compactado**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, p.122, 2013.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Tese de doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Pernambuco, PE, p.193, 2009.

PINO, A. F. A Questão da não Normalidade. **Rev. de Economia Agrícola**, São Paulo, Vol. 61, n. 2, p. 17-33, 2014.

PRESA, E. P., LINS, A.H.P. , CAMPOS, L.E.P. , IGNATIUS, S.G. , CAMAPUM de C, J. , DIAS, R. D. **Ensaio de laboratório em solos parcialmente saturados**. Simpósio Sobre Novos Conceitos em Ensaio de Campo e Laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro, ABMS,1:251-278. 1988.

POIRIER, D. J. The use of the Box-Cox transformation in limited dependent variable models. **Journal of the American Statistical Association**, Vol. 73, pp. 284-287, 1978.

QUEIROZ, A. C. G. **Estudo do Comportamento Microestrutural de Solos Tropicais Compactados**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.108, 2015

QUEIROZ, A. C. G. **Análise Estatística da Distribuição do Índice de Vazios na Curva Característica**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.6, 2010.

ROCHA, M. F. Influencia **do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. p.271, 2013.

ROMERO, E., VAUNAT, J. **Retention curves of deformable clays**. Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Tarantino & Mancuso (eds.), Balkema, Rotterdam: 91-106, 2000.

SILVA, M. T. M. G. **Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos Não Saturados Utilizando Ensaio com Umidade Conhecida**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.98, 2009.

SOARES, R. M., **Resistência ao Cisalhamento de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro**, RJ. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 2005.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:367-372, 1997

TEIXEIRA, M.D. **Estatística para concurso**, 2ª Ed., Brasília: Vestcon, 176p. 1995

TORMAN, V.B.L.; COSTER,R.;RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Rev. HCPA & Fac.** Vol 32. 227-237, 2012.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E.; CLIFTON, A.W. **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.** Canadian Geotechnical Journal, v.33 n.3, p. 379-392, 1996.

VIALI, L. **TESTES DE HIPOTÉSES NÃO PARAMÉTRICOS.** S/D. Disponível em: <http://www.mat.ufrgs.br/~viali/estatistica/mat2282/material/apostilas/Testes_Nao_Parametricos.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2020.