UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

USO DO ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING* APLICADO A REGRESSÃO SIMBÓLICA NA AVALIAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM SOLOS NÃO COESIVOS

GABRIELA FREIRE PEREIRA DA SILVA

Belém - PA
Julho/2026

GABRIELA FREIRE PEREIRA DA SILVA

USO DO ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING* APLICADO A REGRESSÃO SIMBÓLICA NA AVALIAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM SOLOS NÃO COESIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gérson Jacques Miranda dos Anjos.

Belém
Julho/2026

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIELA FREIRE PEREIRA DA SILVA

USO DO ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING* APLICADO A REGRESSÃO SIMBÓLICA NA AVALIAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM SOLOS NÃO COESIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 17 de julho de 2026

Examinadores

Prof. Dr. Gérson Jacques Miranda dos Anjos
Universidade Federal do Pará
Orientador

Prof. Dr. Salim Habib Fraiha Neto (UFPA)
Universidade Federal Do Pará
Membro da Banca

Prof. Dr. Mauro Alexandre Paula de Sousa (UNIFAL-MG)
Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas
Membro da Banca

Aos meus pais, Júlio César e Ione, por serem a fundação que sustenta todos os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter guiado meus passos e me sustentado ao longo destes cinco anos de graduação, concedendo-me força, sabedoria e perseverança para superar cada desafio.

À minha família, em especial aos meus pais, Júlio César e Ione, à minha irmã, Amanda, à minha sobrinha, Zoe, e ao meu namorado, Matheus, por fazerem do amor o alicerce da minha caminhada. Obrigada por acreditarem em mim, por me ampararem nos momentos de incerteza e por celebrarem, com tanto carinho, cada conquista alcançada.

Aos meus colegas de graduação, Aguida Gonçalves, André Risuenho, Autiele Junior, Cauê Silva, João Henrique, Matheus Dantas, Mel Dantas e Nayra Della Rovere, pela amizade, parceria e companheirismo ao longo dessa jornada. A convivência com vocês tornou os desafios mais leves e proporcionou momentos que levarei comigo para além da vida acadêmica.

Ao Grupo PET-Civil, pelo acolhimento, pela confiança e pelas inúmeras oportunidades de crescimento. Foi uma honra integrar esse grupo desde o primeiro semestre da graduação e conviver com pessoas inspiradoras, que marcaram profundamente a minha formação.

A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, pelos ensinamentos e pelo exemplo de dedicação, ética e compromisso com a educação. Em especial, à professora Dra. Nívea Albuquerque e à professora Dra. Isaura Paes, pelas valiosas contribuições e por serem a minha fonte de inspiração dentro da Engenharia.

Ao Professor Dr. Gérson Miranda, meu orientador, pela dedicação, paciência, disponibilidade e compromisso ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Mais do que transmitir conhecimento, o senhor me ensinou a enxergar a engenharia com curiosidade e senso crítico, despertando em mim o desejo de buscar sempre as melhores soluções. Agradeço, com profunda admiração, pela confiança depositada, pelo incentivo contínuo e por todo o apoio ao longo desta jornada.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho, pelas relevantes observações e pelo tempo dedicado ao seu aprimoramento.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte desta trajetória. Cada encontro, cada ensinamento e cada gesto de generosidade ajudaram a construir a profissional e a pessoa que sou hoje.

RESUMO

SILVA, G. F. P. **Uso do Algoritmo Simulated Annealing aplicado a regressão simbólica na avaliação da tensão limite de fundação superficial em solos não coesivos**. 2026. 46 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

O trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo computacional baseado no algoritmo meta-heurístico *Simulated Annealing* (SA) com regressão simbólica para estimar a capacidade de carga de sapatas em solos não-coesivos, buscando superar as limitações de previsão de capacidade de carga dos métodos teóricos clássicos. Embora amplamente utilizados, esses modelos tradicionais baseiam-se em hipóteses simplificadoras de solos homogêneos que nem sempre refletem o comportamento real em campo, enquanto as novas abordagens computacionais permitem explorar parâmetros e integrar comportamentos físicos da engenharia para garantir maior precisão. Os resultados obtidos através de métricas estatísticas evidenciaram o bom desempenho da formulação desenvolvida devido a maior aderência entre valores calculados e medidos, em comparação às outras metodologias clássicas e heurísticas disponíveis na literatura. Esse desempenho demonstra que o método proposto constitui uma alternativa promissora para a estimativa da capacidade de carga de fundações superficiais, contribuindo para o aumento da confiabilidade estrutural e eficiência econômica de projetos de fundação.

Palavras-chave: capacidade de carga; sapata; recozimento simulado; regressão simbólica.

ABSTRACT

SILVA, G. F. P. Use of the Simulated Annealing Algorithm applied to symbolic regression in the evaluation of the ultimate bearing capacity of shallow foundations in non-cohesive soils. 2026. 46 p.

This work proposes the development of a computational model based on the Simulated Annealing (SA) meta-heuristic algorithm combined with symbolic regression to estimate the bearing capacity of shallow foundations in cohesionless soils, to overcome the limitations of the load-bearing capacity predictions of classical theoretical methods. Although widely used, these traditional models are based on simplifying hypotheses of homogeneous soils that do not always reflect real field behavior, whereas new computational approaches allow for the exploration of parameters and the integration of physical engineering behaviors to ensure greater accuracy. The results obtained through statistical metrics demonstrated the strong performance of the developed formulation, evidenced by a closer agreement between calculated and measured values compared to other classical and heuristic methodologies available in literature. This performance indicates that the proposed method offers a promising alternative for estimating the bearing capacity of shallow foundations, contributing to enhanced structural reliability and economic efficiency in foundation design.

Key words: bearing capacity, shallow foundation; simulated annealing; symbolic regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de uma sapata. 20
Figura 2. Relação da influência do Nγ com o ângulo de atrito (ϕ) 27
Figura 3. Processo do algoritmo Simulated Annealing. 34
Figura 4. Problemas de regressão 36
Figura 5: Representação do funcionamento da Regressão Simbólica. 37
Figura 6. Painel do programa TurningBot durante o processamento. 50
Figura 7. Painel do programa TurningBot durante a definição das formulações. 51
Figura 8: Análise de sensibilidade dos parâmetros geotécnicos aplicado ao Método Proposto. 52
Figura 8: Análise de sensibilidade detalhada dos demais parâmetros geotécnicos aplicado ao Método Proposto. 52
Figura 9. Análise de dispersão de métodos. a) Método Proposto; b) Método Poor et al.; c) Método Poulos– Bolton & Lau; d) Método Shiraishi modificado I. 1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de segurança para solicitações de compressão em fundações rasas. 21
Tabela 2. Intervalo dos dados para aplicação do método de Kalinli et al. 29
Tabela 3. Valores das constantes de otimização.....29
Tabela 4. Intervalo dos dados para aplicação do método de Sadrossadat et al. 29
Tabela 5. Intervalo dos dados para aplicação do método de Poor et al. 30
Tabela 6. Intervalo dos dados para aplicação do método de Khorrami et al. 31
Tabela 7. Intervalo dos dados para aplicação dos métodos de Lawal e Kwon.....31
Tabela 8. Intervalo dos dados para aplicação dos métodos de Zhang & Xue. 32
Tabela 9. Escala de conservadorismo baseado no percentual dos valores de k. 39
Tabela 10. Informações simplificadas dos dados utilizados no desenvolvimento do Método Proposto.....47
Tabela 11. Intervalo dos dados para aplicação do Método Proposto. 48
Tabela 12. Funções definidas no mecanismo de simulação do método proposto no software TuringBot. 48
Tabela 13. Combinações entre expressão geral e fórmula do Nγ de diferentes métodos.....54
Tabela 14. Ranqueamento Estatístico dos Métodos. 54
Tabela 15. Listagem de todas as métricas estatísticas e a respectiva posição do Método Proposto.....55
Tabela 16. Ranqueamento Estatístico incluindo o Método Proposto Simplificado 2

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACO - *Ant Colony Optimization* (Otimização de Colônias de Formigas);

ANN - *Artificial Neural Network* (Rede Neural Artificial);

CC - Coeficiente de Concordância;

CPT - *Cone Penetration Test* (Ensaio de Penetração de Cone)*;*

CPTU - *Piezocone Penetration Test* (Ensaio de Piezocone);

DMT - *Flat Dilatometer Test* (Ensaio Dilatométrico de Marchetti);

FSg - Fator de Segurança Global;

GEP - *Gene Expression Programming* (Expressão de Programação Genética);

GOA - *Grasshopper Optimization Algorithm* (Algoritmo de Otimização do Gafanhoto);

IR - Índice de Referência;

LGP - *Linear Genetic Programming* (Programação Genética Linear);

LMI - Índice de Legate & Mccabe;

MAE - Erro Absoluto Médio;

MAPE - Erro Percentual Absoluto Médio;

MEF - Método dos Elementos Finitos;

MEP - Programação de Múltiplas Expressões;

MLR - Regressão Linear Múltipla;

MNLR - Regressão Não Linear Múltipla;

NSE - Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;

OAT - *One-at-a-time*;

PMT - *Pressuremeter Test* (Ensaio Pressiométrico);

RD - *Ranking Distance*;

RI - *Ranking Index;*

RMSE - Raiz do Erro Quadrático Médio;

RMSEs - Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático;

RNA - Redes Neurais Artificiais;

RS - Regressão Simbólica;

SA - *Simulated Annealing;*

SPT - *Standard Penetration Test;*

SSA - *Salp Swarm Algorithm* (Algoritmo de Enxame de Salpas);

U95 - Incerteza Expandida;

UFPA - Universidade Federal do Pará;

VAF - Variância Explicada;

WMAPE - Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado;

LISTA DE SIMBOLOS

B - Largura da fundação/sapata;

$\mathbf{b_c}$,$\mathbf{b_q}$,$\mathbf{b_\gamma}$ - Fatores de inclinação da base da fundação;

D - Profundidade de embutimento;

c - Coesão do solo;

d - Índice de concordância de Willmott;

$\mathbf{d_c}$,$\mathbf{d_q}$,$\mathbf{d_\gamma}$ - Fatores de profundidade;

$\mathbf{g_c}$,$\mathbf{g_q}$,$\mathbf{g_\gamma}$ - Fatores de inclinação do terreno;

g (δ, T) - Função aceite;

$\mathbf{i_c}$,$\mathbf{i_q}$,$\mathbf{i_\gamma}$ - Fatores de inclinação da carga sobre a fundação;

k - Fator viés;

$\mathbf{K_p}$ - Coeficiente de empuxo passivo;

L - Comprimento da fundação;

n - Número de amostras;

$\mathbf{N_c}$ - Fator de capacidade de carga da coesão;

$\mathbf{N_q}$ - Fator de capacidade de carga da sobrecarga;

$\mathbf{N_\gamma}$ - Fator de capacidade de carga do peso próprio;

q - carga aplicada;

$\mathbf{q_{adm}}$ - Tensão admissível;

$\mathbf{q_{lim}}$ - Tensão limite/capacidade de carga última;

$\mathbf{q_k}$ - Solicitação característica;

$\mathbf{Q_m}$ - Valor medido;

$\mathbf{Q_c}$ - Valor calculado;

r - Coeficiente de Correlação de Pearson;

$\mathbf{r^2}$ - Coeficiente de determinação;

$\mathbf{s_c}$,$\mathbf{s_q}$,$\mathbf{s_\gamma}$ - Fatores de forma;

$\mathbf{T_0}$ - Temperatura inicial;

$\boldsymbol{\alpha_\theta}$ - Termo auxiliar de N_q;

γ - Peso específico efetivo do solo;

μ - Média Aritmética;

φ - Ângulo de atrito interno;

λ - Índice de Mielke modificado;

σ - Desvio Padrão;

$\gamma_{m}{}^{c}$ – Coeficiente de ponderação da resistência última;

ρ - Índice de performance;

ρ_{MOD} - Índice de performance modificado;

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 18
1.1 Objetivo Principal 19
1.2 Objetivos Secundários 19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 Sapata 20
2.2 Estimativa da Capacidade de Carga 20
2.2.1 Métodos Teóricos 22
2.2.1.1 Método de Terzaghi 22
2.2.1.2 Método de Meyerhof 23
2.2.1.3 Método de Brinch Hansen 24
2.2.1.4 Método de Vesić 24
2.2.1.5 Método de Shiraishi 25
2.2.1.6 Método de Poulos 25
2.2.1.7 Método de Zhu & Michalowski 26
2.2.1.8 Método de Van Baars 26
2.2.1.9 Influência e a variabilidade do fator N_γ em solos arenosos 27
2.2.2 Métodos Computacionais (Heurísticos) 28
2.2.2.1 Kalinli *et al.* 28
2.2.2.2 Sadrossadat *et al.* 29
2.2.2.3 Poor *et al* 30
2.2.2.4 Khorrami *et al* 30
2.2.2.5 Lawal & Kwon 31
2.2.2.6 Zhang & Xue 32
2.3 Método de Otimização *Simulated Annealing* 33
2.3.1 Definição 33
2.3.2 Funcionamento do Algoritmo 34
2.4 Regressão Simbólica 35

2.4.1 Definição 35
2.4.2 Processo de Funcionamento 36
2.5 Análise Estatística 38
2.5.1 Conceitos 38
2.5.1.1 Média Aritmética (μ) 38
2.5.1.2 Desvio Padrão (σ) 39
2.5.1.3 Método Probabilístico Sintético (k) 39
2.5.2 Coeficiente de Determinação (r^2) 40
2.5.3 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) 40
2.5.4 Erro Absoluto Médio (MAE) 41
2.5.5 Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) 41
2.5.6 Índice de Mielke Modificado (λ) 41
2.5.7 Índice de Concordância de Willmott (d) 42
2.5.8 Índice a_{20} 42
2.5.9 Índice de Performance (ρ) 42
2.5.10 Índice de Performance Modificado (ρ_{MOD}) 43
2.5.11 Ranking Index (RI) 43
2.5.12 Probabilidade Normal 43
2.5.13 Probabilidade Log-Normal 44
2.5.14 Ranking Distance (RD) 44
2.5.15 Raiz Do Erro Quadrático Médio (RMSE) 44
2.5.16 Índice de Referência (IR) 45
2.5.17 Variância Explicada (VAF) 45
2.5.18 Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs) 45
2.5.19 Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE) 46
2.5.20 Índice de Legate & Mccabe (LMI) 46
2.5.21 Incerteza Expandida (U95) 46

2.5.22 Coeficiente de Concordância (CC) 47
3. PROPOSTA DO MÉTODO 47
3.1 Base de Dados 47
3.2 Simulação e Treinamento do algoritmo SA com Regressão Simbólica 48
3.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros do método proposto 51
4. VALIDAÇÃO DO MÉTODO 53
4.1 Modelos de referência para validação 53
4.1.1 Métodos teóricos selecionados 53
4.1.2 Formulações combinadas para análise comparativa 53
4.1.3 Métodos heurísticos selecionados 54
4.2 Análise estatística comparativa 54
4.3 Análise crítica do Método Proposto 1
4.3.1 Análise do Método Proposto Simplificado 1
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 3
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 5
APÊNDICE I 1
APÊNDICE II 1
APÊNDICE III 1
APÊNDICE IV 1
APÊNDICE V 7

INTRODUÇÃO

A capacidade de carga de fundações rasas é um parâmetro geotécnico fundamental para o dimensionamento de obras geotécnicas estáveis. Comumente, essa determinação é realizada por modelos teóricos, como os propostos por Terzaghi (1943), Vesić (1973), Meyerhof (1963), dentre outros que se baseiam em hipóteses simplificadoras com solos isotrópicos e homogêneos. Apesar de amplamente utilizados, esses modelos geralmente se distanciam do comportamento real do solo observado em campo, o que pode acarretar resultados imprecisos e diminuir a segurança e economia dos projetos (Pei & Luo, 2025).

Os geomateriais são naturalmente complexos e variáveis em todas as escalas, desde a microestrutura até a escala regional. Dessa forma, durante a parametrização e a modelagem do comportamento físico, o engenheiro deve considerar essa falta de uniformidade e as incertezas inerentes às informações disponíveis. Contudo, a forma como esses aspectos são incorporados ao modelo depende da abordagem selecionada. Nos métodos determinísticos, a variabilidade dos parâmetros geralmente não é representada de forma explícita, ao contrário das abordagens baseadas em incertezas, que buscam incorporar essa variabilidade ao processo de análise e tomada de decisão (Uzielli *et al*., 2006).

Com o avanço da ciência da computação, surgiram novas alternativas para trabalhar com a variabilidade e complexidade dos solos. Os algoritmos meta-heurísticos por exemplo, têm sido ferramentas úteis para prever a capacidade de carga de fundações, principalmente por procurar soluções próximas da otimalidade. Esses algoritmos de otimização de alto nível podem relacionar padrões entre os parâmetros como ângulo de atrito, tensão aplicada, embutimento e largura da sapata, a partir de um conjunto de dados limitado (Ibrahim *et al*., 2022), e segundo Liu & Liang (2024), tem apresentado resultados promissores na simulação de capacidade de carga última de fundações rasas.

Por outro lado, a variabilidade dos parâmetros geotécnicos impõe alguns desafios à aplicação direta de algoritmos de aprendizado de máquina. Nesse sentido, tem-se utilizado modelos que incorporam restrições baseadas em princípios fundamentais da engenharia, como a monotonicidade da relação entre área da fundação e capacidade de carga. De acordo com Pei & Luo (2025), a adoção dessa abordagem permite uma maior aderência dos modelos ao comportamento físico esperado do solo, evitando previsões inconsistentes.

O algoritmo *Simulated Annealing* (SA) é um método meta-heurístico baseado no processo de recozimento de metais, que ficam menos flexíveis à medida que a temperatura vai

diminuindo. A busca pela otimização dos resultados ocorre a partir de caminhos aleatórios e a possibilidade de escolha de um estado pior, para posteriormente ter um melhoramento interativo à medida que o parâmetro da temperatura cai (Xi *et al*., 2024).

Além disso, a combinação entre o algoritmo SA com a regressão simbólica permite não apenas formular um método mais preciso, rápido e simples da capacidade de carga última, mas também otimizar o projeto das fundações, garantindo maior eficiência estrutural e econômica (Khajehzadeh *et al.*, 2022).

Diante do contexto, o trabalho faz uma análise entre métodos teóricos consolidados na literatura geotécnica e os fatores que influenciam os resultados dessas formulações, com os métodos computacionais que utilizam diferentes algoritmos de otimização meta-heurísticos. Além disso, propõe o desenvolvimento de uma formulação baseada no algoritmo de otimização SA para a estimativa da capacidade de carga de sapatas assentadas em solos não-coesivos.

1.1 Objetivo Principal

Desenvolver um método computacional com fundamento meta-heurístico para prever a capacidade de carga de sapatas em solos não-coesivos, que auxilie na confiabilidade e economia de projetos de fundações.

1.2 Objetivos Secundários

- Comparar métodos teóricos, métodos combinados e computacionais com o método proposto, para medir a confiabilidade dos resultados;
- Analisar a influência do fator capacidade de carga devido ao peso específico do solo ($N\gamma$) nas estimativas da capacidade de carga nas combinações entre os métodos teóricos e os diferentes fatores $N\gamma$ propostos na literatura.

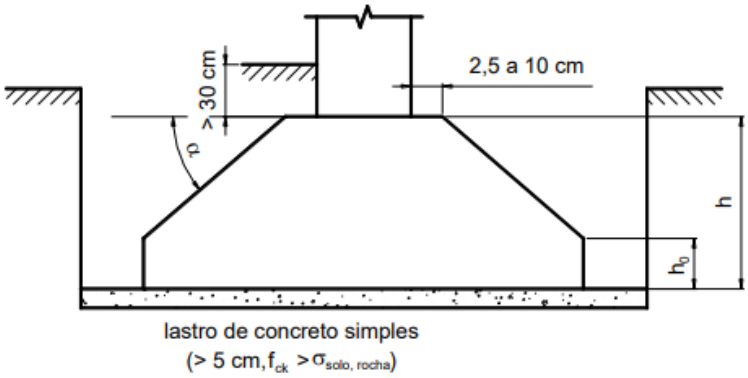
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sapata

A sapata (Figura 1) conforme a ABNT NBR 6122/2022, configura-se como elemento de fundação rasa, constituída de concreto armado, amplamente utilizadas em obras civis. Tem como função principal transmitir as cargas provenientes da edificação (superestrutura) para o solo, distribuindo uniformemente os esforços e garantindo a estabilidade da edificação.

Existem diferentes tipos de sapatas, sendo mais comuns as sapatas isoladas, que suportam a carga proveniente de apenas um pilar, e as sapatas contínuas que se estendem por elementos lineares, como vigas e paredes. Para realizar um dimensionamento adequado dessa fundação, é necessário conhecimento do solo de apoio (capacidade de suporte), além da geometria da fundação e intensidade das cargas relacionadas, que interferem diretamente nas propriedades geotécnicas.

Figura 1. Representação de uma sapata.



Fonte: Bastos (2023).

2.2 Estimativa da Capacidade de Carga

Nos projetos geotécnicos de fundações, é fundamental garantir níveis adequados de segurança frente a possíveis danos estruturais. Para atingir esse objetivo, torna-se necessário determinar, de forma precisa, a capacidade de carga do solo de assentamento, considerando um fator de segurança contra falhas e limites aceitáveis de recalques diferenciais sob as cargas de serviço.

A capacidade de carga de um solo é a máxima tensão suportada sem que ocorra ruptura ou recalques excessivos. Avaliar esse parâmetro é necessário para evitar problemas estruturais ou até mesmo colapso da superestrutura, causado por grandes distorções diferenciais.

Essa capacidade de suporte pode ser obtida através de métodos teóricos, semiempíricos, ensaios de campo como o *Standard Penetration Test* (SPT), CPT/CPTU (cone), DMT (dilatômetro), PMT (pressiômetro) ou por métodos numéricos e computacionais. Para o caso de solos não-coesivos, a estimativa está diretamente relacionada a densidade relativa e ao ângulo de atrito interno, que influenciam na resistência ao cisalhamento.

A recomendação de um fator de segurança global (FS_g), com base na norma NBR 6122/2022, determina que a condição de segurança com base no método dos valores admissíveis:

$$q_{adm} = q_{lim} / FS_g \quad (1)$$

$$q_{adm} \geq q_k \quad (2)$$

Onde,

q_{adm} = tensão admissível;

q_{lim} = tensão limite (ruptura);

FS_g = fator de segurança global; e

q_k = solicitações da superestrutura.

Para a determinação do FS_g, a norma NBR 6122/2022 propõe valores que dependem do método utilizado para a estimativa do q_{lim} e na confiabilidade dos parâmetros do solo utilizados nos ensaios *in situ*. Os fatores de segurança global podem ser analisados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Fatores de segurança para solicitações de compressão em fundações rasas.

Métodos para determinação da resistência última	**Coeficiente de ponderação da resistência última** γ_m [c]	**Fator de segurança global** FS_g
Semiempíricos [a]	Valores propostos no próprio processo e no mínimo 2,15	Valores propostos no próprio processo e no mínimo 3,00
Analíticos [b]	2,15	3,00
Semiempíricos [a] ou analíticos [b] acrescidos de duas ou mais provas de carga, necessariamente executadas na fase de projeto, conforme 7.3.1	1,40	2,00

[a] Atendendo ao domínio de vaidade para o terreno local.
[b] Sem aplicação de coeficientes de ponderação aos parâmetros de resistência do terreno.
[c] Em todas as situações de γ_m, $\gamma_f = 1{,}4$ (majoração) para o esforço atuante, se disponível apenas o seu valor característico; se já fornecido o valor de cálculo, nenhum coeficiente de ponderação deve ser aplicado a ele.

Fonte: NBR 6122/2022 (adaptado).

2.2.1 Métodos Teóricos

Os métodos teóricos da capacidade de carga foram desenvolvidos a partir de abordagens baseadas principalmente na teoria da elasticidade. Para possibilitar soluções práticas, essas teorias foram simplificadas, resultando em modelos de perfis de solo em que a resistência ao cisalhamento cresce linearmente com a profundidade, podendo ser válida sempre que corresponda às condições reais do terreno.

2.2.1.1 Método de Terzaghi

O primeiro método de destaque é o de Terzaghi (1943), onde segundo o autor, uma fundação rasa é caracterizada quando a profundidade de embutimento (D) é menor ou igual à sua menor dimensão em planta (B), ou seja, $D \leq B$. Nessa condição, a resistência ao cisalhamento do solo acima da base da fundação é diminuída por uma sobrecarga equivalente, considerando-se uma sapata corrida necessária apenas sobre a superfície de um maciço semi-infinito em ruptura excessiva. Com base na teoria da plasticidade e nos trabalhos de Prandtl (1920) e Reissner (1924), Terzaghi propôs a expressão:

$$q_{lim} = c\, N_c + q\, N_q + \gamma\, (B/2)\, N_\gamma \qquad (3)$$

Onde,

c = coesão do solo;

q = carga aplicada;

γ = peso específico efetivo.

N_c, N_q e N_γ = são fatores da capacidade de carga devido a coesão, sobrecarga e peso próprio respectivamente, que são calculadas nas expressões (4) a (6) abaixo:

$$N_q = \alpha_\theta{}^2 / \, 2\cos^2 (45^o + \phi\, /2) \qquad (4)$$

$$N_c = (N_q - 1)\, \text{cotg}\, \phi \qquad (5)$$

$$N_\gamma = [\tan (\varphi)/2] \text{ x } (K_p / \cos^2 (\phi) - 1) \qquad (6)$$

Onde,

α_θ = é o termo auxiliar no cálculo de N_q expresso por:

$$\alpha_\theta = e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\phi}{2}\right)tg(\phi)} \quad (7)$$

K_p = é o coeficiente de empuxo passivo do solo, onde conforme Rankine (1857) é expresso pela equação (8).

$$K_p = \tan^2[45 + (\phi/2)] \quad (8)$$

Terzaghi posteriormente propôs uma correção de forma (s_i) nas parcelas de peso próprio e coesão, para diferentes geometrias da estrutura, tendo em vista que o método original foi desenvolvido especificamente para fundações corridas. Também incluiu um ajuste considerando o modelo de ruptura localizado, que antes considerava apenas o modelo generalizado, com redução de 1/3 na coesão (c) e no tg(ϕ) conforme as equações (9) e (10):

$$c' = (2/3)\ c \quad (9)$$

$$tg(\phi)' = (2/3)\ tg(\phi) \quad (10)$$

2.2.1.2 Método de Meyerhof

Posteriormente, Meyerhof (1951) ampliou as formulações de Terzaghi, incorporando a resistência ao cisalhamento da camada de solo acima da base da fundação, de modo que uma superfície de ruptura pudesse interceptar o nível do terreno. Em 1963, o autor introduziu fatores de correção relacionados à geometria da fundação (s_i), à profundidade de assentamento (d_i) e à orientação da carga aplicada (i_i). Para valores de D próximos a B, suas soluções não variam significativamente das de Terzaghi, mas em relações elevadas de D/B as diferenças se tornam mais expressivas. Sua solução geral é dada por:

$$q_{lim} = c\ N_c\ s_c\ d_c\ i_c + q\ N_q\ s_q\ d_q\ i_q + \gamma\ (B/2)\ N_\gamma\ s_\gamma\ d_\gamma\ i_\gamma \quad (11)$$

Onde,

s_c, s_q e s_γ = são fatores de forma; d_c, d_q e d_γ = são fatores de profundidade de embutimento;

i_c, i_q e i_γ = são fatores de inclinação da carga sobre a fundação.

Para o cálculo do N_c, segue-se o mesmo critério definido na equação (5) considerando o valor de N_q da expressão (12). Para a determinação do N_γ, considera-se a equação (13) abaixo:

$$N_q = e^{\pi tg\phi} tg^2\ [(1 + \text{sen}\ \phi)/\ (1 - \text{sen}\ \phi)] \quad (12)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1)\ tg(1{,}4\ \phi) \quad (13)$$

N_c e N_q pela equação de Terzaghi são levemente diferentes das usadas por Meyerhof e, portanto, distinta das usadas atualmente na literatura de geotecnia. Valores de N_γ foram definidos somente graficamente por Terzaghi. Há várias formulações para N_γ associada ao modelo de estudo de Terzaghi na determinação da capacidade de carga de fundações.

2.2.1.3 Método de Brinch Hansen

O método de Hansen (1970) é considerado uma extensão ao trabalho de Meyerhof, onde introduziu-se o conceito de área efetiva a ser considerada no cálculo de capacidade de carga. Além dos fatores de forma, profundidade e inclinação determinados no método anterior, Hansen acrescenta fator de inclinação da superfície do solo que suporta a sapata (g_i) e inclinação da base da fundação (b_i), possibilitando assim, o dimensionamento de fundações rasas assentadas em taludes, conforme a equação (14):

$$q_{lim} = c\, N_c\, s_c\, d_c\, i_c\, b_c\, g_c + q\, N_q\, s_q\, d_q\, i_q\, b_q\, g_q + \gamma\, (B/2)\, N_\gamma\, s_\gamma\, d_\gamma\, i_\gamma\, b_\gamma\, g_\gamma \quad (14)$$

Onde,

b_c, b_q e b_γ = são fatores de inclinação da base da fundação;

g_c, g_q e g_γ = são fatores de inclinação do terreno.

Para a determinação do N_c e N_q considera-se as expressões (5) e (12) respectivamente, e para o N_γ calcula-se pela expressão (15) abaixo:

$$N_\gamma = 1{,}5(Nq - 1)tg\phi \quad (15)$$

2.2.1.4 Método de Vesić

O método de Vesić (1973) constitui uma evolução do proposto por Hansen, mantendo os fatores de capacidade de carga para coesão (N_c) e sobrecarga (N_q), mas introduzindo ajustes nos fatores de correção associados à da inclinação da carga aplicada (i_c, i_q e i_γ), inclinação da base (b_c, b_q e b_γ) e fatores de inclinação do terreno (g_c, g_q e g_γ). É um dos métodos de maior correlação quando se compara com resultados medidos.

Para a determinação do N_c e N_q considera-se as expressões da (5) e (12) respectivamente, e para o N_γ calcula-se a expressão (16) abaixo:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan(\phi) \quad (16)$$

2.2.1.5 Método de Shiraishi

O método de Shiraishi (1990) foi proposto para corrigir uma superestimativa em métodos teóricos da capacidade de carga em casos de fundações de grande porte, especialmente assentados em solos arenosos. O autor observou que esses modelos, como o de Terzaghi, não consideravam comportamentos reais na prática, como o efeito de escala, e para tornar os resultados mais similares ao observado em campo, considerou correções nos fatores de capacidade de carga N_q e N_γ, que podem ser observadas nas expressões (17) e (18) abaixo:

$$N'_q = 0{,}23N_q/\{B^{0,25}\,(1+0{,}1D/B)\} \quad (17)$$

$$N'_\gamma = 0{,}71N_\gamma/\,B^{0,2} \quad (18)$$

Onde,

N'_q = é o fator de correção de N_q (sobrecarga) proposto por Shiraishi;

N'_γ = é o fator de correção de N_γ (peso próprio) proposto por Shiraishi;

N_q = é o fator de capacidade de carga proposto por Terzaghi, conforme a equação (4);

N_γ = é o fator de capacidade de carga proposto por Terzaghi, conforme a equação (6).

No desenvolvimento deste trabalho, usou-se três variantes do método de Shiraishi com o cálculo usando N'_q e N'_γ isolado ou em conjunto (combinados).

2.2.1.6 Método de Poulos

O método de Poulos, Carter & Small (2001) foi proposto com o objetivo de aperfeiçoar a estimativa da capacidade de carga por meio da incorporação de resultados provenientes da teoria da plasticidade, análise numérica e evidências experimentais. A equação geral recomendada pelos autores segue a sugerida por Vesić (Equação (14) que estende a expressão originalmente proposta por Terzaghi (1943).

Para os fatores N_c e N_q, os autores adotam as soluções de Prandtl (1921) e Reissner (1924), mesma base teórica já utilizada por Terzaghi (1943) e apresentada no item 2.2.1.1.

O principal destaque da revisão de Poulos, Carter & Small (2001) está na discussão do fator N_γ, para o qual os autores identificam divergências relevantes entre as soluções disponíveis na literatura. Os autores demonstram que a aproximação de Vesić (1973), $N_\gamma \approx 2(N_q + 1)\tan\phi$ (Equação (16) , amplamente utilizada na prática, é não conservadora quando comparada às

soluções rigorosas obtidas por Davis & Booker (1971), a partir da teoria da plasticidade para um corpo rígido-plástico.

Para ângulos de atrito entre 30º e 40º, os valores tradicionalmente adotados podem superestimar essa parcela de capacidade de carga em até três vezes, logo, os autores recomendam as soluções rigorosas de Davis & Brooker (1971), ou de suas aproximações analíticas, válidas para ângulos de atrito superiores a aproximadamente 10º, dadas por:

$$N_\gamma \approx 0{,}0663\ e^{9{,}3\phi} \quad \text{(sapata de base lisa)} \tag{19}$$

$$N_\gamma \approx 0{,}1054\ e^{9{,}6\phi} \quad \text{(sapata de base rugosa)} \tag{20}$$

Onde,

ϕ = ângulo de atrito do solo, expresso em radianos.

2.2.1.7 Método de Zhu & Michalowski

As contribuições de Zhu & Michalowski (2005) trouxeram um maior rigor matemático nas formulações da capacidade de carga em fundações rasas, onde através do teorema do limite superior da análise limite, demonstraram que os fatores de forma (s_c, s_q, s_γ) não dependem apenas da geometria da fundação, mas também são influenciados pelo ângulo de atrito (ϕ). As formulações para os fatores de forma podem são expressas nas equações (21) a (24):

$$s_c = 1 + (1{,}8 \tan^2\phi + 0{,}1) \sqrt{\left(\frac{B}{L}\right)} \tag{21}$$

$$s_q = 1 + 1{,}9 \tan^2\phi \sqrt{\left(\frac{B}{L}\right)} \tag{22}$$

$$s_\gamma = 1 + (0{,}6 \tan^2\phi - 0{,}25) \times (B/L) \qquad \phi \leq 30^o \tag{23}$$

$$s_\gamma = 1 + (1{,}3 \tan^2\phi - 0{,}5) \times (L/B)^{1{,}5}\ e^{-L/B} \qquad \phi > 30^o \tag{24}$$

2.2.1.8 Método de Van Baars

As contribuições de Van Baars (2018) se fundamentam no refinamento da solução analítica da "cunha de Prandtl" e das análises de Reissner (1924) utilizando-se do Método dos Elementos Finitos (MEF) para validar e corrigir formulações de capacidade de carga, conforme as Equações (25) a (28). Além disso, o autor trouxe ajustes nos fatores de correção introduzidos por Meyerhof, Hansen e Vèsic.

$$N_q = \cos^2 \times \phi \times K_p \times e^{\pi tan\phi} \tag{25}$$

$$N_c = (Nq - 1) \times \cot g\phi \quad (26)$$

$$N_\gamma = 7 \times \text{sen}\phi \times (e^{\pi tg\phi} - 1) \quad \text{para placas rugosas} \quad (27)$$

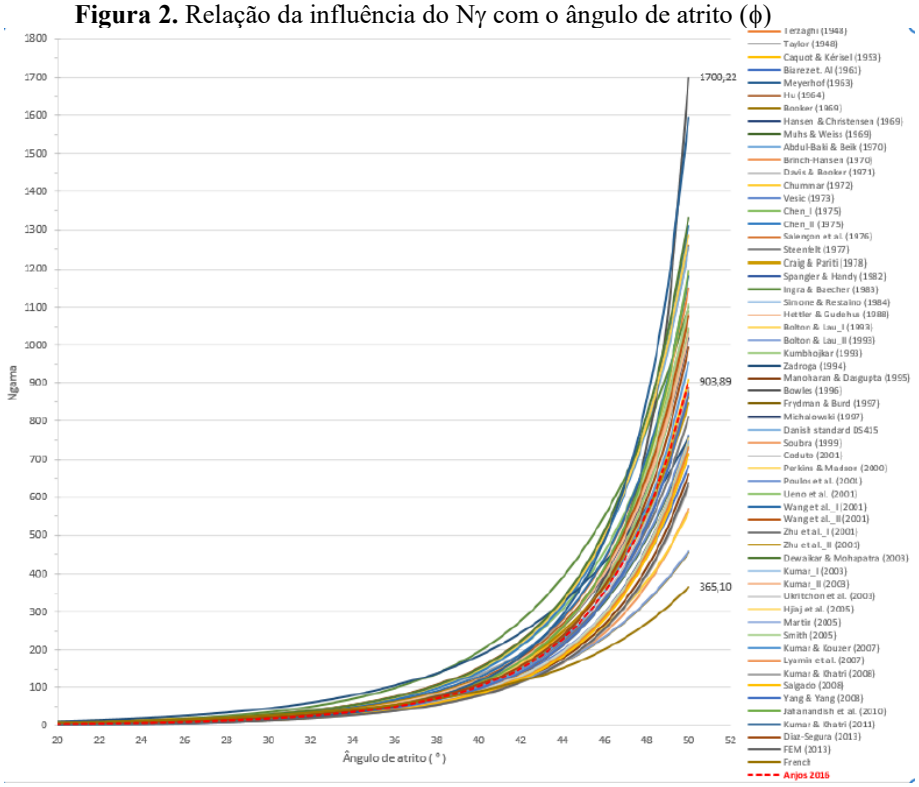
$$N_\gamma = 4 \times tg\phi \times (e^{\pi tg\phi} - 1) \quad \text{para placas lisas} \quad (28)$$

2.2.1.9 Influência e a variabilidade do fator N_γ em solos arenosos

Em solos granulares, onde a coesão é nula (c = 0), a estimativa da capacidade de carga se concentra essencialmente nas parcelas de sobrecarga e do peso próprio do solo, tornando a o fator N_γ, o componente de maior peso e sensibilidade na equação. Historicamente, no aprimoramento da formulação, diferentes métodos como a técnica do equilíbrio limite e elementos finitos foram utilizados para calcular N_γ (Taghvamanesh & Moayed, 2019).

O que se observa, é que nessas diferentes análises o valor de N_q não possui grandes variações com as diferentes soluções, entretanto, conforme Motra *et al.* (2016), não há um consenso do melhor modelo para estimar N_γ. Os valores de ϕ encontrados pelos diferentes autores para um dado valor de N_γ variam consideravelmente (Figura 2) devido às diferentes hipóteses adotadas para a geometria da cunha de ruptura e para o atrito na interface solo-fundação (Dağlı, 2022) .

Figura 2. Relação da influência do Nγ com o ângulo de atrito (ϕ)



Fonte: Anjos (2025).

Algumas abordagens híbridas, caracterizadas pela combinação da equação geral de capacidade de carga de um determinado método clássico com a formulação específica de N_γ desenvolvida por outros autores, tem sido executada para superar as hipóteses clássicas que muitas vezes resultam em estimativas conservadoras ou superdimensionadas em comparação ao comportamento real observado em ensaios de campo, o que pode colocar em risco a segurança estrutural e economia de projetos (Motra, *et al*., 2016; Bendriss *et al*., 2018).

2.2.2 Métodos Computacionais (Heurísticos)

O crescimento dos métodos computacionais reflete uma mudança de paradigma na análise dos problemas complexos de natureza não linear e heterogênea do solo. O advento de ferramentas avançadas de análise, atreladas à ciência de dados e a algoritmos de *machine learning,* permitiu o desenvolvimento de diversos métodos preditivos da capacidade de carga em fundações por meio da identificação de padrões complexos e relações multidimensionais entre os parâmetros geotécnicos (Shao *et al*., 2023).

Esse avanço técnico, além de trazer uma maior precisão nos resultados, tendo em vista que diminui as incertezas inerentes à variabilidade dos solos e as limitações das modelagens essencialmente teóricas, também promove otimização de recursos para os processos geotécnicos. A capacidade de processar um volume maior de dados (*Big Data*) permite a economia de tempo e recursos, além da minimização de riscos, garantindo projetos de fundações mais eficientes e precisos (Shah *et al*., 2025).

2.2.2.1 Kalinli *et al*.

Kalinli *et al*. (2011) desenvolveram um método que integra algoritmos de Redes Neurais Artificiais (RNA) e de Otimização de Colônias de Formigas (ACO) a partir de um melhoramento aplicado na proposição de Meyerhof. Os autores utilizaram como base de dados um conjunto de 112 casos de provas de carga, obtidos na literatura em trabalhos desenvolvidos por Muhs et al. (1969), Weiß (1970), Muhs & Weiß (1971), Muhs & Weiß (1973), Briaud & Gibbens (1999), Gandhi (2003), Golder (1941), Eastwood (1951), Subrahmanyam (1967) e Cerato (2005).

O método expresso na equação (29) foi construído para determinar a capacidade de carga em fundações assentes em solos arenosos, a partir do intervalo dos fatores da Tabela 2.

Tabela 2. Intervalo dos dados para aplicação do método de Kalinli *et al*.

Fatores	B (m)	D (m)	γ (kN/m³)	ϕ (º)	q_{lim} (kPa)
Intervalo	0,030 – 3,016	0 – 0,889	9,85 – 17,2	32 – 44,8	14 - 2847

Fonte: Kalinli *et al 2011* (adaptado).

$$q_{lim} = x_1 \gamma D^{x2} N_q F_{qs} F_{qd} + x_3 g B^{x4} N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} \quad (29)$$

Onde,

N_q e N_γ = são os fatores de capacidade de carga de Meyerhof (1963), devido à sobrecarga e peso próprio respectivamente, conforme as expressões das equações (12) e (13);

F_{qs} e $F_{\gamma s}$ = são fatores de correção devido à forma, propostos por Meyerhof (1963);

F_{qd} e $F_{\gamma d}$ = são fatores de correção devido à profundidade, propostos por Meyerhof (1963);

x_1, x_2, x_3 e x_4 = são constantes de otimização aplicadas na formulação de Meyerhof, dados conforme a Tabela 3:

Tabela 3. Valores das constantes de otimização.

x_1	1,8102
x_2	1,3199
x_3	0,4151
x_4	1,0351

Fonte: Kalinli *et al,* 2011 (adaptado).

2.2.2.2Sadrossadat *et al*.

Para o desenvolvimento de um método computacional para a estimativa de capacidade de carga de fundações rasas assentes em solos arenosos, Sadrossadat *et al*. (2013) também se basearam na metodologia de programação genética, só que neste caso utilizando o método linear (LGP).

O modelo foi criado a partir de dados obtidos de 97 casos experimentais, compreendendo 47 testes em escala real e 50 ensaios em modelos reduzidos, obtidos através de trabalhos de Muhs et al. (1969), Weiß (1970), Muhs & Weiß (1971), Muhs & Weiß (1973), Briaud & Gibbens (1999) e Gandhi (2003). O método conforme a equação (30), determina a capacidade de carga em fundações rasas seguindo os intervalos na Tabela 4:

Tabela 4. Intervalo dos dados para aplicação do método de Sadrossadat *et al*.

Fatores	B (m)	D (m)	L/B	γ (kN/m³)	ϕ (º)	q_{lim} (kPa)
Intervalo	0,05 – 3,01	0 – 0,889	1-6	9,85 – 17,1	32 – 44,8	58,5 – 2847

Fonte: Sadrossadat *et al*, 2013 (adaptado).

$$q_{lim} = \phi \{[\gamma + \phi + (3{,}95(\phi - 35)^2)/(L/B)]D^2 + 2{,}5[B(\phi - 35) + 1]\} \quad (30)$$

2.2.2.3Poor *et al*.

Poor *et al*. (2015) desenvolveram dois métodos para estimar a capacidade de carga, a partir da metodologia de expressão de programação genética (GEP), sendo melhoramentos das equações de Meyerhof (1963) e Vesić (1973). A base de dados utilizada consiste em 112 casos de provas de carga, obtidos a partir de trabalhos de Muhs et al. (1969), Weiß (1970), Muhs & Weiß (1971), Muhs & Weiß (1973), Briaud & Gibbens (1999) e Gandhi (2003).

Os métodos baseados nas fórmulas analíticas de Meyerhof e Vesić podem ser observadas nas equações (31) e (32) respectivamente, seguindo os intervalos da Tabela 5:

Tabela 5. Intervalo dos dados para aplicação do método de Poor *et al*.

Fatores	**B (m)**	**D (m)**	**L/B**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**	**q_{lim} (kPa)**
Intervalo	0,0585 – 3,016	0 – 0,889	1-6	9,85 – 17,1	32 – 44,8	58,5 – 2847

Fonte: Poor *et al*., 2015 (adaptado).

$$q_{lim}{}^{M} = (-3{,}047149N_{q,M}D + B) \times (-9{,}316Ds_{q,M}{}^{2}) + \gamma + ([sen(sen(B))]^2 \times [(\gamma N_{\gamma,M}) + (\gamma^2 - N_{\gamma,M})] + d_{q,M}\,[tg(tg(tg(D\,s_{q,M}))^3)] + N_{\gamma,M} + [9{,}230316\ tg\ (tg\ [cos(D) - N_{\gamma,M}])] \quad (31)$$

$$q_{lim}{}^{V} = [s_{q,V}{}^2 + D] \times B \times L/B \times (N_{\gamma,V} - 8{,}1403) + [D(8{,}1178\ d_{\gamma,V})^2 \times \{[D(N_{\gamma,V} + 9{,}9964)]/(L/B)\} + N_{\gamma,V} - 9{,}0498 \times B^4 \times d_{q,V}{}^4 - 19{,}8444 \quad (32)$$

Onde,

$q_{lim}{}^{M}$ = método proposto da capacidade de carga com base nas formulações de Meyerhof;

$q_{lim}{}^{V}$ = método proposto da capacidade de carga com base nas formulações de Vesić;

$N_{q,M}$, $N_{\gamma,M}$ = fatores da capacidade de carga devido à sobrecarga e peso próprio, conforme o método de Meyerhof, expresso nas equações (12) e (13) respectivamente;

$s_{q,M}$, $d_{q,M}$ = são fatores de forma e profundidade de embutimento conforme Meyerhof;

$N_{q,V}$, $N_{\gamma,V}$ = fatores da capacidade de carga devido a sobrecarga e peso próprio, conforme o método de Vesić, expresso nas equações (12) e (16) respectivamente;

$s_{q,V}$, $d_{q,V}$ = são fatores de forma e profundidade de embutimento conforme o método de Vesić.

2.2.2.4 Khorrami *et al*.

O método de capacidade de carga para fundações rasas desenvolvido por Khorrami *et al*. (2020) consiste na utilização do algoritmo M’5 *Model Tree*, que combina a estrutura de uma

árvore de decisão com regressão linear. A base de dados consistiu em 169 casos, sendo 104 casos em escala real, e 65 casos obtidos em escala reduzida em laboratório. Os dados foram obtidos através de trabalhos de Golder et al.(1941), Eastwood (1951), Subrahmanyam (1967), Muhs et al. (1969), Weiß (1970), Muhs and Weiß (1971), Muhs and Weiß (1973), Briaud and Gibbens (1997), Briaud and Gibbens (1999), Gandhi (2003), Cerato and Lutenegger (2007) e Akbas and Kulhawy (2009), sendo que 80% dos dados foram utilizados para treinamento e 20% para testes.

O método permitiu a definição de diferentes equações a depender das condições de entrada no modelo M'5 *Model Tree,* conforme as equações (33), (34) e (35), seguindo o intervalo conforme a Tabela 6 abaixo:

Tabela 6. Intervalo dos dados para aplicação do método de Khorrami *et al.*

Fatores	**B (m)**	**D (m)**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**
Intervalo	0,03 – 3,02	0 – 0,89	9,85 – 20,8	32,1 – 45,8

Fonte: Khorrami *et al.,* 2020 (adaptado).

$$q_{lim} = 0{,}0017\,(B/L+1)^{0,37} \times (D+1)^{5,31}\,\gamma^{4,78}\,\phi^{3,54} \qquad (B/L+1) \leq 0{,}15 \qquad (33)$$

$$q_{lim} = 78{,}18\,(B/L+1)^{0,2} \times (D+1)^{3,05}\,\gamma^{0,82}\,\phi^{2,02} \qquad (B/L+1) > 0{,}15 \text{ e } \phi\,(rad) \leq 0{,}7 \qquad (34)$$

$$q_{lim} = 3133{,}79\,(B/L+1)^{0,6} \times (D+1)^{3,31}\,\gamma^{0,18}\,\phi^{4,68} \qquad (B/L+1) > 0{,}15 \text{ e } \phi\,(rad) > 0{,}7 \qquad (35)$$

2.2.2.5 Lawal & Kwon

Lawal & Kwon (2022) propõem dois métodos utilizando Rede Neural Artificial, o primeiro baseado no algoritmo de otimização do Gafanhoto (GOA) e o segundo no algoritmo de Enxame de Salpas (SSA) que simulam comportamentos de movimentação desses animais. A base de dados para os métodos são os mesmos casos adotados no trabalho de Padmini *et al.* (2008) que consistiu em 97 casos, obtidos através de análises de Muhs *et al*.(1969), Weiß (1970), Muhs & Weiß (1973), Muhs & Weiß (1971), Briaud & Gibbens (1999) e Gandhi (2003). Os métodos desenvolvidos com base nos algoritmos GOA e SSA podem ser observadas nas equações (36) e (37) respectivamente, seguindo os intervalos da Tabela 7:

Tabela 7. Intervalo dos dados para aplicação dos métodos de Lawal e Kwon.

Fatores	**B (m)**	**D (m)**	**L/B**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**	**q_{lim} (kPa)**
Intervalo	0,0585 – 3,016	0 – 0,889	1-6	9,85 – 17,1	32 – 44,8	58,5 – 2847

Fonte: Lawal e Kwon, 2022 (adaptado).

$$q_{lim\ GOA\text{-}ANN} = 1394{,}25 \tanh\left(\sum_{i=1}^{8} y_i - 3{,}21114\right) + 1452{,}75 \qquad (36)$$

$$q_{limSSA\text{-}ANN} = 1394{,}25 \tanh\left(\sum_{i=1}^{8} x_i - 1{,}57234\right) + 1452{,}75 \qquad (37)$$

Onde, y_i (i = 1, 2, ..., 8) são os coeficientes podem ser obtidos nas equações (38) a (45), e os valores de x_i (i = 1, 2, ..., 8) podem ser obtidos nas expressões (46) até (53):

$$y_1 = 2{,}0687 \tanh [0{,}5234B + 14{,}0817D - 0{,}9364(L/B) + 0{,}5775\gamma + 0{,}5195\phi - 34{,}8966] \quad (38)$$

$$y_2 = 5{,}7526 \tanh [0{,}68067B + 1{,}01165D - 0{,}0564(L/B) + 0{,}0386\gamma + 0{,}0255\phi - 1{,}6146] \quad (39)$$

$$y_3 = 1{,}3167 \tanh [1{,}1619B + 4{,}46702D + 0{,}5108(L/B) + 0{,}1948\gamma + 0{,}00744\phi - 6{,}4489] \quad (40)$$

$$y_4 = 0{,}7411 \tanh [-1{,}0211B + 5{,}3096D + 0{,}9345(L/B) + 0{,}0928\gamma + 0{,}0411\phi - 3{,}75] \quad (41)$$

$$y_5 = -0{,}4714 \tanh [1{,}94302B + 8{,}6946D - 0{,}12546(L/B) - 0{,}7888\gamma + 0{,}4462\phi - 9{,}7505] \quad (42)$$

$$y_6 = -1{,}5425 \tanh [0{,}12025B + 3{,}0525D + 0{,}03208(L/B) + 0{,}2061\gamma + 0{,}05318\phi - 6{,}2405] \quad (43)$$

$$y_7 = -4{,}1252 \tanh [1{,}0557B + 1{,}2356D + 0{,}0598(L/B) + 0{,}00565\gamma - 0{,}01268\phi - 1{,}0927] \quad (44)$$

$$y_8 = 0{,}73201 \tanh [0{,}9274B + 1{,}1829D - 0{,}1018(L/B) - 2{,}50697\gamma + 0{,}6254\phi + 5{,}8386] \quad (45)$$

$$x_1 = 1{,}8724 \tanh [0{,}19802B + 4{,}5127D + 1{,}02471(L/B) + 0{,}08889\gamma + 0{,}147396\phi - 12{,}0342] \quad (46)$$

$$x_2 = -1{,}77508 \tanh [-1{,}1738B - 12{,}5838D + 0{,}3984(L/B) + 0{,}29214\gamma + 0{,}20104\phi + 10{,}5592] \quad (47)$$

$$x_3 = -1{,}60847 \tanh [0{,}01251B - 2{,}0988D - 0{,}3764(L/B) + 0{,}2571\gamma - 0{,}2334\phi + 7{,}3605] \quad (48)$$

$$x_4 = -1{,}6122 \tanh [-2{,}10703B - 4{,}2093D + 0{,}8555(L/B) - 1{,}1189\gamma + 0{,}0844\phi + 14{,}0766] \quad (49)$$

$$x_5 = -0{,}6142 \tanh [-0{,}1367B - 5{,}394D + 0{,}5199(L/B) - 0{,}48601\gamma + 0{,}3302\phi - 6{,}2221] \quad (50)$$

$$x_6 = 2{,}1243 \tanh [-0{,}2385B - 4{,}535D - 0{,}3789(L/B) + 0{,}1595\gamma - 0{,}0182\phi + 2{,}1098] \quad (51)$$

$$x_7 = -2{,}9309 \tanh [-1{,}5105B - 0{,}5695D + 0{,}5694(L/B) - 0{,}3935\gamma + 0{,}1886\phi - 5{,}1001] \quad (52)$$

$$x_8 = 1{,}8869 \tanh [0{,}3187B - 2{,}1139D - 0{,}3364(L/B) - 0{,}5952\gamma + 0{,}1615\phi + 3{,}0043] \quad (53)$$

2.2.2.6 Zhang & Xue

Zhang & Xue (2022) propuseram três métodos de previsão para a capacidade de carga em fundações rasas assentes em solo arenoso, sendo a primeira baseando-se na Programação de Múltiplas Expressões (MEP), a segunda na Regressão Linear Múltipla (MLR) e a última na Regressão Não-linear Múltipla (MNLR). Foram utilizados 158 dados, sendo 106 utilizados para treinamento e 52 para testes, e obtidos através de estudos de Golder *et al*. (1941), Eastwood (1951), Subrahmanyam (1967), Muhs *et al*. (1969), Muhs & Weiß (1971, 1973), Weiß (1970), Briaud & Gibbens (1997, 1999), Gandhi (2003), Cerato & Lutenegger (2007) e Akbas & Kulhawy (2009). Os métodos desenvolvidos são definidos para os parâmetros dos intervalos da Tabela 8.

Tabela 8. Intervalo dos dados para aplicação dos métodos de Zhang & Xue.

Fatores	**B (m)**	**D (m)**	**L/B**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**	**q_{lim} (kPa)**
Intervalo	0,003 – 3,02	0 – 0,89	1-6	9,85 – 20,8	32,08 – 45,84	14 – 1277,78

Fonte: Zhang & Xue, 2022 (adaptado).

Para o método MEP, a capacidade de carga é definida pela expressão (54):

$$q_{lim} = \{[((\phi^2/B) - \phi)\, A_1A_2\, \log A_4 - A_3B - A1]/\phi\}^2 + 10^{2\phi}A_3B - (L/B) + (\phi^2/B) + \gamma - A_1 - 10^{2\phi}\phi^5A_2A_4 + [(A_1/A_4) + A_1 + (10^{2\phi}/\phi)A_3 - (A_3B/A_1)]D \quad (54)$$

Onde os parâmetros de A_1, A_2, A_3 e A_4 podem ser calculadas nas equações (55) a (58):

$$A_1 = [10\phi\, \log(10^{\phi}\, \phi^2)\phi^2]/[(\phi/B) - 1] \quad (55)$$

$$A_2 = 10^{\phi}\phi^2 + B \quad (56)$$

$$A_3 = (\phi^2/B) + 10^{2\phi} \quad (57)$$

$$A_4 = \log(10^{\phi}\phi^2) \quad (58)$$

O método MLR é definido pela equação (59):

$$q_{lim} = -1426{,}2 + 2291{,}5\phi + 2{,}9\gamma - 6{,}4\,(L/B) + 306{,}6D + 364{,}6B \quad (59)$$

Enquanto o método MNLR é calculado pela expressão (60):

$$q_{lim} = 4073{,}9 - 17754{,}2\phi + 154\gamma - 108{,}2(L/B) + 3389{,}2D - 24{,}4B + 17459{,}3\phi^2 + 4{,}6\gamma^2 + 32{,}7(L/B)^2 + 428{,}9D^2 - 21{,}6B^2 - 327{,}6\phi\gamma + 247{,}9\phi(L/B) - 4051{,}6\phi D + 2961{,}6\phi B - 17{,}3\gamma(L/B) + 22\gamma D - 82{,}7\gamma B + 14{,}5(L/B)D - 59{,}5L - 501{,}1DB \quad (60)$$

2.3 Método de Otimização *Simulated Annealing*

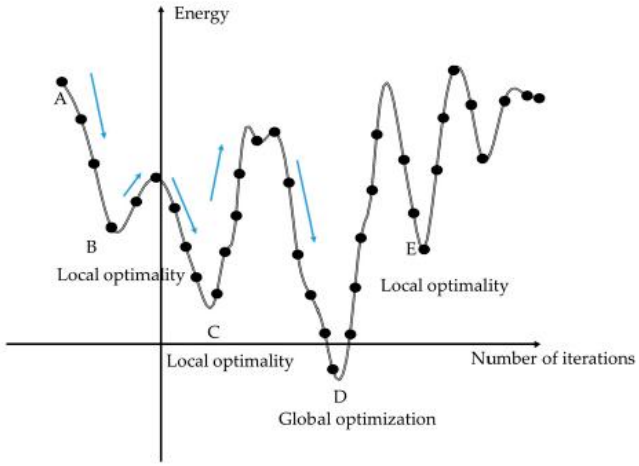
2.3.1 Definição

O algoritmo *Simulated Annealing* (SA), conhecido como algoritmo de recozimento simulado, é um método de otimização inspirado no processo físico da metalurgia chamado de recozimento, proposto inicialmente por Metropolis *et al*. (1953). Para obter metais com menos defeitos e maiores resistências, é necessário que o material esteja configurado com a menor energia interna. Para obter este resultado o recozimento inicia-se em altas temperaturas, permitindo a livre movimentação dos átomos, que muitas vezes se movimentam momentaneamente para posições de maior energia, antes de se acomodar em uma posição mais favorável (menor energia). À medida que a temperatura vai diminuindo gradualmente, os átomos perdem energia e começam a procurar posições estáveis, possibilitando o rearranjo de uma rede cristalina refinada e em equilíbrio (Sobótka *et al*., 2013).

Analogamente, o algoritmo SA inicia-se com uma alta temperatura (T_0), que gradualmente decresce, permitindo uma busca ao ótimo global, sem ficar preso nos "vales" dos ótimos locais. Para escapar dos ótimos locais ele combina características de saltos probabilísticos que são mais recorrentes quanto maior for a temperatura, juntamente com outros parâmetros durante a operação (Xi *et al*., 2024).

O algoritmo SA é ilustrado de forma simplificada na Figura 3, onde os pontos "B", "C" e "E" são os ótimos locais, e o ponto "D" o ótimo global. Inicialmente é selecionado aleatoriamente um ponto de partida, e a partir disso o algoritmo busca por soluções com mais ou menos interações, podendo aceitar momentaneamente soluções "piores" ou de maior energia para conseguir explorar posteriormente soluções de menor energia. À medida que a interação progride e a temperatura (T) diminui, o algoritmo se torna mais conservador e aceita menos soluções ruins, refinando cada vez mais a busca da solução ótima (Zhang *et al*., 2025).

Figura 3. Processo do algoritmo *Simulated Annealing*.



Fonte: Xi *et al*., 2024).

2.3.2 Funcionamento do Algoritmo

O objetivo do algoritmo é determinar a função de menor energia, logo:

$$\min f(x) \qquad x \in S \qquad \text{onde } f: S \rightarrow R,\ S \text{ finito} \tag{61}$$

O algoritmo inicia-se com a temperatura T_0 e em um ponto inicial $i \in S$. A partir desse ponto i é gerado um $j \in S$ e pertencente a vizinhança V(i). Esse ponto j pode ser aceito ou rejeitado de acordo com a função g conhecida como função aceite. Esse processo é repetido L_k vezes, até que um certo equilíbrio é atingido, assim, o valor de T é diminuído e o processo é repetido.

A função aceite que permite aceitar ou rejeitar a nova solução que causará um incremento δ em f, é determinado por um critério probabilístico, sendo normalmente expressa como:

$$g(\delta, T) = e^{-\delta/T} \quad (62)$$

Se a nova solução f(j) representar uma melhoria em relação a solução atual f(i), ou seja, o incremento δ for negativo, ela é automaticamente aceita. Contudo, se a solução nova for pior, o algoritmo não descarta de imediato, a solução torna-se probabilística dependendo da função aceite g (δ, T). Enquanto o valor T é alto, a maioria dos movimentos (de uma solução para outra) é aceita, mas à medida que T se aproxima de zero, a maioria das soluções são rejeitadas, permitindo apenas aquelas que melhorem a solução (Araújo, 2001). O código simplificado do algoritmo é representado no Quadro 1.

Quadro 1. Representação do Algoritmo SA

```
Parâmetros:
             T0 (temperatura inicial),
             Tf (temperatura final),
             Lk(número de iterações),
             α(redução de temperatura)
T←T0 ; (temperatura atual recebe temperatura inicial)
S0←gera solução inicial; S←S0; (solução atual)
S*←S0; (melhor solução obtida até o momento)
enquanto T > Tf faça (temperatura alta)
      para cont←1 até L(T) faça (iterações para equilíbrio)
             S' ← seleciona uma solução vizinha de S
             Δcusto ← custo(S') -custo(S);
             se Δcusto < 0
                    S ← S';
             senão
                    Numero_Random ← Rand[0..1];
                    se Numero_Random < exp(-Δcusto/T)
                           S ← S';
             se (S < S*) S* ← S (guardar o melhor estado)
      fim para T ← α T (reduz a temperatura)
fim-enquanto
Retorne S (melhor solução)|
```

Fonte: Freddo e Brito, 2008 (adaptado).

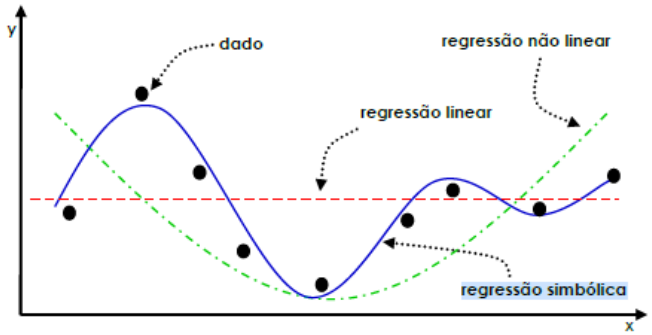
2.4 Regressão Simbólica

2.4.1 Definição

A Regressão Simbólica (RS) é uma técnica no âmbito do *machine learning* (aprendizado de máquina), que visa combinar expressões matemáticas simbólicas que descrevam uma relação entre as variáveis independentes de entrada (x_1, x_2, x_3, ..., x_n) e uma variável dependente

de saída (y), criando assim uma função *f*, tal que $f \in R$. Diferentemente da abordagem tradicional, onde a estrutura da equação é pré-definida e apenas os coeficientes são ajustados, a RS opera de forma não paramétrica e é baseada em dados, evitando formas funcionais predeterminadas e baseando-se exclusivamente nos dados para determinar o modelo ideal (Ren *et al*., 2024), permitindo não apenas identificar os coeficientes da função, mas a própria função (Morgon & Pereira, 2015).

Figura 4. Problemas de regressão



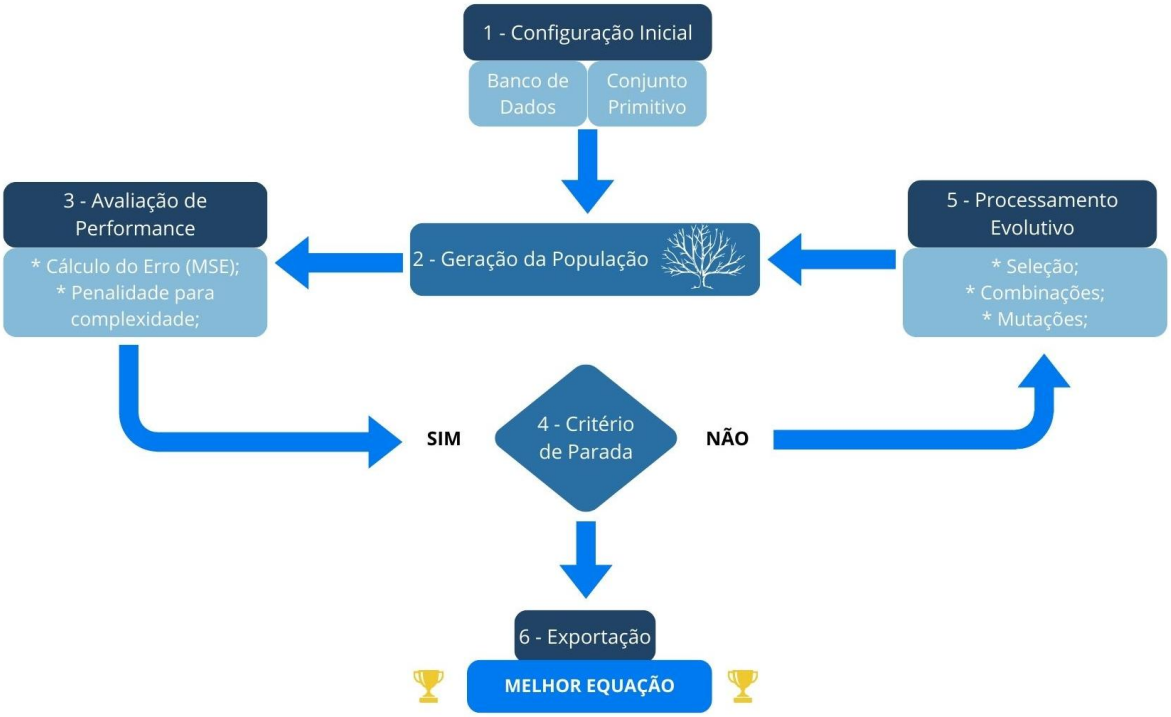
Fonte: Morgon & Pereira (2015).

Como ilustra na Figura 4, para solucionar um problema de regressão, o sistema que opera a técnica de regressão simbólica formulará hipóteses aproximadas, através do aprendizado e testes com os parâmetros de entrada, e encontrará uma função matemática que possa esclarecer a relação entre as variáveis dependentes e independentes (Tarawneh *et al*., 2019).

2.4.2 Processo de Funcionamento

O funcionamento da RS baseia-se na Programação Genética, fundamentada na estrutura clássica descrita por Koza (1992), e pode ser exemplificado na Figura 5 abaixo seguindo as etapas:

Figura 5: Representação do funcionamento da Regressão Simbólica.



Fonte: Autor.

Etapa 1 - Configuração Inicial: o banco de dados contendo as variáveis independentes (x_1, x_2, x_3, ..., x_n) e dependente (y) é construído. Além disso, ocorre a definição do conjunto primitivo, com a determinação de operadores e funções a serem utilizadas pelo algoritmo, (ex: aritméticas, trigonométricas, exponenciais, hiperbólicas, operadores booleanos);

Etapa 2 - Geração da População: é criada a primeira geração de funções "candidatas" de forma aleatória, criando formulações de diferentes complexidades, o que permite uma exploração mais ampla do espaço de busca desde o início do ciclo;

Etapa 3 - Avaliação de Performance: a função é testada com dados reais utilizando a estatística para medir o quão bem a expressão matemática mapeia as entradas para as saídas desejadas. Geralmente usa-se a métrica do Erro Quadrático Médio para avaliar a precisão, e o algoritmo define notas melhores para fórmulas mais precisas e mais simples;

Etapa 4 - Critério de Parada: é avaliada a necessidade de nova interação ou finalização da fórmula para exportação. Caso a função precisa ser melhorada o processo segue para obter melhores resultados, caso contrário o processo finaliza e a fórmula é exportada;

Etapa 5 - Processamento Evolutivo: nesta etapa acontece a "criação" da próxima geração de fórmulas. Ocorre inicialmente a seleção das funções com as melhores notas obtidas na Etapa 3, e essas fórmulas com menor erro e maior simplicidade têm maior probabilidade de transmitir suas características estruturais para as gerações seguintes. Após a seleção ocorre a combinação e mutações aleatórias, permitindo assim uma variedade de novas opções de

fórmulas. Uma nova geração de formulações será agora a nova população, que retornará para a Etapa 3;

Etapa 6 – Exportação: O ciclo de evolução das formulações repete-se , aumentando a precisão média das equações a cada novo processamento evolutivo. O processo é interrompido na Etapa 4 quando o critério de parada é atingindo, partindo para a Etapa 6, com a exportação da expressão com a maior aptidão encontrada ao longo de todo o processo.

2.5 Análise Estatística

2.5.1 Conceitos

Existem diversos métodos estatísticos voltados para avaliação da acurácia de modelos matemáticos aplicados à previsão de comportamentos físicos. Em geral, esses métodos fundamentam-se na análise da dispersão em torno de medidas de tendência central ou na verificação da magnitude do erro entre os valores estimados pelo modelo e pela profundidade real (Willmott *et al*., 1985). Assim, quanto menor for a dispersão em relação ao padrão de referência, maior será a precisão do modelo.

Na literatura não há consenso sobre qual método estatístico seria o mais adequado para cada tipo de análise (Chai & Draxler, 2014; Khoshvaght, *et al*., 2025). Por essa razão, o presente estudo reúne um conjunto de vinte e uma ferramentas frequentemente utilizadas em trabalhos de natureza semelhante (com a relação entre valores calculados e medidos de variáveis quaisquer). Para a interpretação correta das formulações apresentadas nos itens subsequentes, é necessário considerar as definições de média aritmética, desvio padrão e o Método Probabilístico Sintético que será utilizado para avaliar a classificação entre os métodos de capacidade de carga.

2.5.1.1 Média Aritmética (μ)

A média aritmética é uma medida de tendência central, ou seja, estima o valor central de um conjunto de dados. Calcula-se a soma total dos valores dos elementos e divide-se pelo número total de elementos, fornecendo uma visão do centro de distribuição, contudo essa medida não consegue capturar a magnitude e erros individuais quando aplicada em modelos complexos. Sua formulação apresenta-se na Equação (63) abaixo:

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{63}$$

Onde:

n = total de amostras analisadas;

y_i = é o valor individual de cada amostra.

2.5.1.2 Desvio Padrão (σ)

O desvio padrão trata-se de uma medida de dispersão que quantifica a variabilidade dos dados em relação à média aritmética. O uso dos dados para determinar o desvio padrão necessita de uma distribuição normal para a estimativa ser confiável. A formulação do desvio padrão pode ser observada na Equação (64) abaixo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \mu)^2} \tag{64}$$

Onde:

n = total de amostras analisadas;

μ = é a média aritmética da amostra;

y_i = é o valor individual de cada amostra.

2.5.1.3 Método Probabilístico Sintético (k)

O método probabilístico sintético foi proposto por Cherubini & Greco (1998), e avalia a confiabilidade de métodos utilizando-se a relação dos valores medidos (Q_m) e valores calculados (Q_c). Para a realização dessa análise utiliza-se o fator viés (k) que é definido a partir da razão entre Q_c e Q_m conforme a Equação (65):

$$k = \frac{Qc}{Qm} \tag{65}$$

Ao analisar um conjunto significativo desses fatores viés (k), o método permite extrair parâmetros estatísticos de tendência central para avaliar a acurácia do modelo e parâmetros de variabilidade para medir sua precisão. Valores de "k" maiores que 1 indicam que o modelo retornou previsões acima dos valores reais medidos, enquanto valores abaixo de 1 indicam previsões abaixo dos valores reais. Com base nesses critérios, foi definida os graus de conservadorismo do modelo, conforme Cherubini & Orr (2000) na Tabela 9:

Tabela 9. Escala de conservadorismo baseado no percentual dos valores de k.

Grau de Conservadorismo	k <1 (%)	Nível de Segurança do Modelo
5	80 - 100	Muito conservador
4	60 - 79	Conservador
3	40 - 59	Neutro
2	20 - 39	Não conservador

1	0 - 19	Pouco conservador

Fonte: Cherubini & Orr (2000) adaptado.

2.5.2 Coeficiente de Determinação (r^2)

O coeficiente de determinação, representado por r^2, quantifica a proporção da variância dos valores observados que é explicada pelo modelo. Varia entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 indicam maior aderência do modelo aos dados reais. Em análises de previsão de capacidade de carga, um r^2 elevado sugere boa capacidade preditiva e consistência do modelo.

$$r^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2} \quad (66)$$

Onde,

r^2 = coeficiente de determinação;

y_i = são os valores observados;

$\hat{y}_i$ = são os valores previstos pelo modelo;

$\bar{y}$ = é a média dos valores observados.

2.5.3 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)

O coeficiente NSE mede a eficiência de um modelo em reproduzir observações reais. Seu valor varia de $-\infty$ até 1, onde valores próximos a 1 indicam desempenho ótimo. Valores próximos a 0 indicam que o modelo não é mais eficiente do que a média dos dados, e valores negativos mostram que a média seria mais representativa que o modelo. A formulação do coeficiente NSE está expressa em:

$$NSE = 1 - [\sum_{i=1}^{n} \frac{(Q_{ci} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^{n} (\mu_{(Qm)} - Q_{mi})^2]} \quad (67)$$

Onde,

Q_{ci}= valor calculado (estimado) pelo modelo no instante i;

Q_{mi} = valor medido no instante i;

$\mu_{(Qm)}$= média aritmética dos valores medidos;

n = total de valores analisados.

2.5.4 Erro Absoluto Médio (MAE)

O MAE calcula a média dos valores absolutos das diferenças entre valores estimados e observados, conforme equação (68). Esse índice mostra a magnitude média do erro, sendo útil para identificar desvios globais, assim quanto menor o valor, maior a precisão do modelo.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - y'_i| \tag{68}$$

Onde,

n = número total de observações;

y_i = valor real observado;

y'_i = valor previsto pelo modelo.

2.5.5 Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)

O MAPE representa a média percentual dos erros absolutos em relação aos valores observados, indicando o erro em termos percentuais, permitindo melhor interpretação prática. Valores baixos significam boa capacidade de previsão, e geralmente ele não é indicado para análise de dados onde os valores de y_i sejam muito pequenos, para que a expressão não retorne valores sem sentido. Está definido na expressão (69):

$$MAPE\ (\%) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - y'_i}{y_i}\right| \tag{69}$$

2.5.6 Índice de Mielke Modificado (λ)

Esse índice foi proposto por Duveiller *et al.* (2016), e compara a dispersão entre valores observados e estimados, penalizando diferenças elevadas. O resultado varia de –1 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam forte concordância entre modelo e realidade.

$$\lambda = 1 - [\sum_{i=1}^{n}(Q_{mi} - Q_{ci})^2] / [\sum_{i=1}^{n}(Q_{mi} - \mu_{(Qm)})^2 + \sum_{i=1}^{n}(Q_{ci} - \mu_{(Qc)})^2 + n(\mu_{(Qm)} - \mu_{(Qc)})^2 + \kappa \tag{70}$$

$$\kappa = 0 \quad \text{para } r \geq 0$$

$$\kappa = \{\ 2\ x\ |\ \sum_{i=1}^{n}(Q_{mi} - \mu_{(Qm)})\ x\ (Q_{ci} - \mu_{(Qc)})| \quad \text{para } r < 0 \tag{71}$$

Para determinação do "κ", deve-se definir o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), calculado a partir da expressão:

$$r = \frac{\{n \sum_{i=1}^{n}(Q_{ci}Q_{mi}) - \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} \sum_{i=1}^{n} Q_{mi}\}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^{n} Q_{ci}^2 - (\sum_{i=1}^{n} Q_{ci})^2}\sqrt{n \sum_{i=1}^{n} Q_{mi}^2 - (\sum_{i=1}^{n} Q_{mi})^2}} \quad (72)$$

Onde,

$\mu_{(Qc)}$ = média aritmética dos valores calculados (estimados).

2.5.7 Índice de Concordância de Willmott (d)

O índice d mede a exatidão do modelo, avaliando a correspondência entre valores previstos e observados. Varia de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita). É amplamente usado em estudos hidrológicos e ambientais.

$$d = 1 - [\sum_{i=1}^{n}(Q_{ci} - Q_{mi})^2] \,/\, \sum_{i=1}^{n}(|Q_{ci} - \mu_{(Qm)}| + |Q_{mi} - \mu_{(Qm)}|)^2] \quad (73)$$

2.5.8 Índice a_{20}

O índice a_{20} é uma métrica de desempenho utilizada principalmente para avaliar modelos de regressão, e é baseada em um limiar de erro. Ela mede a proporção de dados simulados que não se desviam mais que 20% em relação aos dados reais, conforme a Equação (74) abaixo:

$$a_{20} = \frac{m_{20}}{n} \quad (74)$$

Onde:

n = número de amostras analisadas;

m_{20} = é o número de amostras em que a razão entre o valor previsto ($\hat{y}$) e o valor observado (y) conforme a Equação (75) abaixo. O valor deve estar entre 0,80 e 1,20 para ser considerado na contagem.

$$0{,}80 \leq \frac{\hat{y}}{y} \leq 1{,}20 \quad (75)$$

2.5.9 Índice de Performance (ρ)

O método foi proposto por Gandomi *et al*. (2011), visando avaliar a performance de modelos relacionando o Coeficiente de Correlação de Pearson com a análise de erros, através do RMSE

de forma conjunta. O coeficiente ρ varia de 0 a + ∞, onde os valores mais próximos de zero indicam uma melhor performance.

$$\rho = (RMSE / \mu_{(Qm)}) \times [1 / (r + 1)] \quad (76)$$

Onde,

r = é o Coeficiente de Correlação de Pearson, expresso na equação (72);

RMSE = é o método estatístico "Raiz do Erro Quadrático Médio", discutido no tópico 2.5.15.

2.5.10 Índice de Performance Modificado (ρ_{MOD})

O índice de Performance modificado faz algumas alterações no método original (item 2.5.9), correlacionando o método da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) com o Erro Absoluto Médio (MAE), conforme as Equações (77) e (78).

$$\rho_{MOD} = (RMSE / \mu) \times (\lambda + 1) \quad \text{para } \frac{RMSE}{MAE} \leq 1{,}25 \quad (77)$$

$$\rho_{MOD} = (MAE / \mu) \times (\lambda + 1) \quad \text{para } \frac{RMSE}{MAE} > 1{,}25 \quad (78)$$

2.5.11 Ranking Index (RI)

O Ranking Index avalia o posicionamento relativo dos erros ou índices estatísticos de um conjunto de modelos, permitindo ordenar os que apresentam maior eficiência. É útil em estudos comparativos de desempenho.

$$RI = |\mu_{\ln(k)}| + \sigma_{\ln(k)} \quad (79)$$

Onde,

$\mu_{\ln(k)}$ = é a média aritmética dos valores de ln (k);

$\sigma_{\ln(k)}$ = é o desvio padrão dos valores de ln (k).

2.5.12 Probabilidade Normal

A probabilidade normal é utilizada para verificar se a distribuição dos erros segue um comportamento gaussiano. Essa análise é essencial para validar pressupostos estatísticos aplicados em testes de significância e intervalos de confiança.

$$f(x) = [1/\sigma_k\sqrt{2\pi}\ x\ e^{[-0,5\left(\frac{x-\mu_k}{\sigma k}\right)^2]} \quad (80)$$

2.5.13 Probabilidade Log-Normal

Semelhante à anterior, a distribuição log-normal avalia a adequação de erros multiplicativos ou dados assimétricos. É frequentemente aplicada em dados geotécnicos que apresentam grande variabilidade.

$$f(x) = [1/(x\sigma_k\sqrt{2\pi})\ x\ e^{[-0,5\left(\frac{\ln(x)-\mu_{\ln(k)}}{\sigma \ln(k)}\right)^2]} \quad (81)$$

Onde:

σ_k = é o desvio padrão dos valores de k;

$\mu_{\ln(k)}$ = é a média aritmética dos valores de ln (k);

ln(x) = é o log natural de x;

$\sigma_{\ln(k)}$ = é o desvio padrão dos valores de ln (k).

2.5.14 Ranking Distance (RD)

O Ranking Distance mede a distância relativa entre modelos em termos de desempenho estatístico. É usado para classificar a qualidade preditiva, considerando diferenças entre múltiplos indicadores.

$$RD = \sqrt{[1-\mu_k]^2 + [\sigma_k]^2} \quad (82)$$

Onde:

μ = é a média aritmética do fator viés k (item 2.5.1.3);

σ_k = é o desvio padrão do fator viés k (item 2.5.1.3).

2.5.15 Raiz Do Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE calcula a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros, e indica o erro médio nas mesmas unidades dos dados. Valores baixos refletem boa precisão.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}((Q_{mi} - Q_{ci})^2} \quad (83)$$

Onde:

Q_{mi} = são os valores medidos;

Q_{ci} = são os valores calculados;
n = é o número total de amostras.

2.5.16 Índice de Referência (IR)

O índice de Referência IR é uma métrica formulada para fazer uma comparação de modelos preditivos. Ela é definida a partir da média aritmética dos resultados da Raiz do Erro Quadrático - RMSE (item 2.5.15), Erro Absoluto Médio - MAE (item 2.5.4) e o Erro Percentual Absoluto - MAPE (item 2.5.5), conforme a Equação (84) abaixo:

$$IR = \frac{RMSE+MAE+MAPE}{3} \tag{84}$$

2.5.17 Variância Explicada (VAF)

A variância explicada mede a proporção da variabilidade dos dados observados que é capturada pelo modelo. Em termos práticos, funciona de forma semelhante ao r^2, mas pode ser aplicada em análises multivariadas para avaliar a contribuição de cada componente principal.

$$VAF = [\ 1 - (var_{(Qm\ -\ Qc)} / var_{(Qm)})] \times 100 \tag{85}$$

Onde "var" são as variâncias amostrais e podem ser expressas nas equações (86) e (87) abaixo:

$$var_{(Qm\ -\ Qc)} = 1/(n\text{-}1) \times \sum_{i=1}^{n}[(Q_{mi} - Q_{ci}) - \mu_{(Qm-Qc)}]^2 \tag{86}$$

$$var_{(Qm)} = 1/(n\text{-}1) \times \sum_{i=1}^{n}[Q_{mi} - \mu_{(Qm)}]^2 \tag{87}$$

2.5.18 Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs)

A proposição de decompor o MSE em componentes sistemáticos foi difundido por Willmott (1985), pois segundo o autor, era necessário entender a necessidade de ajustes na lógica do cálculo do Erro Quadrático Médio. Quando o RMSEs apresenta valores próximos de zero, indica que o modelo está bem ajustado e que o erro remanescente é puramente aleatório e imprevisível. A expressão da métrica pode ser observada na equação (88) abaixo:

$$RMSEs = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(Q_i^* - Q_{mi})^2} \tag{88}$$

$$Q^*_i = a + b\ Q_{mi} \tag{89}$$

Onde,

a, b = são coeficientes de regressão linear entre Q_m e Q_c.

2.5.19 Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE)

O WMAPE é uma métrica de desempenho, e se difere do MAPE tradicional por ajustar o erro com base no peso de cada observação, garantindo uma maior precisão dos modelos de previsão.

$$\text{WMAPE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |Q_m - Q_c|}{\sum_{i=1}^{n} |Q_m|} \tag{90}$$

2.5.20 Índice de Legate & Mccabe (LMI)

É uma métrica estatística proposto como uma evolução do Coeficiente de Nash-Sutcliffe, buscando evitar a superestimação de valores extremos utilizando o valor absoluto. O índice busca medir o quanto os dados simulados se ajustam aos dados observados na realidade, onde quanto mais próximo o índice for de 1, mais ajustado a simulação é.

$$\text{LMI} = 1 - \sum_{i=1}^{n} |Q_m - Q_c| \; / \; \sum_{i=1}^{n} |Q_m - \mu_{(Qm)}| \tag{91}$$

2.5.21 Incerteza Expandida (U95)

A incerteza expandida é uma métrica de segurança no estágio final de um processo de medição e calibração. Ela permite a medição de um valor verdadeiro com nível de confiança em 95% a partir de um fator k_{95}. Sua formulação é obtida através da expressão (92):

$$U95 = k_{95}\, u_c \tag{92}$$

O fator u_c é a incerteza padrão combinada definida na equação (93):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[\frac{df}{dxi}\; x\; u_{(xi)}\right]^2} \tag{93}$$

Onde,

k_{95} = fator de abrangência para o nível de confiança de 95%;

*d*f = é a função que relaciona os valores de entrada com o valor principal de interesse;

dx_i = iésimo valor de entrada;

$u_{(xi)}$ = incerteza padrão associada ao valor de entrada.

2.5.22 Coeficiente de Concordância (CC)

O coeficiente de concordância foi proposto por Lin (1989), com o objetivo de medir a reprodutibilidade entre duas medições, relacionando precisão e acurácia. A expressão do coeficiente pode ser observada na equação (94):

$$CC = (2\sigma_{xy}) / \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2 \quad (94)$$

Onde,

σ_{xy} = covariância entre as duas medidas x e y;

σ_x, σ_y= variâncias de cada medida;

μ_x, μ_y = média aritmética de cada medida.

3. PROPOSTA DO MÉTODO

3.1 Base de Dados

Para desenvolver o Método Proposto, foi realizada a coleta de dados, obtidos em 200 casos de provas de carga, disponíveis na literatura, sendo composta por ensaios em modelos de tamanho real, realizados em campo e por ensaios em modelos reduzidos, realizados em laboratório. Essas informações foram retiradas de estudos de Golder (1941), Eastwood (1951), Rodin (1961), Meigh & Nixon (1961), Thornburn (1963), Bazaraa (1967), Subrahmanyam (1967), Muhs *et al*. (1969), Weiß (1970), Frost (1970), Muhs & Weiß (1971), Muhs & Weiß (1973), Levy & Morton (1974), Bergdahl *et al*. (1985), Ferreira, Peres e Ognebene (1986), Lin *et al*. (1987), Canepa & Depresles (1990), Adams & Collin (1997), Fonseca *et al*. (2003), Long (1998), Briaud & Gibbens (1999), Mestat & Berthelon (2001), Sales *et al.* (2001), Gandhi (2003) e Cerato (2005). Informações dos dados podem ser consultados na Tabela 10(1).

Tabela 10. Informações simplificadas dos dados utilizados no desenvolvimento do Método Proposto.

Número total de casos	**200**					
Parâmetros	**B (m)**	**D (m)**	**L/B (m)**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**	**q_{lim} (kPa)**
Média	0,50	0,14	2,04	15,56	38,72	469,79
Erro Padrão	0,03	0,02	0,13	0,19	0,27	31,56
Desvio Padrão	0,44	0,23	1,82	2,71	3,83	446,35
Variância	0,20	0,05	3,30	7,33	14,65	199227,18
Curtose	10,61	4,62	0,50	–0,21	0,01	5,91
Assimetria	2,48	2,21	1,48	0,51	–0,51	2,16
Amplitude	2,99	1,04	5,00	12,00	18,30	2833,00
Mínimo	0,03	0,00	1,00	8,60	28,00	14,00

Máximo	3,02	1,04	6,00	20,60	46,30	2847,00

[(1)]Para informações complementares, entre em contato pelo e-mail mirandadosanjos@gmail.com.
Fonte: Autor (2026).

A partir dos resultados das provas de carga, foi construído uma base de dados com informações geométricas das sapatas, como a menor dimensão da sapata (B), profundidade de embutimento (D), relação L/B, e informações geotécnicas do solo dos casos analisados como peso específico do solo (γ), ângulo de atrito (ϕ) e a capacidade de carga do solo (q_{lim}). Os histogramas referentes à distribuição dos parâmetros do banco de dados são apresentados no APÊNDICE I, permitindo avaliar a tendência e a frequência de ocorrência dos valores.

Como a estimativa da capacidade de carga considera os efeitos de diversos parâmetros da fundação e do solo de assentamento, no banco de dados criado e tratado, foram considerados como dados de entrada do algoritmo (B, D, L/B, γ e ϕ) e como dados de saída o valor q_{lim} (kPa), onde:

$$q_{lim} = f(B, D, L/B, \gamma, \phi) \quad (95)$$

Visto que o método proposto foi desenvolvido a partir dos dados fornecidos pelos autores, a Tabela 11 abaixo apresenta os intervalos de variação de cada parâmetro de entrada que definem a faixa de validade para a sua aplicação. Dessa forma, quanto maior for a divergência entre os valores de entrada usados no modelo e os intervalos apresentados, menor tende a ser a precisão das estimativas obtidas pelo método.

Tabela 11. Intervalo dos dados para aplicação do Método Proposto.

Fatores	**B (m)**	**D (m)**	**L/B**	**γ (kN/m³)**	**ϕ (º)**	**q_{lim} (kPa)**
Intervalo	0,003 – 3,016	0 – 1,04	1-6	8,6 – 20,6	28 – 46,3	14 – 2847,0

Fonte: Autor (2026).

3.2 Simulação e Treinamento do algoritmo SA com Regressão Simbólica

Com os parâmetros de entrada e saída consolidados (item 3.1), utilizou-se o software *TuringBot*, que é baseado no algoritmo *Simulated Annealing* e especializado em regressão simbólica, para as simulações e formulação da capacidade de carga proposta.

Durante o processo foram definidos os operadores e funções matemáticas para o mecanismo de simulação, que incluiu funções aritméticas, trigonométricas, exponenciais e hiperbólicas, conforme a Tabela 12:

Tabela 12. Funções definidas no mecanismo de simulação do método proposto no software *TuringBot*.

Aritméticas	**Trigonométricas**	**Exponenciais**	**Hiperbólicas**
Adição	sen(x)	e^x	senh(x)
Subtração	cos(x)	$\log_a(x)$	cosh(x)

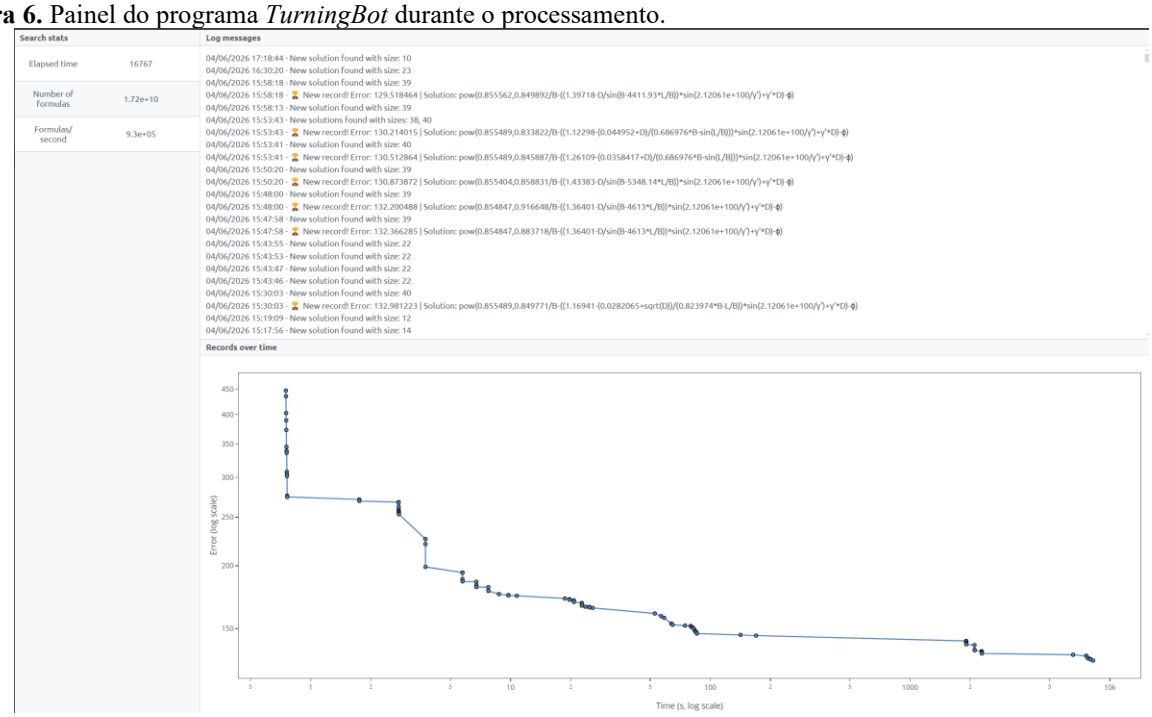
Multiplicação	tg(x)	$\log_2(x)$	tgh(x)
Divisão	arcsen(x)	$\log_{10}(x)$	arcsenh(x)
-	arccos(x)	$\sqrt{x}$	arccosh(x)
-	arctg(x)	x^y	arctgh(x)

Fonte: Autor (2026).

Para garantir o melhor desempenho do método, foi configurado no software a divisão da base de dados na proporção de 70% para treinamento e 30% para validação. Assim, 140 dados, selecionados aleatoriamente, foram utilizados para a construção e ajustes das expressões matemáticas, permitindo o algoritmo explorar diferentes combinações na busca por modelos que melhor representassem os dados. Os 60 dados restantes foram reservados para a validação das formulações geradas, possibilitando a avaliação do seu desempenho em dados não utilizados na etapa de construção da fórmula.

Após realizar as configurações e inserção da base de dados, o software foi executado, e com base no princípio de funcionamento do algoritmo *Simulated Annealing* (item 2.3) e da regressão simbólica (item 2.4), expressões matemáticas foram obtidas por meio da combinação de diferentes operadores e funções. Durante a execução, o algoritmo realizou a busca interativa no espaço de soluções, aceitando temporariamente determinadas formulações e promovendo sucessivas modificações em sua estrutura até identificar expressões com melhores desempenhos. Esse refinamento da formulação foi monitorado pela relação entre o tempo de execução e o erro.

Figura 6. Painel do programa *TurningBot* durante o processamento.



Fonte: Autor (2026).

Conforme apresentado na Figura 6, à medida que as interações avançaram, a variação do erro reduziu-se progressivamente, indicando a convergência do processo de otimização. Durante a evolução do algoritmo, a exploração do espaço de busca tornou-se mais criteriosa, priorizando pequenas modificações nas formulações candidatas e concentrando-se no refinamento das soluções mais promissoras com o uso de métricas estatísticas calculadas automaticamente pelo programa, o que resultou em reduções sucessivamente menores do erro.

Como o programa funciona com um processo interativo de exploração do espaço de soluções, a geração de novas formulações poderia prosseguir indefinidamente. Assim, para definir a equação final, foram estabelecidos critérios de parada que conciliassem o desempenho estatístico, representatividade física e complexidade da expressão obtida. Para isso, a formulação selecionada deveria apresentar coeficiente de determinação (r^2) no mínimo superior a 0,90, além de contemplar todos os parâmetros de entrada, os quais deveriam estar expressos na equação pelo menos uma vez, conforme a Equação (95).

Por fim, concluído o processo, a formulação que melhor atendeu os critérios previamente estabelecidos é apresentada na Equação (96) como Método Proposto, enquanto a Figura 7 apresenta o painel com os indicadores estatísticos obtidos, e a baixa dispersão dos dados calculados, comprovando o atendimento aos critérios de parada definidos.

$$q_{lim} = 1,18062\left(\phi - 0,716277x\left(\left(\frac{2,89}{0,0894857 + B + 0,434812\,x\,D}\right) - \left(\gamma + \left(5,00792 - \frac{L}{B}\right)x\tanh^{-1}\left(\cos\left(-0,56942 + (-0,999308) + \frac{L}{B}\right)x(\phi + B)\right)\right)xD\right)\right) \quad (96)$$

Onde:

B = é a largura da base, expressa em metros (m);

D = é a profundidade de embutimento, expressa em metros (m);

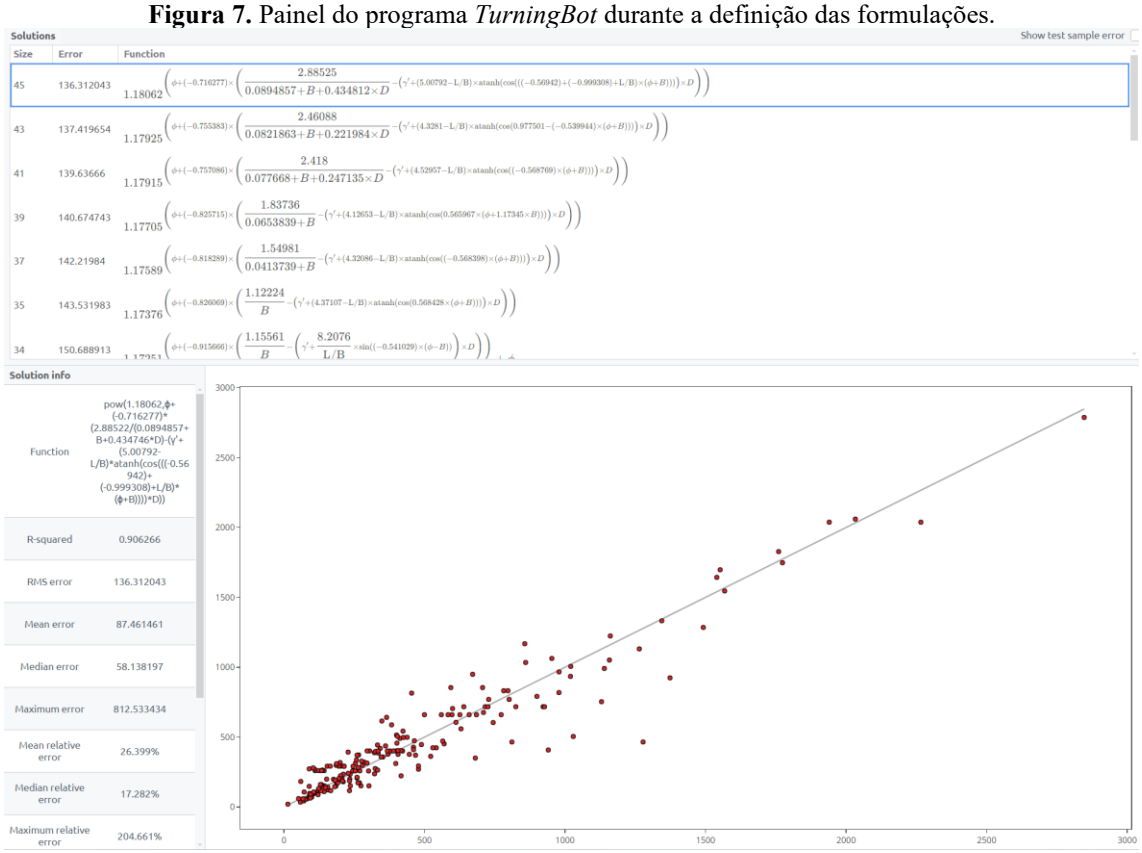
L = é o comprimento da base, expressa em metros (m);

γ = é o peso específico do solo, expresso em quilonewton por metro cúbico (kN/m³);

ϕ = é o ângulo de atrito entre os grãos, expresso em graus (º); e

q_{lim} = é capacidade de carga, expressa em quilopascal (kPa).

Figura 7. Painel do programa *TurningBot* durante a definição das formulações.



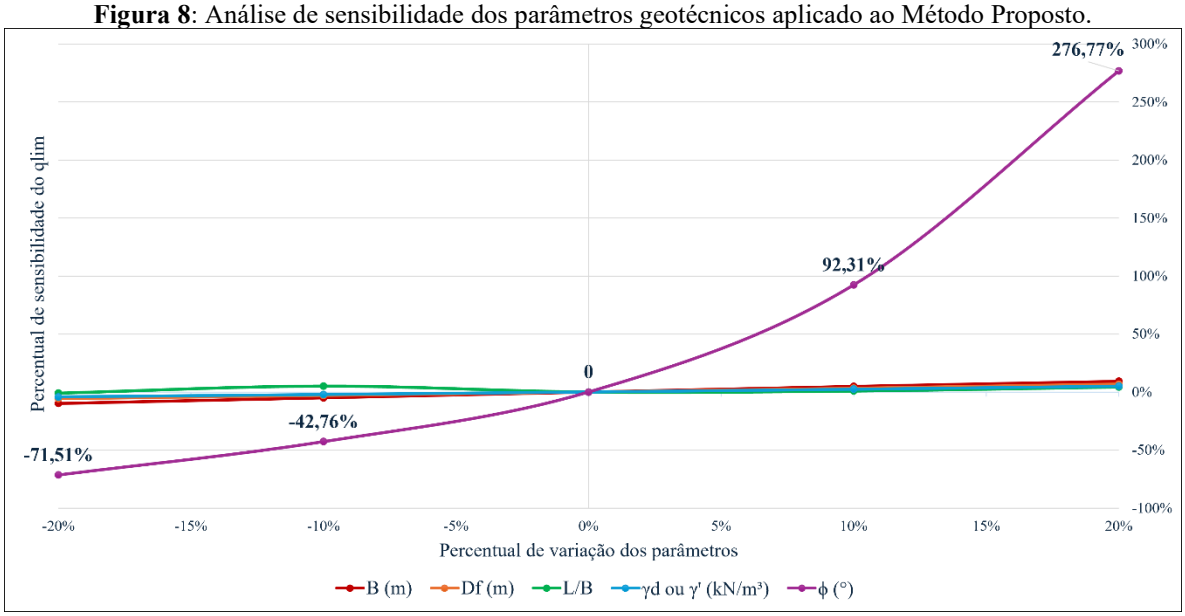
Fonte: Autor (2026).

3.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros do método proposto

Foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica local do tipo "*One-At-a-Time*" (OAT) para verificar a influência de cada parâmetro de entrada do banco de dados sobre as estimativas do Método Proposto. Para isso, foram conduzidas simulações em que cada parâmetro foi perturbado individualmente em ±10% , e posteriormente, em ±20%, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Em cada simulação, foi calculada de forma correspondente a variação da capacidade de carga (q_{lim}). A sensibilidade dos parâmetros foi definida a partir da média dos valores obtidos para cada nível de perturbação, conforme ilustrado na Figura 8. O

resultado completo das simulações aplicados nos 200 casos estão apresentados no APÊNDICE II.

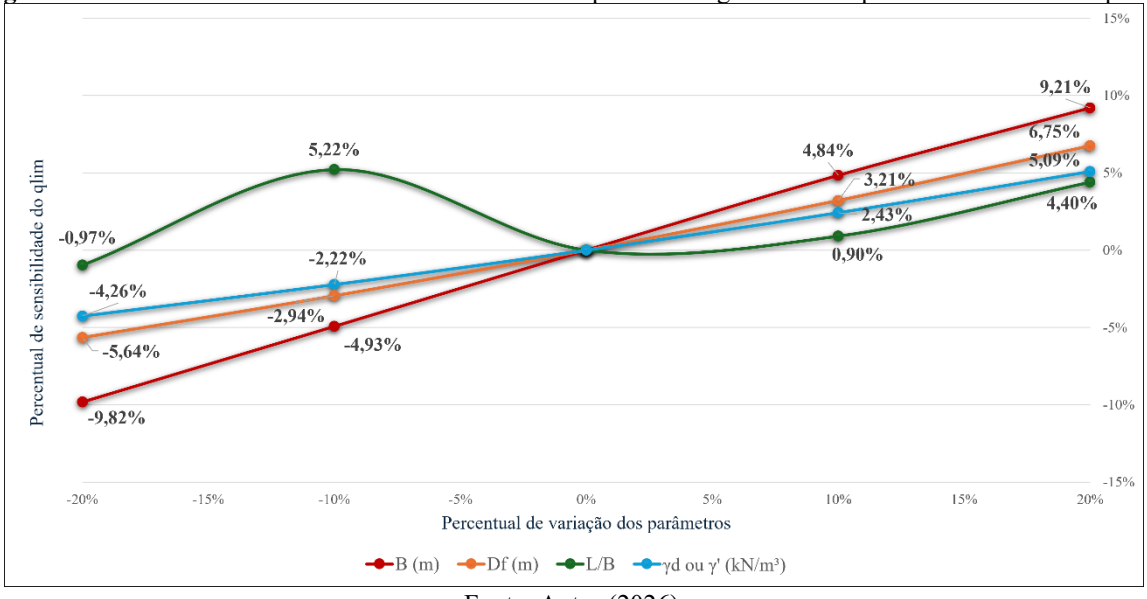
Figura 8: Análise de sensibilidade dos parâmetros geotécnicos aplicado ao Método Proposto.



Fonte: Autor (2026).

Observa-se que o ângulo de atrito (ϕ) apresentou a maior sensibilidade, indicando ser o parâmetro de maior influência na resposta do modelo. Por ser um expoente base na formulação do Método Proposto, pequenas variações nesse parâmetro podem provocar alterações expressivas na capacidade de carga estimada, justificando sua predominância na análise de sensibilidade. Essa alta influência é observada também nos métodos clássicos, no qual o ângulo de atrito controla diretamente os fatores de capacidade de carga, especialmente N_q e N_γ, os quais apresentam comportamento altamente não linear em função de ϕ.

Figura 9: Análise de sensibilidade detalhada dos demais parâmetros geotécnicos aplicado ao Método Proposto.



Fonte: Autor (2026).

Isolando o ângulo de atrito para verificar o comportamento mais detalhado dos demais parâmetros, conforme a Figura 9, a influência de sensibilidade foi menos expressiva. A largura da base da sapata (B) apresentou comportamento linear, com variações entre -9,82% a 9,21% para perturbações ±20%. A influência moderada também foi observada nos comportamentos de embutimento (D), no peso específico do solo (γ) e na razão L/B.

4. VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Com a formulação proposta devidamente estabelecida, foi realizada uma avaliação comparativa de seu desempenho em relação aos métodos teóricos, heurísticos e às formulações combinadas desenvolvidas neste estudo. Para isso, os métodos foram submetidos às mesmas condições de avaliação, considerando o intervalo de parâmetros comum a todas as formulações analisadas, bem como a aplicação das 21 métricas estatísticas apresentadas nos itens 2.5.2 a 2.5.22.

4.1 Modelos de referência para validação

4.1.1 Métodos teóricos selecionados

Foram selecionados os métodos teóricos clássicos de estimativa da capacidade de carga apresentados nos itens 2.2.1, os quais constituem referências consolidadas na literatura geotécnica. Além das formulações originais, considerou-se duas variações do método de Shiraishi, denominadas Shiraishi Modificado I (SHR_mod I) e Shiraishi Modificado II (SHR_mod II). Na variação SHR_mod I, foi aplicada a correção proposta pelo autor apenas no fator N_γ, (Equação 17) enquanto no SHR_mod II, a correção foi aplicada exclusivamente ao fator N_q (Equação 16). Essas variações foram desenvolvidas a fim de avaliar, de forma isolada, a influência das correções propostas por Shiraishi na estimativa da capacidade de carga, uma vez que o método original contempla modificações simultâneas em ambos os fatores.

4.1.2 Formulações combinadas para análise comparativa

Conforme discutido no tópico 2.2.1.9, com o objetivo de analisar a influência do fator Nγ na previsão da tensão limite, foram elaboradas formulações combinadas a partir da associação entre a expressão geral de determinados métodos clássicos e fatores Nγ provenientes de outros métodos propostos na literatura. Em razão do elevado número de combinações possíveis, foram selecionadas apenas aquelas que, avaliadas previamente com ferramentas da estatística,

apresentaram os melhores desempenhos na estimativa capacidade de carga. As formulações combinadas podem ser observadas na Tabela 13 abaixo:

Tabela 13. Combinações entre expressão geral e fórmula do Nγ de diferentes métodos.

Métodos combinados	Expressão Geral	Nγ
Vèsic – Bolton & Lau (VSC-B&L_II)	Vèsic	Bolton & Lau (1993)
Poulos - Bolton & Lau (PLS-B&L_II)	Poulos	Bolton & Lau (1993)
Poulos - Zhu & Michalowski (PLS-Z&M)	Poulos	Zhu & Michalowski (2005)
Vèsic - Kumbhojkar (VSC-KUMB)	Vèsic	Kumbhojkar (1993)
Poulos - Jahanandish *et al* (PLS-JHND)	Poulos	Jahanandish *et al* (2010)
Vèsic - Wang *et al* (VSC-W_II)	Vèsic	Wang *et al* (2001)
Poulos – Kumar (PLS-KM_II)	Poulos	Kumar (2003)

Fonte: Autor (2026).

4.1.3 Métodos heurísticos selecionados

Também foram selecionados os métodos heurísticos apresentados nos itens 2.2.2.1 a 2.2.2.6, permitindo assim a comparação do Método Proposto com modelos desenvolvidos com técnicas computacionais de previsão semelhante, complementando a análise realizada com os métodos teóricos.

4.2 Análise estatística comparativa

Os parâmetros do banco de dados foram selecionados, considerando-se apenas os casos que atendessem aos intervalos dos métodos comparados, o que resultou em 176 casos disponíveis (APÊNDICE III). Em seguida, o desempenho de cada método foi avaliado por meio da aplicação das vinte e uma ferramentas estatísticas apresentadas nos itens 2.5.2 a 2.5.22. O resultado individual para cada métrica estatística aplicada nos métodos analisados, podem ser verificados no APÊNDICE IV.

Com base nos resultados obtidos, foi realizado um ranqueamento a partir do somatório das posições alcançadas por cada método em cada ferramenta estatística. Dessa forma, o método mais preciso seria aquele que apresentasse o menor valor do somatório de posições. Ou seja, um valor de vinte e um indica que o método foi classificado em primeiro lugar em todas as vinte e uma métricas aplicadas. O ranqueamento final entre os métodos pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14. Ranqueamento Estatístico dos Métodos.

Ordem	Método	k	Soma	Ordem	Método	k	Soma
1	**Método Proposto**	**44%**	**24**	14	L&K-SSA	57%	290
2	PLS-B&L_II	52%	118	15	PLS	74%	333
3	POOR,V	57%	119	16	KHR	41%	344
4	PLS-Z&M	55%	146	17	Z&X-MNLR	51%	356

5	VSC-B&L_II	52%	146	18	BHN	80%	364
6	VSC-W_II	51%	147	19	KLN	40%	381
7	PLS-KM_II	54%	156	20	L&K-GOA	64%	424
8	PLS-JHND	58%	162	21	SHR	84%	437
9	VSC-KUMB	53%	163	22	Z&X-MLR	47%	438
10	SADRO	54%	180	23	SHR_mod II	68%	449
11	SHR_mod I	64%	213	24	MYH	28%	466
12	VSC	60%	238	25	Z&M	22%	486
13	TZI	52%	251	26	VBR	100%	527

Fonte: Autor (2026).

Conforme observado na Tabela 14, o Método Proposto apresentou a menor pontuação (24 pontos) no somatório de posições, o que indica que teve o melhor desempenho na variedade de ferramentas estatísticas aplicadas. Das vinte e uma ferramentas, ele ficou classificado em primeiro lugar em dezoito, o que garantiu uma diferença significativa para o outro método heurístico (Método de Poor com 119 pontos).

Na Tabela 15 é apresentado a listagem das métricas e as respectivas posições do Método proposto em cada uma delas. Apenas nas métricas MAPE, Probabilidade Normal e Ranking Distance (RD) o método não alcançou a primeira colocação, mas ficou em segundo lugar o que indica um equilíbrio dos resultados medido no banco de dados e o calculado pelo método.

Tabela 15. Listagem de todas as métricas estatísticas e a respectiva posição do Método Proposto.

Métrica estatística	**Posição**	**Métrica estatística**	**Posição**
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	1ª	Variância Explicada (VAF)	1ª
Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (E)	1ª	Coeficiente de concordância	1ª
Índice de Performance	1ª	Coeficiente de Determinação (r^2)	1ª
Índice de Referência (IR)	1ª	Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)	2ª
Incerteza Expandida (U95)	1ª	Ranking Index (RI)	1ª
Índice de Performance Modificado	1ª	Probabilidade LogNormal (P_ln)	1ª
Erro Absoluto Médio (MAE)	1ª	Índice a20	1ª
Índice de Concordância de Willmott (d)	1ª	Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs)	1ª
Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE)	1ª	Probabilidade Normal (P)	2ª
Índice de Legate & McCabe (LMI)	1ª	Ranking Distance (RD)	2ª
Índice de Mielke Modificado	1ª		

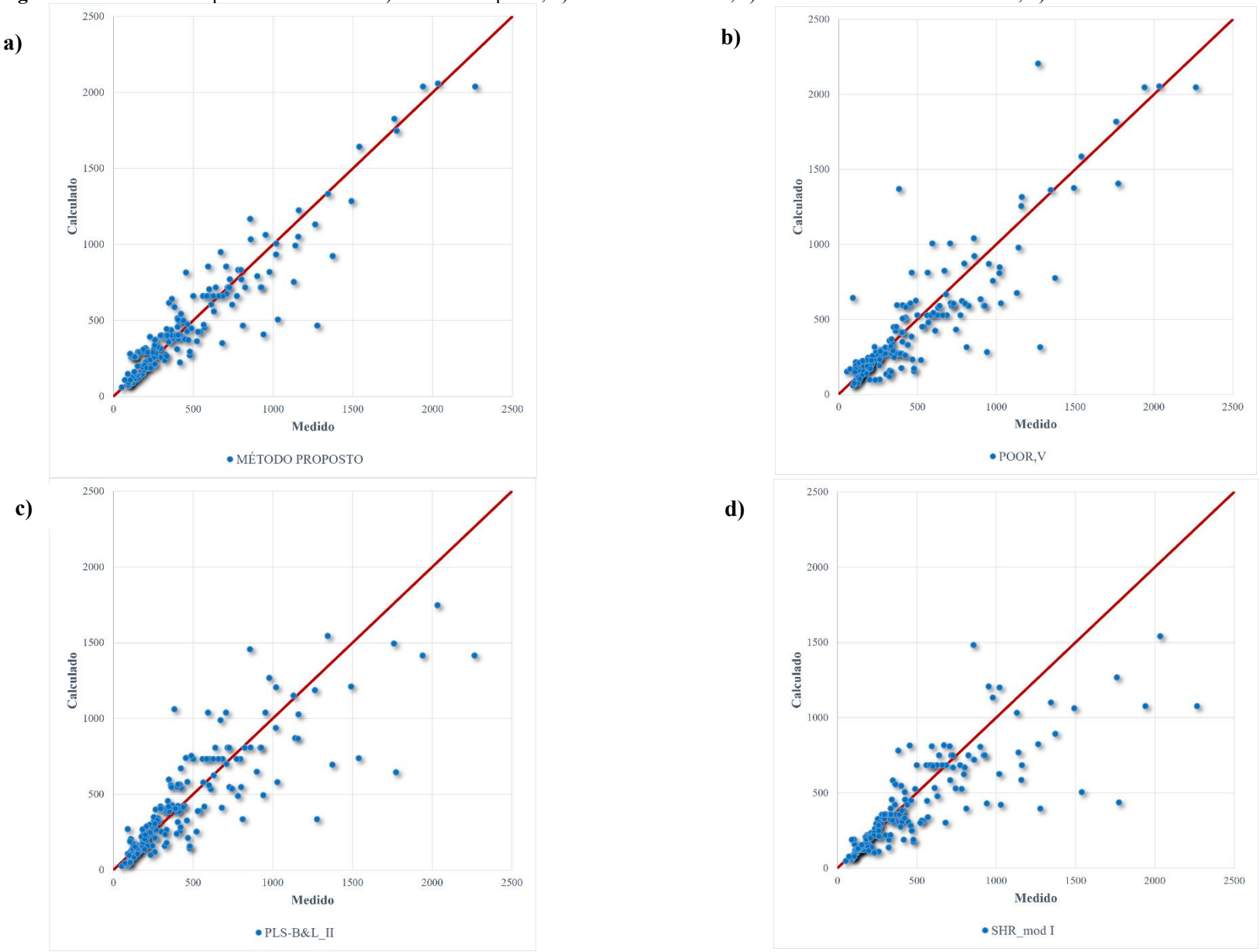
Fonte: Autor (2026).

Para efeito de comparação, é apresentado na Figura 10 as relações calculado/medido entre o método teórico, método combinado e método heurístico mais bem colocados no ranking da Tabela 14, com o proposto. Nota-se que o método proposto (Figura 10.a) é o que mais se adequa ao conjunto de dados, e conforme o método probabilístico sintético “k” (item 2.5.1.3) que relaciona os valores calculados e medidos, o Método Proposto apresentou um comportamento

neutro com k igual a 44%, o que evita o superdimensionamento de sapatas, mas também garante a segurança do projeto.

Destaca-se ainda, o bom desempenho da formulação combinada Poulos – Bolton & Lau que obteve 118 pontos (2º lugar) no ranqueamento geral. O resultado evidencia que a combinação de métodos pode ser uma alternativa eficaz para aprimorar resultados de capacidade de carga de métodos clássicos, aproximando suas estimativas de comportamento experimental observado nos ensaios de campo.

Figura 10. Análise de dispersão de métodos. a) Método Proposto; b) Método Poor *et al*.; c) Método Poulos– Bolton & Lau; d) Método Shiraishi modificado I.



Fonte: Autor (2026).

4.3 Análise crítica do Método Proposto

O Método Proposto consiste em uma formulação desenvolvida para estimar a capacidade de carga de fundações superficiais em solos não coesivos, buscando superar limitações observadas nos métodos teóricos tradicionais e nas formulações heurísticas disponíveis na literatura. Nesse contexto, torna-se pertinente realizar uma análise crítica da formulação proposta, especialmente no que se refere à sua estrutura matemática, expressa na Equação (96).

A formulação apresenta uma estrutura relativamente complexa, caracterizada pela presença da função tangente hiperbólica inversa e pelo predomínio de termos exponenciais. Essa configuração é resultado do processo de regressão simbólica, cujo objetivo foi estabelecer um equilíbrio entre a complexidade da expressão e a acurácia dos resultados, priorizando o desempenho estatístico sem comprometer a representatividade física do modelo.

Embora a formulação seja mais elaborada do que as formulações clássicas, sua utilização é simplificada pelo fato de ser composta por uma única expressão, dispensando o emprego de equações complementares e fatores de correção frequentemente exigidos pelos métodos tradicionais. Essa característica reduz a possibilidade de propagação de erros decorrentes da aplicação sucessiva de diferentes formulações ou de interpretações errôneas na escolha dos coeficientes de correção.

Como limitações, destaca-se que o Método Proposto foi desenvolvido e validado a partir de um conjunto específico de dados experimentais. Dessa forma, sua aplicação deve restringir-se aos intervalos utilizados durante o desenvolvimento da formulação, apresentados na Tabela 11.

Além disso, a pesquisa não é aplicável a solos coesivos, uma vez que foi concebida exclusivamente para estimar a capacidade de carga de fundações superficiais em solos não coesivos. Assim, a utilização da formulação fora das especificidades estabelecidas ou em condições geotécnicas específicas representadas no banco de dados pode comprometer a confiabilidade das estimativas.

4.3.1 Análise do Método Proposto Simplificado

Devido à complexidade estrutural da formulação original (96), foi proposta, como complemento à análise crítica, uma versão simplificada (97). Essa simplificação consistiu na realização de ajustes algébricos de baixa complexidade, incluindo o arredondamento de constantes e a reescrita via identidade da função $tanh\text{-}1 = ln|cotg(\theta/2)|$, resultando na equação abaixo:

$$\text{qlim} = 1,18\left(\phi - 0,72\,x\left(\left(\frac{2,89}{0,09 + B + 0,43\,x\,D}\right) - \left(\gamma + \left(5 - \frac{L}{B}\right)x\,\ln\left|\,cotg\left(\frac{\left(\frac{L}{B} - 1,57\right)x\,(\phi + B)}{2}\right)\right)xD\right)\right) \quad (97)$$

Com isso, realizou-se uma análise do erro percentual da formulação simplificada em relação à formulação original proposta. Em seguida, a análise estatística comparativa foi repetida, incluindo a formulação reduzida, com o objetivo de avaliar o impacto das simplificações no desempenho preditivo do método para estimativa da capacidade de carga. Os resultados indicaram que a formulação simplificada apresentou erro médio de apenas 2,57% e coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,993, evidenciando que as simplificações introduzidas não comprometeram significativamente a capacidade preditiva do modelo.

Tabela 16. Ranqueamento Estatístico incluindo o Método Proposto Simplificado

Ordem	Método	k	Soma	Ordem	Método	k	Soma
1	Método Proposto	44%	**29**	15	L&K-SSA	57%	310
2	**Método Proposto Simplificado**	**51%**	**41**	16	PLS	74%	354
3	PLS-B&L_II	52%	139	17	KHR	41%	365
4	POOR,V	57%	140	18	Z&X-MNLR	51%	377
5	PLS-Z&M	55%	167	19	BHN	80%	385
6	VSC-B&L_II	52%	167	20	KLN	40%	402
7	VSC-W_II	51%	168	21	L&K-GOA	64%	445
8	PLS-KM_II	54%	177	22	SHR	84%	458
9	PLS-JHND	58%	183	23	Z&X-MLR	47%	459
10	VSC-KUMB	53%	184	24	SHR_mod II	68%	470
11	SADRO	54%	201	25	MYH	28%	487
12	SHR_mod I	64%	231	26	Z&M	22%	507
13	VSC	60%	259	27	VBR	100%	548
14	TZI	52%	272				

Fonte: Autor (2026).

Conforme a Tabela 16, no ranqueamento geral incluindo o método simplificado, este ficou na 2ª colocação geral com 41 pontos, perdendo apenas para o método original. Analisando individualmente as classificações, a formulação simplificada ficou em 1º lugar nas métricas Ranking Index (RI) e Probabilidade Log Normal (P_ln), superando o método proposto, enquanto nas demais métricas ocupou a 2ª posição, com exceção do índice a20, onde ficou classificada na 3ª colocação. Informações detalhadas da análise de erro e os ranqueamentos individuais das métricas com o Método Proposto Simplificado podem ser obtidas no APÊNDICE V.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do algoritmo *Simulated Annealing* com uso de regressão simbólica mostrou-se eficiente para a formulação de um método alternativo de capacidade de carga em fundações superficiais, assentadas em solos não coesivos. Nas análises estatísticas realizadas, o Método Proposto apresentou o melhor desempenho entre as 26 formulações avaliadas, as quais incluíram métodos teóricos clássicos consolidados na literatura, formulações combinadas e métodos heurísticos, estes últimos normalmente caracterizados por maior acurácia devido à utilização de técnicas computacionais de otimização.

Embora a formulação tenha sido obtida por um algoritmo de otimização, a análise de sensibilidade demonstrou que o modelo preserva a coerência física esperada para o problema estudado. O ângulo de atrito (ϕ) foi identificado como o parâmetro de maior influência sobre a capacidade de carga, comportamento compatível com a teoria clássica das fundações superficiais, na qual esse parâmetro controla diretamente os fatores de capacidade de carga N_q e N_γ.

Entre os métodos heurísticos empregados com exceção do proposto no estudo, o Método de Poor *et al*. (2015) apresentou o melhor desempenho, totalizando 119 pontos no ranqueamento geral. Embora não tenha alcançado a primeira colocação em nenhuma das métricas utilizadas, apresentou boa consistência entre os indicadores estatísticos, o que permitiu um desempenho equilibrado na análise de eficiência.

Entre os métodos combinados, o método Poulos – Bolton & Lau (PLS-B&L_II) totalizou 118 pontos, ficando acima do método heurístico mais bem colocado (Método de Poor *et al*). De maneira geral, as formulações combinadas assumiram as melhores posições comparado aos teóricos, o que demonstra que a combinação de fatores de capacidade de carga provenientes de diferentes formulações clássicas pode constituir uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho preditivo dessas equações.

Os métodos teóricos tradicionais concentraram-se nas posições inferiores do ranqueamento. O método Shiraishi Modificado I , melhor classificado entre eles, apresentou uma diferença de 189 pontos em relação ao Método Proposto, evidenciando que, embora essas formulações permaneçam importantes como base conceitual da Mecânica dos Solos, suas simplificações e hipóteses de desenvolvimento podem limitar a precisão das estimativas quando aplicadas a um conjunto amplo e heterogêneo de dados experimentais.

Sob a perspectiva da prática da engenharia, resultados mais precisos e fundamentados em parâmetros confiáveis podem contribuir para uma definição mais adequada dos coeficientes de segurança, permitindo a otimização de projetos e a redução de custos sem comprometer a

segurança e a confiabilidade das obras. Nesse contexto, os resultados propostos reforçam o potencial de regressão simbólica como ferramenta promissora para o desenvolvimento de novos modelos em engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, H. A. **ALGORITMO SIMULATED ANNEALING**: Uma nova abordagem. Dissertação de Mestrado (Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

AKBAS, S. O; KULHAWY, F. H. Axial Compression of Footings in Cohesionless Soils. II: Bearing Capacity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 11, p. 1575-1582. 2009.

ANJOS, G. J. M. Fundações superficiais. Apostila da disciplina de fundações I. Universidade Federal do Pará, Belém, 2025.

BASTOS, P.S.S. **Sapatas de Fundação.** Notas de aula. Acessado em 25/08/2025, https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Sapatas.pdf.

BAZARAA, A. R. S. S. **Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlements of Shallow Foundations on Sand.** Ph.D. thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1967.

BENDRISS, F.; HARICHANE, Z.; AFRA, H. Reliability study of dynamic bearing capacity of foundations via monte Carlo Simulations. **Conference: 8ème Symposium International sur la construction en zone sismique.** Em 10 e 11 de outubro de 2018.

BERGDAHL, U.; HULT, G.; OTTOSSON, E. Calculation of settlements of footings in sands. **Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Balkema, Rotterdam, v. 4, p. 2167-2170. 1985.

BOLTON, M. D., LAU, C. K. Vertical bearing capacity factors for circular and strip footings on Mohr–Coulomb soil. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 30, n. 6, p. 1024-1033. 1993. DOI: https://doi.org/10.1139/t93-099.

BRIAUD, J. L.; GIBBENS, R. **Large-scale load tests and data base of spread footings on sand**. 1997.

BRIAUD, J. L.; GIBBENS, R.; 1999. **Behaviour Of Five Large Spread Footings In Sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v.125 (9), 787–796.

CANEPA, Y.; DEPRESLES, D. **Fondations superficielles: essais de chargement de semelles établies sur une couche de sable en place, station expérimentale de Labenne.** Rapport FAER 1.17.02.09, LREP, 1990 (citado por Briaud & Gibbens, 1997).

CERATO, A. B.; 2005. **Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity On Granular Material**, Ph.D. dissertation, University of MASSACHUSETTS AMHERST, 38.

CERATO, A. B.; LUTENEGGER, A. J.;2007. **Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Material.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133 (10), p. 1192-1202.

CHAI, T.; DRAXLER, R.R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geosci. Model Dev**, v. 7, 1247–1250, 2014.

CHERUBINI, C. & GRECO, V. R. (1998). A Comparison Between "Measured" And "Calculated" Values in Geotechnics. Em **Proceedings Of The 21st International Conference on Probabilities and Material (PROBAMAT)**: 481-498.

CHERUBINI, C.; ORR, T. L. L. A rational procedure to compare measured and calculated values in geotechnics. **Proceedings of the International Symposium IS-Yokohama**, Yokohama, Japão, 2000.

DAĞLI, E. Comparing Bearing Capacity Factor Nγ of Finite Element Method with Analytical Methods for Sandy Soils. **European Journal of Science and Technology,** v. 36, p. 67 - 72. 2022.

DAVIS, E. H.; BOOKER, J. R. The Bearing Capacity of Strip Footings from the Standpoint of Plasticity Theory. In: 1ª Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, 1971, Melbourne. **Proceedings**... [S.l.]: [s.n.], 1971.

DUVEILLER, G.; FASBENDER D.; MERONI, M. Revisiting the concept of a symmetric index of agreement for continuous datasets. **Scientific Reports**, v. 6, n. 194401. 2016. DOI: 10.1038/srep19401.

EASTWOOD, W.; 1951. A Comparison of the bearing power of Footings on dry and inundated sand. **Structural Engineering** 29 (1), 332.

FERREIRA, R.C., PERES, J. E. E., OGNEBENE, W. A determinação da Capacidade de Carga de Solos Porosos Através da Resistência à Penetração do Cone (CPT), para Projeto de Fundações Rasas. In: VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1986. **Anais**, Porto Alegre/RS, 1986, p. 201-212.

FREDDO, A. R.; BRITO, R. **Implementações do Simulated Annealing para o problema do Caixeiro Viajante Simétrico**. 2008. Relatório Digital. Disponível em: https://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/SimulatedAnnealingTSP.pdf

GANDHI G. N.; 2003. **Study Of Bearing Capacity Factors Developed From Laboratory Experiments On Shallow Footings On Cohesionless Soils**. PhD thesis, Shri G.S. Institute of Tech and Science, Indore (MP).

GANDOMI, A. H.; YANG, X.-S.; ALAVI, A. H. Mixed variable structural optimization using Firefly algorithm. **Computers and Structures**, v. 89, p. 2325–2336, 2011.

GOLDER, H. Q.; 1941. The Ultimate Bearing Pressure Of Rectangular Footings. **J. of the Institution of Civil Engineers** 17, 161–174.

HANSEN, J. B. A revised and extended formula for bearing capacity. **Danish Geoteknisk Institut**, Bulletin n. 28, Copenhagem, 1970, p. 5-11.

IBRAHIM, A. S.; IDRIS, A.; MUSA, A. A. **Predicting Of Ultimate Bearing Capacity from Shear Strength Parameters Using Artificial Neural Network**. Em: International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 2022. p. 1584-1591. v. 4. DOI: 10.35629/5252-040915841591.

JAHANANDISH, M.; VEISKARAMI, M.; GHAHRAMANI, A. Effect of Stress Level on the Bearing Capacity Factor, *N*γ, by the ZEL Method. **KSCE Journal of Civil Engineering**. v. 14, n. 5, p. 709-723. 2010. DOI: 10.1007/s12205-010-0866-1.

KALINLI, A.; ACAR, M. C.; GUNDUZ, Z. New Approaches to Determine The Ultimate Bearing Capacity Of Shallow Foundations Based On Artificial Neural Networks And Ant Colony Optimization. Elsevier. **Engineering Geology**, 117. 29-38. 2011.

KHAJEHZADEH, M.; KEAWSAWASVONG, S.; NEHDI, M.L. Effective Hybrid Soft Computing Approach for Optimum Design of Shallow Foundations. Em: **Sustainability**, 2022, 14, 1847. https://doi.org/10.3390/su14031847.

KHORRAMI, R.; DERAKHSHANI, A.; MOAYEDI, H. New explicit formulation for ultimate bearing capacity of shallow foundations on granular soil using M5' model tree. Measurement, v. 163, n. 108032. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108032.

KHOSHVAGHT, H.; PERMALA, R. R.; RAZMJOU, A,; KHIADANI M. A critical review on selecting performance evaluation metrics for supervised machine learning models in wastewater quality prediction. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.13, 119675. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119675.

KOZA, J. R. *Programação Genética: Sobre a Programação de Computadores por Meio da Seleção Natural* . Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

KUMAR, J. Seismic bearing capacity factors for spread foundation. Geotechnique, v.53, n. 4, p.445-446. 2003. DOI: 10.1680/geot.53.4.445.37318.

KUMBHOJKAR, A. S. Numerical Evaluation of Terzaghi's Nγ. **Journal of Geotechnical Engineering**. v. 119, n. 3. 1993. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:3(598).

LIN, L. I. K. **A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility**. Biometrics, 1989, v. 45, p. 255-268.

LIU, Y.; LIANG, Y. Integrated machine learning for modeling bearing capacity of shallow foundations. Em: **Scientific Reports**, 2024. v. 14. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58534-5.

LAWAL, A. I.; KWON, S. Development of mathematically motivated hybrid soft computing models for improved predictions of ultimate bearing capacity of shallow. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v.15, p. 747–759. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.04.005

MEIGH, A. C.; NIXON, I. K. Comparison of in-situ tests for granular soils. **Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Paris, v. 1, p. 499-508. 1961.

MESTAT, P.; BERTHELON, J. Finite element modeling of shallow foundation tests at the Labenne site. **Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 234, p. 37-67. 2001.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of State Calculations b Fast Computing Machines. **The Journal of Chemical Physics**, v. 21, n. 6, p. 1087 – 1092. 1953.

MEYERHOF, G. G. The Ultimate Bearing Capacity Of Foundations. **Geotechnique**, v.2, p. 301-332, 1951.

MEYERHOF, G. G. **The ultimate bearing capacity of foundations on slopes - La force portante des foundations sur talus**, Canadian Geotechnical Journal, V.1, n.1m p. 16-26, 1963.

MORGON, R.; PEREIRA, S. L. Regressão Simbólica com seleção por amostragem. Boletim Técnico. 2015. Disponível em: http://bt.fatecsp.br/system/articles/995/original/BT%20-%20(Morgon%20&%20Pereira,%202015)%20Regress%C3%A3o%20Simb%C3%B3lica%20com%20Sele%C3%A7%C3%A3o%20por%20Amostragem.pdf

MOTRA, H. B.; STUTZ, H.; WUTTKE, F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations, **Soils and Foundations**, v.56, n.2, p. 265-276, 2016.

MUHS, H.; ELMIGER, R.; WEIB, K.; 1969. Sohlreibung Und Grenztragfähigkeit Unter Lotrecht Und Schräg Belasteten Einzelfundamenten. **Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO),** Berlin.HEFT 62.

MUHS, H.; WEIB, K.; 1971. Untersuchung Von Grenztragfähigkeit Und Setzungsverhalten Flachgegründeter Einzelfundamente Im Ungleichförmigennichtbindigen Boden. **Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO)**, Berlin. HEFT 69.

MUHS, H.; WEIB, K.; 1973. **Inclined Load Tests On Shallow Strip Footings**. Proceedings of the 8th international conference on soil mechanism and foundation engineering, Vol. II, pp. 173–179.

PADMINI, D.; ILAMPARUTHI, K.; SUDHEER, K. P. Ultimate bearing capacity prediction of shallow foundations on cohesionless soils using neurofuzzy models. **Computers and Geotechnics**, [S.l.], v. 35, n. 1, p. 33-46, 2008.

PEI, T.; LUO, N. Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations Using Physically Constrained Neural Networks. Em: **Geotechnical Frontiers** 2025, 2025. *Anais*.. Reston: Sociedade Americana de Engenheiros Civis, 2025. p. 11-20. DOI: 10.1061/9780784485989.002.

PRANDTL, L. **Uber Die Harte Plasticher Korper**. Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Gottigen, Math. Phys. Klasse. (apud Terzaghi, 1943).

POOR, A. T.; BARARI, A.; BEHNIA, M.; NAJAFI, T. Determination of the Ultimate Limit States of Shallow Foundations using Gene Expression Programming (GEP) Approach. **Soils And Foundations**, v.55, n.3, p. 650-659. 2015.

POULOS, H. G.; CARTER, J. P.; SMALL, J. C. Foundations and retaining structures – research and practice. **In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15., 2001, Istanbul. Proceedings...** Istanbul: ISSMGE, 2001. (Theme Lecture).

RANKINE, W. J. M. II. On the stability of loose earth. **Philosophical Transactions**, v. 147, p. 9-27. 1857. DOI: https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0003

REISSNER, H. Zum Erddruckproblem. In: **International Congress of Applied Mechanics**, 1., 1924, Delft. Proceeding. Delf: International Congress Of Applied Mechanics, 1924. p. 295-311.

REN, Z.; WANG, D.; KONDO, G. Axial compressive capacity prediction and optimal design of circular UHPC-filled steel tube based on Hybrid Symbolic Regression – Neural Network model. **Structures**, v. 68, n. 107084. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107084.

RODIN, S. Experiences with penetrometers, with particular reference to the standard penetration test. **Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Paris, v. 1, p. 517-521. 1961.

SALES, M.M.; CUNHA, R.P.; FARIAS, M.M.; PEREIRA J. H. F. Efeito da pré-inundação nos resultados de provas de carga de sapatas e estacas na argila porosa de Brasília. In: 4º Simpósio Brasileiro de solos não-saturados, 2001. Anais...Porto Alegre/RS, 2001. P. 399-415.

SADROSSADAT, E.; SOLTANI, F.; MOUSAVI, S., M.; MARANDI, S., M.; ALAVI, A. H. A new design equation for prediction of ultimate bearing capacity of shallow foundation on granular soils. **Journal Of Civil Engineering and Management**, v. 19, p. 78-90. 2013.

SHAH, J.; ALAM, M.; JAVED, F.; UMAR, M.; AHMAD, F. Comparative performance evaluation of machine learning models for predicting the ultimate bearing capacity of shallow foundations on granular soils. **Scientific Reports**, v. 15, n. 36525. 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-13926-z

SHAO, W.; YUE, W.; ZHANG, Y.; ZHOU, T.; ZHANG, Y.; DANG, Y.; WANG, H.; FENG, X.; CHAO, Z. The Application of Machine Learning Techniques in Geotechnical Engineering: A Review and Comparison. **Mathematics**, v. 11, n. 3976. 2023, DOI: https://doi.org/10.3390/math11183976

SHIRAISHI, S. Variation in bearing capacity factors of dense sand assessed by model loading tests. **Soils and Foundations**, v. 30, n. 1, p. 17-26. 1990.

SOBÓTKA, M.; ŁYDŻBA, D.; RÓŻAŃSKI, A. Shape Optimization of Underground Excavation by Simulated Annealing. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v.35, n. 1, p. 209 – 218. 2013. DOI: 10.2478/sgem-2013-0016.

SUBRAHMANYAM, G. The Effect Of Roughness Of Footings On Bearing Capacity. **Journal of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering** v. 6, p. 33–45.1967.

TAGHVAMANESH, S.; MOAYED, R. Z. A Review on Bearing Capacity Factor Nγ of Shallow Foundations with Different Shapes. **International Scholarly and Scientific Research & Innovation**, v. 13, n. 9. 2019.

TARAWNEH, B.; BODOUR, W. A; AJMI, K. A. Intelligent Computing Based Formulas to Predict the Settlement of Shallow Foundations on Cohesionless Soils. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 13, p. 1 – 9. 2019. DOI: 10.2174/1874149501913010001

TERZAGHI, K. **Theorical Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

UZIELLI, M.; NADIM, F.; PHOON K.; LACASSE, S. Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice. **Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils**, v. 3. 2006. DOI: 10.1201/NOE0415426916.ch3

BAARS, S. V. **100 Years of Prandtl's Wedge**. Amsterdam: IOS Press, 2018.

VESIC, A. S. Analysis Of Ultimate Loads Of Shallow Foundations. **Journal Soil Mechanics And Foundations Division**, ASCE, v. 99, n. SM1, 1973.

WANG, Y. J.; YIN, J. H.; CHEN, Z. Y. Calculation of bearing capacity of a strip footing using an upper bound method. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. v. 25, n. 8, p. 841-851. 2001. DOI: 10.1002/nag.151.

WEIB, K., 1970. Der Einfluß Der Fundamentform Auf Die Grenztragfähigkeit Flachgegründeter Fundamente. **Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik** (DEGEBO), Berlin. HEFT 65.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n.5, p. 8995 – 9005. 1985.

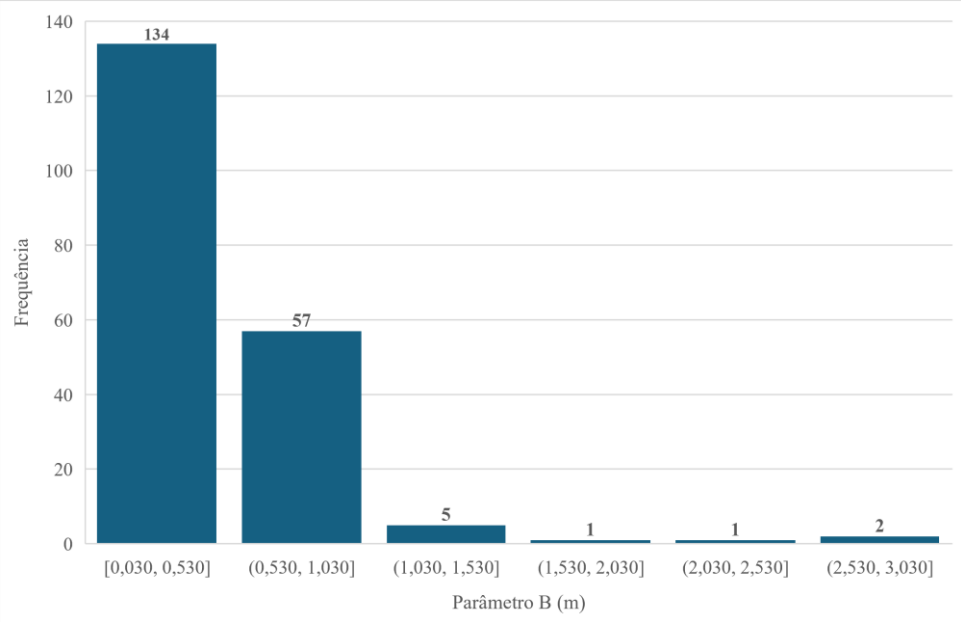
XI, L; JIN, L.; JI, Y.; LIU, P.; WEI, J. Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Soil–Cement Mixed Pile Composite Foundation Using SA-IRMO-BPNN Model. **Mathematics**, v. 12, n. 1701. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/math12111701

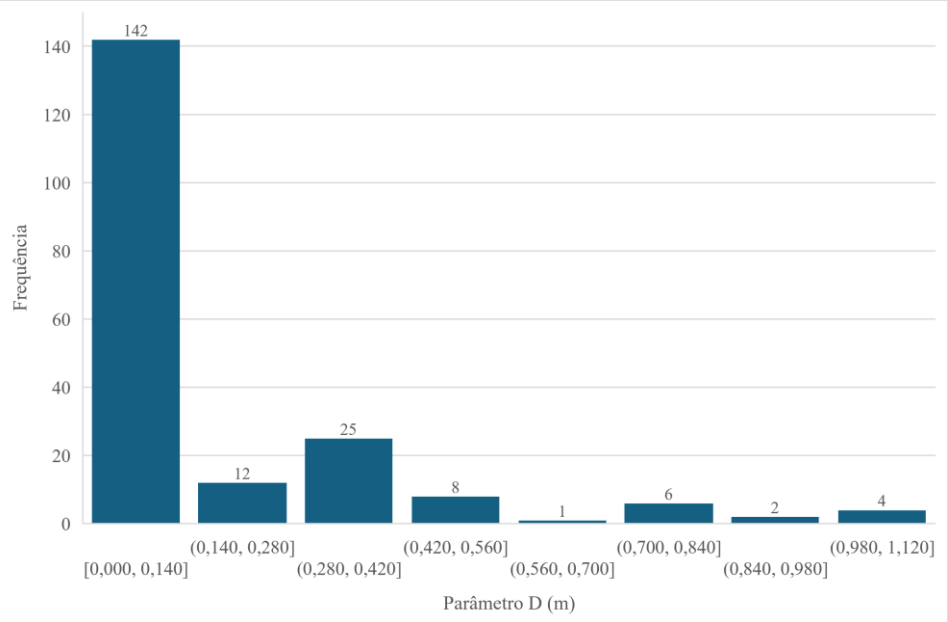
ZHANG, R.; XUE, X. Determining ultimate bearing capacity of shallow foundations by using multi expression programming (MEP). **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 115, p. 105255. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105255

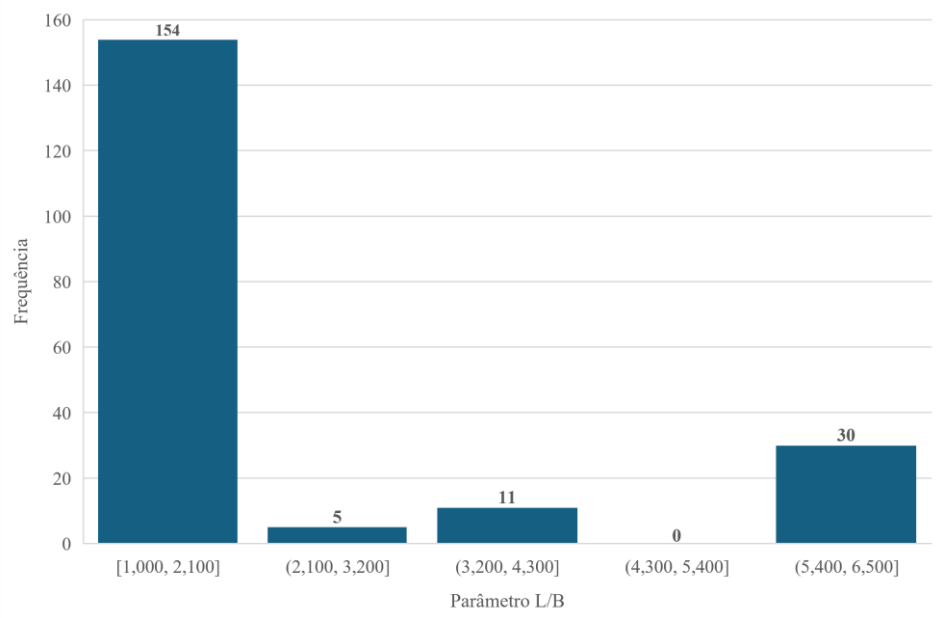
ZHANG, Z.; LIN, M.; HAN, B.; DAI, S. Prediction of local scour depth around cylindrical piles: Using simulated annealing algorithm and ensemble learning. **Ocean Engineering**, v. 330, n. 121221. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121221

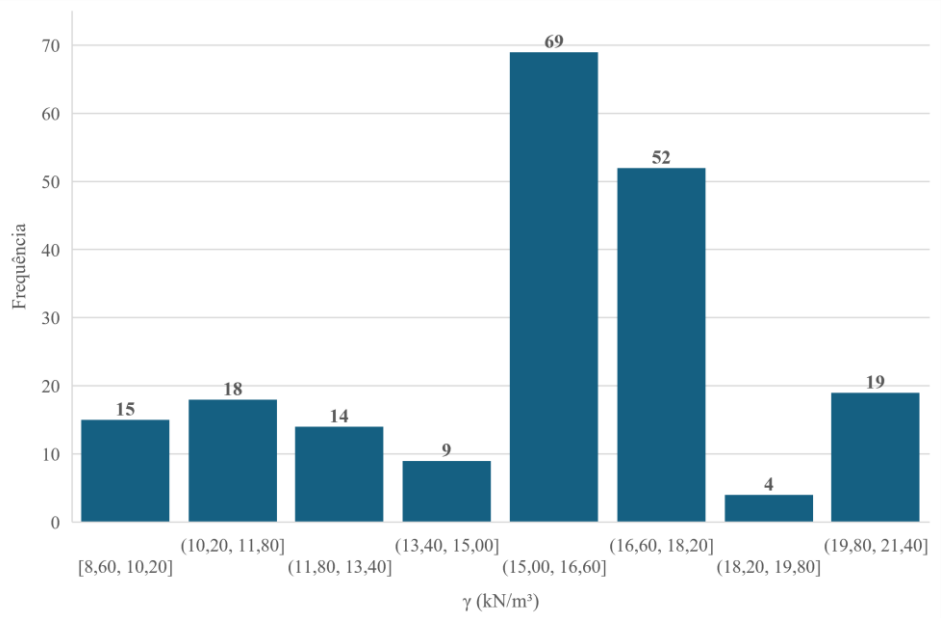
ZHU, M.; MICHALOWSKI, R. L. Shape Factors for Limit Loads on Square and Rectangular Footings. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.131, n. 2, p. 223 – 231. 2005. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(223)

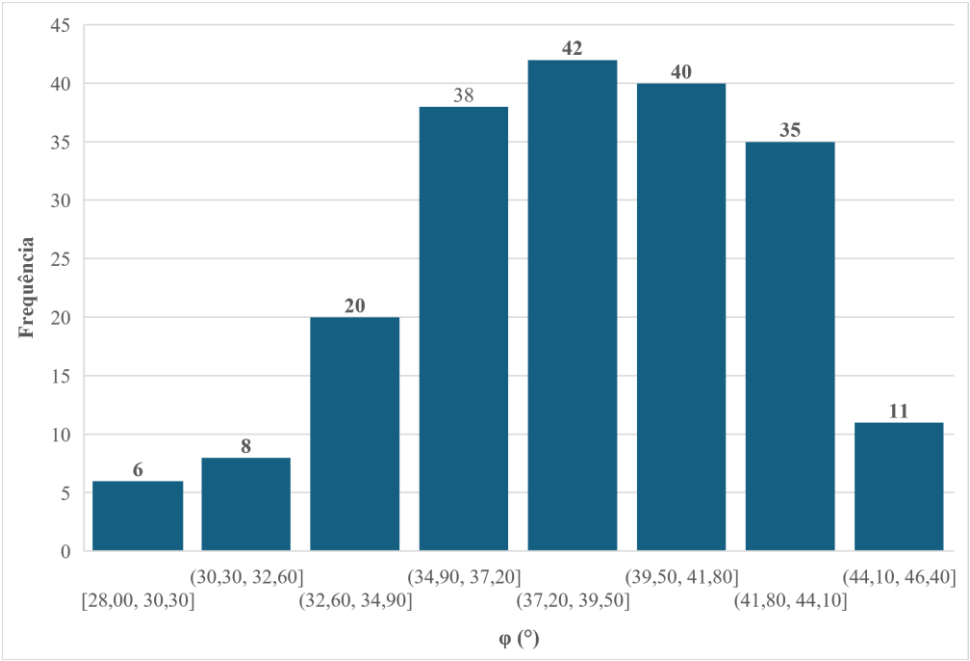
APÊNDICE I

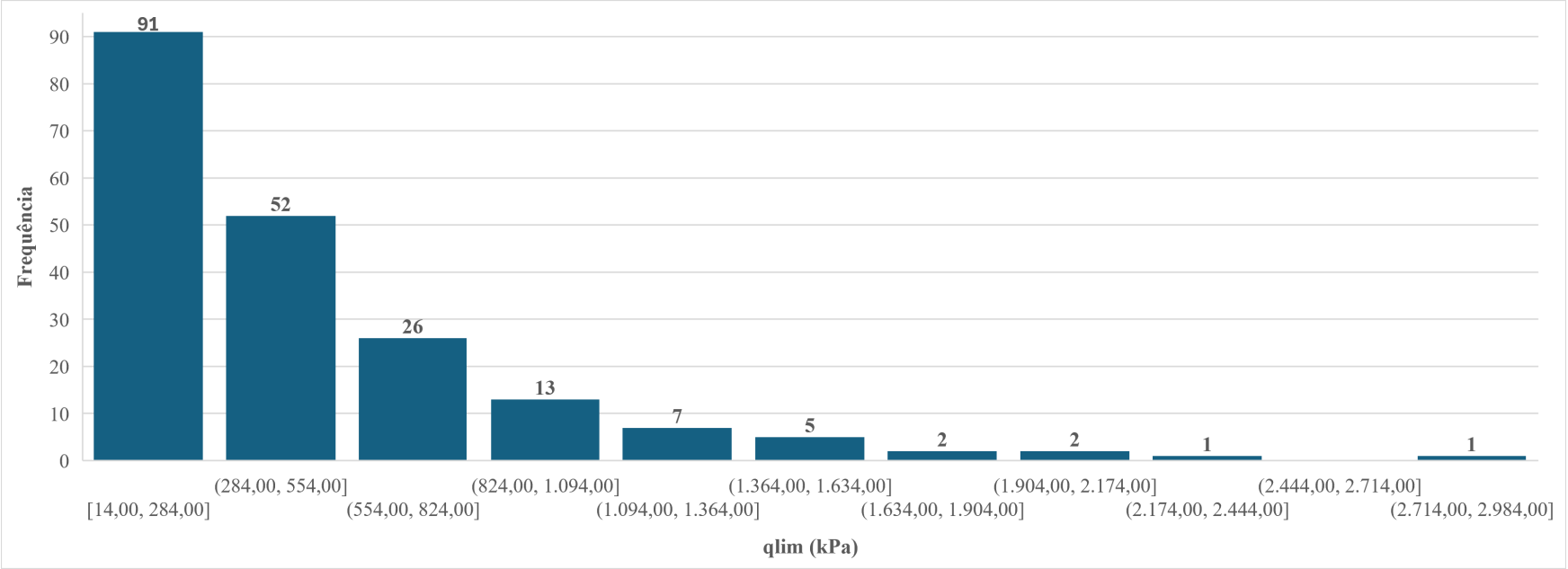

Frequência
Parâmetro B (m)
[0,030, 0,530]
(0,530, 1,030]
(1,030, 1,530]
(1,530, 2,030]
(2,030, 2,530]
(2,530, 3,030]
134
57
5
1
1
2


Frequência
Parâmetro D (m)
[0,000, 0,140]
(0,140, 0,280]
(0,280, 0,420]
(0,420, 0,560]
(0,560, 0,700]
(0,700, 0,840]
(0,840, 0,980]
(0,980, 1,120]
142
12
25
8
1
6
2
4


Frequência
Parâmetro L/B
[1,000, 2,100]
(2,100, 3,200]
(3,200, 4,300]
(4,300, 5,400]
(5,400, 6,500]
154
5
11
0
30


Frequência
γ (kN/m³)
[8,60, 10,20]
(10,20, 11,80]
(11,80, 13,40]
(13,40, 15,00]
(15,00, 16,60]
(16,60, 18,20]
(18,20, 19,80]
(19,80, 21,40]
15
18
14
9
69
52
4
19


Frequência
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
6
8
20
38
42
40
35
11
[28,00, 30,30]
(30,30, 32,60]
(32,60, 34,90]
(34,90, 37,20]
(37,20, 39,50]
(39,50, 41,80]
(41,80, 44,10]
(44,10, 46,40]
φ (°)


Frequência
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
91
52
26
13
7
5
2
2
1
1
[14,00, 284,00]
(284,00, 554,00]
(554,00, 824,00]
(824,00, 1.094,00]
(1.094,00, 1.364,00]
(1.364,00, 1.634,00]
(1.634,00, 1.904,00]
(1.904,00, 2.174,00]
(2.174,00, 2.444,00]
(2.444,00, 2.714,00]
(2.714,00, 2.984,00]
qlim (kPa)

APÊNDICE II

Resultados obtidos pela simulação da análise de sensibilidade "*One-At-a-Time*", conforme apresentado no tópico 3.3.

	Variação dos dados da largura da base B [1]							
	-20%		- 10%		+ 10%		+ 20%	
Caso	$B^{(1)}$	$q_{lim}^{(2)}$	B	$q_{lim}^{(2)}$	$B^{(1)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$B^{(1)}$	$q_{lim}^{(2)}$
1	0,480	244,106	0,540	252,079	0,660	264,269	0,720	268,796
2	0,480	286,332	0,540	303,258	0,660	330,915	0,720	342,338
3	0,480	417,613	0,540	435,829	0,660	467,082	0,720	480,631
4	0,480	930,791	0,540	985,814	0,660	1075,720	0,720	1112,851
5	0,480	1715,102	0,540	1775,046	0,660	1872,132	0,720	1911,673
6	0,400	259,479	0,450	276,897	0,550	305,854	0,600	317,991
7	0,400	259,479	0,450	276,897	0,550	305,854	0,600	317,991
8	0,400	259,479	0,450	276,897	0,550	305,854	0,600	317,991
9	0,400	259,479	0,450	276,897	0,550	305,854	0,600	317,991
10	0,400	259,479	0,450	276,897	0,550	305,854	0,600	317,991
11	0,416	265,301	0,468	282,643	0,572	311,362	0,624	323,359
12	0,400	333,767	0,450	343,213	0,550	355,596	0,600	358,730
13	0,400	389,864	0,450	407,714	0,550	438,680	0,600	452,224
14	0,400	389,864	0,450	407,714	0,550	438,680	0,600	452,224
15	0,400	418,632	0,450	438,737	0,550	473,989	0,600	489,601
16	0,416	449,631	0,468	471,180	0,572	510,233	0,624	528,647
17	0,400	231,007	0,450	246,514	0,550	272,294	0,600	283,098
18	0,400	231,007	0,450	246,514	0,550	272,294	0,600	283,098
19	0,400	231,007	0,450	246,514	0,550	272,294	0,600	283,098
20	0,400	235,684	0,450	251,083	0,550	276,657	0,600	287,360
21	0,400	242,736	0,450	257,188	0,550	284,121	0,600	295,488
22	0,400	285,236	0,450	295,450	0,550	327,112	0,600	340,745
23	0,400	353,476	0,450	366,085	0,550	386,135	0,600	394,011
24	0,400	353,476	0,450	366,085	0,550	386,135	0,600	394,011
25	0,400	372,486	0,450	372,228	0,550	415,847	0,600	435,114
26	0,400	436,148	0,450	454,527	0,550	487,550	0,600	502,483
27	0,400	496,937	0,450	478,437	0,550	543,068	0,600	572,207
28	0,400	738,577	0,450	788,157	0,550	870,580	0,600	905,124
29	0,400	738,577	0,450	788,157	0,550	870,580	0,600	905,124

	Variação dos dados de embutimento $D^{(2)}$							
	-20%		- 10%		+ 10%		+ 20%	
	$D^{(3)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$D^{(3)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$D^{(3)}$	q_{lim}	$D^{(3)}$	$q_{lim}^{(2)}$
	0,240	246,206	0,270	252,424	0,330	265,161	0,360	271,685
	0,000	317,991	0,000	317,991	0,000	317,991	0,000	317,991
	0,240	422,347	0,270	437,079	0,330	467,795	0,360	483,804
	0,000	1033,704	0,000	1033,704	0,000	1033,704	0,000	1033,704
	0,240	1633,667	0,270	1727,797	0,330	1931,373	0,360	2041,358
	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246
	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246
	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246
	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246
	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246	0,000	292,246
	0,000	297,882	0,000	297,882	0,000	297,882	0,000	297,882
	0,240	339,017	0,270	344,740	0,330	356,129	0,360	361,801
	0,240	394,770	0,270	409,147	0,330	439,063	0,360	454,626
	0,240	394,770	0,270	409,147	0,330	439,063	0,360	454,626
	0,240	419,314	0,270	437,874	0,330	477,030	0,360	497,677
	0,240	445,760	0,270	468,017	0,330	515,458	0,360	540,727
	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179
	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179
	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179
	0,010	263,747	0,012	264,195	0,014	265,093	0,016	265,543
	0,023	268,803	0,026	269,895	0,032	272,087	0,035	273,188
	0,102	299,428	0,114	304,613	0,140	315,179	0,152	320,562
	0,240	351,079	0,270	363,816	0,330	390,314	0,360	404,095
	0,240	351,079	0,270	363,816	0,330	390,314	0,360	404,095
	0,240	359,587	0,270	373,750	0,330	403,379	0,360	418,873
	0,400	421,719	0,450	446,116	0,550	498,251	0,600	526,097
	0,400	440,270	0,450	468,254	0,550	528,634	0,600	561,190
	0,000	831,845	0,000	831,845	0,000	831,845	0,000	831,845
	0,000	831,845	0,000	831,845	0,000	831,845	0,000	831,845

30	0,400	1995,397	0,450	2016,524	0,550	2056,397	0,600	2073,697
31	0,400	1995,397	0,450	2016,524	0,550	2056,397	0,600	2073,697
32	0,400	2688,945	0,450	2741,645	0,550	2824,810	0,600	2857,569
33	0,400	1969,037	0,450	2017,331	0,550	2095,513	0,600	2126,733
34	0,400	1248,805	0,450	1271,700	0,550	1283,460	0,600	1252,394
35	0,400	231,007	0,450	246,514	0,550	272,294	0,600	283,098
36	0,400	231,007	0,450	246,514	0,550	272,294	0,600	283,098
37	0,400	354,360	0,450	367,000	0,550	387,101	0,600	394,996
38	0,400	437,968	0,450	456,423	0,550	489,584	0,600	504,579
39	0,400	380,150	0,450	405,669	0,550	448,093	0,600	465,873
40	0,400	916,834	0,450	955,610	0,550	1024,411	0,600	1055,334
41	0,800	654,028	0,900	665,875	1,100	685,126	1,200	692,636
42	0,800	521,034	0,900	541,749	1,100	574,276	1,200	587,269
43	0,793	1263,447	0,892	1446,447	1,090	2537,274	1,189	2708,262
44	2,403	1075,415	2,704	997,746	3,304	879,762	3,605	830,714
45	1,991	1227,144	2,240	1127,031	2,738	989,921	2,987	937,721
46	1,194	3215,264	1,343	1983,309	1,641	1460,267	1,790	1340,369
47	2,413	1447,789	2,714	1323,584	3,318	1138,754	3,619	1063,434
48	0,047	29,817	0,053	32,529	0,064	38,009	0,070	40,762
49	0,047	37,687	0,053	40,586	0,064	46,390	0,070	49,281
50	0,047	49,039	0,053	53,498	0,064	62,510	0,070	67,036
51	0,047	61,948	0,053	66,711	0,064	76,245	0,070	80,995
52	0,047	74,848	0,053	81,647	0,064	95,388	0,070	102,289
53	0,047	95,285	0,053	102,595	0,064	117,227	0,070	124,516
54	0,047	103,157	0,053	112,493	0,064	131,301	0,070	140,697
55	0,047	129,849	0,053	139,724	0,064	159,351	0,070	169,013
56	0,047	123,078	0,053	134,269	0,064	156,888	0,070	168,248
57	0,047	156,563	0,053	168,602	0,064	192,703	0,070	204,711
58	0,075	47,786	0,085	52,320	0,103	61,222	0,113	65,567
59	0,075	61,930	0,085	66,761	0,103	76,161	0,113	80,718
60	0,075	79,519	0,085	86,996	0,103	101,684	0,113	108,856
61	0,075	104,210	0,085	112,166	0,103	127,672	0,113	135,198
62	0,075	120,334	0,085	131,551	0,103	153,524	0,113	164,215
63	0,075	157,568	0,085	169,349	0,103	192,162	0,113	203,149
64	0,075	169,610	0,085	185,552	0,103	216,879	0,113	232,180
65	0,075	224,582	0,085	241,716	0,103	275,125	0,113	291,352
66	0,075	197,331	0,085	216,092	0,103	252,915	0,113	270,886

0,240	1708,506	0,270	1865,947	0,330	2223,521	0,360	2426,139
0,240	1708,506	0,270	1865,947	0,330	2223,521	0,360	2426,139
0,400	2203,738	0,450	2478,883	0,550	3130,381	0,600	3514,681
0,400	1730,124	0,450	1888,156	0,550	2244,441	0,600	2444,903
0,392	1109,684	0,441	1194,351	0,539	1380,919	0,588	1483,587
0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179
0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179	0,000	260,179
0,240	351,781	0,270	364,635	0,330	391,388	0,360	405,307
0,400	423,125	0,450	447,791	0,550	500,537	0,600	528,731
0,000	428,156	0,000	428,156	0,000	428,156	0,000	428,156
0,400	844,092	0,450	915,049	0,550	1073,256	0,600	1161,317
0,160	629,953	0,180	652,700	0,220	700,621	0,240	725,851
0,000	559,270	0,000	559,270	0,000	559,270	0,000	559,270
0,569	1069,099	0,640	1367,059	0,782	2233,538	0,853	2853,933
0,610	673,532	0,686	793,309	0,838	1100,488	0,914	1296,120
0,610	736,966	0,686	880,223	0,838	1255,573	0,914	1499,503
0,610	1036,456	0,686	1304,863	0,838	2067,510	0,914	2602,083
0,711	835,869	0,800	1011,366	0,978	1480,530	1,067	1791,251
0,023	33,713	0,026	34,484	0,032	36,049	0,035	36,844
0,046	40,102	0,052	41,780	0,064	45,231	0,070	47,004
0,023	55,453	0,026	56,716	0,032	59,283	0,035	60,586
0,046	65,929	0,052	68,679	0,064	74,334	0,070	77,239
0,023	84,496	0,026	86,487	0,032	90,539	0,035	92,599
0,046	101,072	0,052	105,447	0,064	114,476	0,070	119,130
0,023	116,650	0,026	119,256	0,032	124,543	0,035	127,224
0,046	138,200	0,052	143,836	0,064	155,405	0,070	161,336
0,023	138,981	0,026	142,247	0,032	148,893	0,035	152,272
0,046	166,164	0,052	173,336	0,064	188,132	0,070	195,758
0,038	54,043	0,042	55,415	0,052	58,205	0,056	59,622
0,075	65,443	0,085	68,445	0,103	74,630	0,113	77,815
0,038	89,631	0,042	91,996	0,052	96,816	0,056	99,271
0,075	109,389	0,085	114,629	0,103	125,477	0,113	131,088
0,038	135,496	0,042	139,040	0,052	146,257	0,056	149,930
0,075	165,058	0,085	172,885	0,103	189,071	0,113	197,433
0,038	190,777	0,042	196,014	0,052	206,709	0,056	212,168
0,075	234,757	0,085	246,510	0,103	270,951	0,113	283,650
0,038	222,920	0,042	228,743	0,052	240,602	0,056	246,637

67	0,075	257,486	0,085	277,676	0,103	316,909	0,113	335,919
68	0,121	79,440	0,137	86,236	0,167	99,003	0,182	104,975
69	0,121	107,652	0,137	114,720	0,167	127,898	0,182	134,024
70	0,121	130,427	0,137	141,543	0,167	162,368	0,182	172,067
71	0,121	176,341	0,137	187,807	0,167	209,045	0,182	218,816
72	0,121	201,305	0,137	218,490	0,167	250,794	0,182	265,920
73	0,121	277,367	0,137	295,478	0,167	329,306	0,182	345,072
74	0,121	273,217	0,137	297,723	0,167	343,651	0,182	365,171
75	0,121	366,553	0,137	393,608	0,167	443,586	0,182	466,852
76	0,121	331,197	0,137	359,537	0,167	412,806	0,182	437,741
77	0,121	456,231	0,137	486,203	0,167	542,156	0,182	568,215
78	0,075	49,834	0,085	54,492	0,103	63,628	0,113	68,082
79	0,075	67,353	0,085	72,420	0,103	82,264	0,113	87,028
80	0,075	78,547	0,085	85,894	0,103	100,311	0,113	107,341
81	0,075	101,677	0,085	109,344	0,103	124,248	0,113	131,462
82	0,075	117,607	0,085	128,659	0,103	150,371	0,113	160,972
83	0,075	150,507	0,085	161,983	0,103	184,350	0,113	195,206
84	0,075	169,490	0,085	185,395	0,103	216,632	0,113	231,878
85	0,075	224,264	0,085	241,307	0,103	274,497	0,113	290,595
86	0,075	203,245	0,085	222,324	0,103	259,799	0,113	278,092
87	0,075	273,149	0,085	293,924	0,103	334,394	0,113	354,028
88	0,122	83,271	0,137	90,395	0,167	103,786	0,182	110,056
89	0,122	118,287	0,137	126,054	0,167	140,556	0,182	147,312
90	0,122	127,997	0,137	138,973	0,167	159,612	0,182	169,278
91	0,122	169,832	0,137	181,048	0,167	202,008	0,182	211,780
92	0,122	190,932	0,137	207,511	0,167	238,801	0,182	253,512
93	0,122	249,518	0,137	266,528	0,167	298,562	0,182	313,621
94	0,122	280,431	0,137	304,695	0,167	350,449	0,182	371,942
95	0,122	386,167	0,137	412,259	0,167	461,309	0,182	484,326
96	0,122	339,500	0,137	368,906	0,167	424,380	0,182	450,450
97	0,122	479,392	0,137	511,873	0,167	572,984	0,182	601,687
98	0,064	130,432	0,072	145,708	0,088	176,471	0,096	191,817
99	0,120	237,101	0,135	264,525	0,165	316,756	0,180	341,444
100	0,040	86,183	0,045	95,107	0,055	113,476	0,060	122,858
101	0,064	130,432	0,072	145,708	0,088	176,471	0,096	191,817
102	0,080	161,080	0,090	180,314	0,110	218,410	0,120	237,101
103	0,120	237,101	0,135	264,525	0,165	316,756	0,180	341,444

0,075	271,489	0,085	284,344	0,103	310,927	0,113	324,658
0,060	87,546	0,068	90,130	0,083	95,427	0,090	98,139
0,120	109,434	0,135	115,355	0,165	127,771	0,180	134,275
0,060	143,727	0,068	147,926	0,083	156,526	0,090	160,928
0,120	179,237	0,135	188,824	0,165	208,899	0,180	219,404
0,060	221,062	0,068	227,961	0,083	242,146	0,090	249,436
0,120	279,966	0,135	296,080	0,165	330,095	0,180	348,035
0,060	303,335	0,068	312,188	0,083	330,316	0,090	339,595
0,120	378,181	0,135	398,383	0,165	440,682	0,180	462,813
0,060	363,816	0,068	375,173	0,083	398,527	0,090	410,530
0,120	460,796	0,135	487,328	0,165	543,339	0,180	572,879
0,038	55,780	0,042	57,423	0,052	60,793	0,056	62,520
0,075	69,718	0,085	73,495	0,103	81,415	0,113	85,564
0,038	88,691	0,042	90,912	0,052	95,424	0,056	97,715
0,075	107,108	0,085	111,944	0,103	121,894	0,113	127,009
0,038	133,184	0,042	136,374	0,052	142,837	0,056	146,109
0,075	159,474	0,085	166,318	0,103	180,331	0,113	187,498
0,038	190,626	0,042	195,839	0,052	206,484	0,056	211,916
0,075	234,385	0,085	246,070	0,103	270,361	0,113	282,975
0,038	227,890	0,042	234,489	0,052	248,009	0,056	254,931
0,075	283,730	0,085	298,808	0,103	330,366	0,113	346,863
0,060	90,910	0,068	94,036	0,083	100,505	0,090	103,850
0,120	118,006	0,135	125,570	0,165	141,732	0,180	150,358
0,060	141,698	0,068	145,579	0,083	153,496	0,090	157,533
0,120	174,212	0,135	182,879	0,165	200,889	0,180	210,242
0,060	212,350	0,068	217,879	0,083	229,122	0,090	234,837
0,120	258,334	0,135	270,470	0,165	295,542	0,180	308,487
0,060	308,504	0,068	318,179	0,083	338,080	0,090	348,311
0,120	391,179	0,135	413,819	0,165	461,641	0,180	486,876
0,060	371,667	0,068	384,293	0,083	410,400	0,090	423,890
0,120	480,899	0,135	511,310	0,165	576,196	0,180	610,774
0,000	161,080	0,000	161,080	0,000	161,080	0,000	161,080
0,000	291,103	0,000	291,103	0,000	291,103	0,000	291,103
0,000	104,215	0,000	104,215	0,000	104,215	0,000	104,215
0,000	161,080	0,000	161,080	0,000	161,080	0,000	161,080
0,000	199,456	0,000	199,456	0,000	199,456	0,000	199,456
0,000	291,103	0,000	291,103	0,000	291,103	0,000	291,103

104	0,160	308,311	0,180	341,444	0,220	402,525	0,240	430,547	0,000	372,842	0,000	372,842	0,000	372,842	0,000	372,842
105	0,200	372,842	0,225	409,683	0,275	475,831	0,300	505,471	0,000	443,960	0,000	443,960	0,000	443,960	0,000	443,960
106	0,240	430,547	0,270	469,641	0,330	538,344	0,360	568,552	0,000	505,471	0,000	505,471	0,000	505,471	0,000	505,471
107	0,024	51,937	0,027	56,143	0,033	64,858	0,036	69,350	0,000	60,452	0,000	60,452	0,000	60,452	0,000	60,452
108	0,032	63,379	0,036	69,350	0,044	81,700	0,048	88,044	0,000	75,463	0,000	75,463	0,000	75,463	0,000	75,463
109	0,040	75,463	0,045	83,277	0,055	99,361	0,060	107,576	0,000	91,252	0,000	91,252	0,000	91,252	0,000	91,252
110	0,048	16,734	0,054	18,575	0,066	22,340	0,072	24,249	0,000	20,446	0,000	20,446	0,000	20,446	0,000	20,446
111	0,048	88,044	0,054	97,730	0,066	117,539	0,072	127,584	0,000	107,576	0,000	107,576	0,000	107,576	0,000	107,576
112	0,048	88,044	0,054	97,730	0,066	117,539	0,072	127,584	0,000	107,576	0,000	107,576	0,000	107,576	0,000	107,576
113	0,880	1120,159	0,990	1127,431	1,210	1131,530	1,320	1129,487	0,576	872,370	0,648	993,411	0,792	1287,406	0,864	1465,160
114	0,440	474,347	0,495	490,566	0,605	517,181	0,660	528,133	0,288	433,053	0,324	467,608	0,396	544,642	0,432	587,512
115	1,280	428,766	1,440	419,840	1,760	400,993	1,920	391,301	0,832	320,891	0,936	362,984	1,144	464,251	1,248	524,924
116	0,440	205,843	0,495	214,764	0,605	230,535	0,660	237,604	0,288	184,555	0,324	202,884	0,396	244,928	0,432	268,983
117	0,240	99,874	0,270	108,942	0,330	124,879	0,360	131,887	0,000	117,254	0,000	117,254	0,000	117,254	0,000	117,254
118	0,368	133,659	0,414	143,140	0,506	159,033	0,552	165,743	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544
119	0,368	133,659	0,414	143,140	0,506	159,033	0,552	165,743	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544
120	0,488	156,203	0,549	165,326	0,671	180,213	0,732	186,353	0,000	173,259	0,000	173,259	0,000	173,259	0,000	173,259
121	0,728	185,973	0,819	193,959	1,001	206,579	1,092	211,647	0,000	200,745	0,000	200,745	0,000	200,745	0,000	200,745
122	0,488	156,203	0,549	165,326	0,671	180,213	0,732	186,353	0,000	173,259	0,000	173,259	0,000	173,259	0,000	173,259
123	0,240	99,874	0,270	108,942	0,330	124,879	0,360	131,887	0,000	117,254	0,000	117,254	0,000	117,254	0,000	117,254
124	0,368	133,659	0,414	143,140	0,506	159,033	0,552	165,743	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544	0,000	151,544
125	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
126	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
127	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
128	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
129	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
130	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
131	0,800	373,805	0,900	388,667	1,100	412,003	1,200	421,324	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237	0,000	401,237
132	0,568	454,724	0,639	478,452	0,781	516,665	0,852	532,255	0,000	498,891	0,000	498,891	0,000	498,891	0,000	498,891
133	0,568	326,233	0,639	343,256	0,781	370,671	0,852	381,856	0,000	357,919	0,000	357,919	0,000	357,919	0,000	357,919
134	0,568	326,233	0,639	343,256	0,781	370,671	0,852	381,856	0,000	357,919	0,000	357,919	0,000	357,919	0,000	357,919
135	0,800	462,867	0,900	533,697	1,100	632,746	1,200	671,895	0,344	545,131	0,387	566,060	0,473	610,142	0,516	633,347
136	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
137	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
138	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
139	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
140	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285

141	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
142	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
143	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
144	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
145	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
146	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
147	0,800	615,143	0,900	639,599	1,100	678,002	1,200	693,341	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285	0,000	660,285
148	0,560	551,427	0,630	580,513	0,770	627,408	0,840	646,559	0,000	605,587	0,000	605,587	0,000	605,587	0,000	605,587
149	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
150	0,800	668,392	0,900	694,965	1,100	736,692	1,200	753,359	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442	0,000	717,442
151	0,560	874,374	0,630	914,002	0,770	981,074	0,840	1009,919	0,160	868,288	0,180	907,930	0,220	992,493	0,240	1037,565
152	0,248	657,365	0,279	716,070	0,341	818,845	0,372	863,885	0,000	769,730	0,000	769,730	0,000	769,730	0,000	769,730
153	0,248	657,365	0,279	716,070	0,341	818,845	0,372	863,885	0,000	769,730	0,000	769,730	0,000	769,730	0,000	769,730
154	0,248	789,093	0,279	859,561	0,341	982,931	0,372	1036,996	0,000	923,974	0,000	923,974	0,000	923,974	0,000	923,974
155	0,528	233,909	0,594	246,804	0,726	267,697	0,792	276,266	0,000	257,960	0,000	257,960	0,000	257,960	0,000	257,960
156	0,320	271,609	0,360	292,637	0,440	328,415	0,480	343,709	0,000	311,475	0,000	311,475	0,000	311,475	0,000	311,475
157	0,360	935,623	0,405	1002,934	0,495	1116,036	0,540	1163,871	0,000	1062,700	0,000	1062,700	0,000	1062,700	0,000	1062,700
158	0,600	1068,607	0,675	1122,076	0,825	1207,805	0,900	1242,649	0,000	1167,987	0,000	1167,987	0,000	1167,987	0,000	1167,987
159	0,360	717,339	0,405	768,947	0,495	855,661	0,540	892,337	0,000	814,769	0,000	814,769	0,000	814,769	0,000	814,769
160	0,600	920,278	0,675	966,325	0,825	1040,154	0,900	1070,162	0,000	1005,863	0,000	1005,863	0,000	1005,863	0,000	1005,863
161	0,240	341,245	0,270	372,230	0,330	426,683	0,360	450,626	0,000	400,629	0,000	400,629	0,000	400,629	0,000	400,629
162	0,240	600,124	0,270	654,615	0,330	750,378	0,360	792,484	0,000	704,558	0,000	704,558	0,000	704,558	0,000	704,558
163	0,240	674,091	0,270	735,298	0,330	842,863	0,360	890,159	0,000	791,396	0,000	791,396	0,000	791,396	0,000	791,396
164	0,200	1519,675	0,225	1533,302	0,275	1556,214	0,300	1565,707	0,800	1017,628	0,900	1256,162	1,100	1896,025	1,200	2320,604
165	0,400	1681,538	0,450	1690,810	0,550	1700,365	0,600	1701,366	0,800	1130,111	0,900	1385,783	1,100	2075,491	1,200	2535,757
166	0,488	57,680	0,549	61,049	0,671	66,546	0,732	68,814	0,000	63,979	0,000	63,979	0,000	63,979	0,000	63,979
167	0,488	441,466	0,549	405,590	0,671	386,261	0,732	382,651	0,240	319,933	0,270	354,467	0,330	434,844	0,360	481,486
168	0,488	184,416	0,549	195,188	0,671	212,763	0,732	220,012	0,000	204,553	0,000	204,553	0,000	204,553	0,000	204,553
169	0,728	254,952	0,819	265,900	1,001	283,201	1,092	290,149	0,000	275,203	0,000	275,203	0,000	275,203	0,000	275,203
170	0,488	214,140	0,549	226,648	0,671	247,056	0,732	255,474	0,000	237,523	0,000	237,523	0,000	237,523	0,000	237,523
171	0,368	183,235	0,414	196,232	0,506	218,021	0,552	227,218	0,000	207,753	0,000	207,753	0,000	207,753	0,000	207,753
172	0,320	954,205	0,360	961,103	0,440	970,393	0,480	973,083	0,800	721,676	0,900	835,936	1,100	1115,493	1,200	1285,680
173	0,848	381,262	0,954	395,705	1,166	418,299	1,272	427,295	0,000	407,888	0,000	407,888	0,000	407,888	0,000	407,888
174	0,248	373,288	0,279	389,338	0,341	417,332	0,372	429,555	0,248	341,715	0,279	371,705	0,341	438,676	0,372	476,003
175	0,488	303,479	0,549	321,205	0,671	350,127	0,732	362,057	0,000	336,618	0,000	336,618	0,000	336,618	0,000	336,618
176	0,248	373,288	0,279	389,338	0,341	417,332	0,372	429,555	0,248	341,715	0,279	371,705	0,341	438,676	0,372	476,003
177	0,640	565,235	0,720	592,132	0,880	635,040	0,960	652,407	0,000	615,143	0,000	615,143	0,000	615,143	0,000	615,143

178	0,504	579,568	0,567	612,634	0,693	666,429	0,756	688,565	0,000	641,325	0,000	641,325	0,000	641,325	0,000	641,325
179	0,368	247,062	0,414	264,586	0,506	293,965	0,552	306,367	0,000	280,121	0,000	280,121	0,000	280,121	0,000	280,121
180	0,248	230,947	0,279	251,572	0,341	287,679	0,372	303,502	0,000	270,424	0,000	270,424	0,000	270,424	0,000	270,424
181	0,248	250,939	0,279	273,348	0,341	312,581	0,372	329,775	0,000	293,832	0,000	293,832	0,000	293,832	0,000	293,832
182	0,248	193,942	0,279	203,611	0,341	221,081	0,372	229,014	0,240	174,289	0,270	192,591	0,330	234,580	0,360	258,602
183	0,248	170,515	0,279	178,941	0,341	194,117	0,372	200,983	0,240	154,536	0,270	169,971	0,330	205,109	0,360	225,062
184	0,248	415,412	0,279	431,975	0,341	459,699	0,372	471,163	0,240	391,656	0,270	418,442	0,330	476,455	0,360	507,841
185	0,240	396,247	0,270	432,226	0,330	495,456	0,360	523,257	0,000	465,202	0,000	465,202	0,000	465,202	0,000	465,202
186	0,960	708,881	1,080	733,067	1,320	770,622	1,440	785,483	0,000	753,359	0,000	753,359	0,000	753,359	0,000	753,359
187	0,240	1214,706	0,270	1275,366	0,330	1385,222	0,360	1435,206	0,240	1089,443	0,270	1205,202	0,330	1471,059	0,360	1623,303
188	0,240	308,888	0,270	336,935	0,330	386,224	0,360	407,897	0,000	362,640	0,000	362,640	0,000	362,640	0,000	362,640
189	0,960	770,244	1,080	796,524	1,320	837,329	1,440	853,477	0,000	818,572	0,000	818,572	0,000	818,572	0,000	818,572
190	0,240	396,247	0,270	432,226	0,330	495,456	0,360	523,257	0,000	465,202	0,000	465,202	0,000	465,202	0,000	465,202
191	0,240	225,316	0,270	245,774	0,330	281,728	0,360	297,537	0,000	264,525	0,000	264,525	0,000	264,525	0,000	264,525
192	0,240	158,986	0,270	173,422	0,330	198,792	0,360	209,947	0,000	186,653	0,000	186,653	0,000	186,653	0,000	186,653
193	0,488	786,348	0,549	822,021	0,671	883,890	0,732	911,035	0,240	756,852	0,270	804,216	0,330	907,445	0,360	963,641
194	0,488	786,348	0,549	822,021	0,671	883,890	0,732	911,035	0,240	756,852	0,270	804,216	0,330	907,445	0,360	963,641
195	0,248	316,608	0,279	344,882	0,341	394,382	0,372	416,075	0,000	370,727	0,000	370,727	0,000	370,727	0,000	370,727
196	0,608	553,168	0,684	580,564	0,836	624,443	0,912	642,263	0,000	604,070	0,000	604,070	0,000	604,070	0,000	604,070
197	0,248	316,608	0,279	344,882	0,341	394,382	0,372	416,075	0,000	370,727	0,000	370,727	0,000	370,727	0,000	370,727
198	0,800	164,741	0,900	173,956	1,100	191,262	1,200	199,467	0,640	153,937	0,720	167,763	0,880	199,077	0,960	216,775
199	0,648	134,835	0,729	141,588	0,891	153,935	0,972	159,633	0,480	128,275	0,540	137,777	0,660	158,796	0,720	170,406
200	0,648	245,206	0,729	259,369	0,891	286,384	0,972	299,345	0,760	210,140	0,855	239,618	1,045	311,043	1,140	354,123

(1) Largura da base da sapata, expressa em metros (m);
(2) Capacidade de carga, expressa em quilopascal (kPa);
(3) Profundidade de embutimento, expressa em metros (m).

Variação dos dados L/B	Variação dos dados do peso específico do solo γ((4)

	-20%		- 10%		+ 10%		+ 20%	
Caso	L/B	$q_{lim}^{(2)}$	L/B	$q_{lim}^{(2)}$	L/B	$q_{lim}^{(2)}$	L/B	$q_{lim}^{(2)}$
1	1,60	325,648	1,800	294,730	2,200	263,119	2,400	297,659
2	1,60	317,991	1,800	317,991	2,200	317,991	2,400	317,991
3	1,60	518,826	1,800	430,082	2,200	529,069	2,400	571,658
4	1,60	1033,704	1,800	1033,704	2,200	1033,704	2,400	1033,704
5	1,60	1678,447	1,800	1553,023	2,200	1398,951	2,400	2367,790
6	0,80	292,246	0,900	292,246	1,100	292,246	1,200	292,246
7	0,80	292,246	0,900	292,246	1,100	292,246	1,200	292,246
8	1,60	292,246	1,800	292,246	2,200	292,246	2,400	292,246
9	1,60	292,246	1,800	292,246	2,200	292,246	2,400	292,246
10	2,40	292,246	2,700	292,246	3,300	292,246	3,600	292,246
11	3,08	297,882	3,465	297,882	4,235	297,882	4,620	297,882
12	0,80	433,558	0,900	587,691	1,100	513,222	1,200	470,603
13	1,60	489,725	1,800	407,762	2,200	495,418	2,400	550,777
14	1,60	489,725	1,800	407,762	2,200	495,418	2,400	550,777
15	2,40	550,777	2,700	503,526	3,300	400,870	3,600	451,818
16	3,08	485,452	3,465	419,178	4,235	475,957	4,620	462,697
17	0,80	260,179	0,900	260,179	1,100	260,179	1,200	260,179
18	0,80	260,179	0,900	260,179	1,100	260,179	1,200	260,179
19	1,60	260,179	1,800	260,179	2,200	260,179	2,400	260,179
20	0,80	264,222	0,900	272,532	1,100	266,885	1,200	266,891
21	3,20	274,063	3,600	275,411	4,400	274,849	4,800	274,171
22	3,20	325,552	3,600	332,624	4,400	329,659	4,800	326,111
23	0,80	363,272	0,900	742,306	1,100	457,845	1,200	458,088
24	0,80	363,272	0,900	742,306	1,100	457,845	1,200	458,088
25	3,20	436,402	3,600	459,127	4,400	449,518	4,800	438,174
26	1,60	663,035	1,800	511,148	2,200	621,704	2,400	845,482
27	3,20	604,512	3,600	657,881	4,400	635,093	4,800	608,607
28	0,80	831,845	0,900	831,845	1,100	831,845	1,200	831,845
29	3,20	831,845	3,600	831,845	4,400	831,845	4,800	831,845
30	0,80	1109,163	0,900	1421,053	1,100	1351,206	1,200	1255,203
31	0,80	1109,163	0,900	1421,053	1,100	1351,206	1,200	1255,203
32	1,60	2111,051	1,800	1757,138	2,200	1365,597	2,400	2375,396
33	3,20	1681,333	3,600	1874,200	4,400	2172,149	4,800	2060,042
34	3,20	1801,157	3,600	1416,317	4,400	1457,901	4,800	1436,452
35	0,80	260,179	0,900	260,179	1,100	260,179	1,200	260,179

-20%		- 10%		+ 10%		+ 20%	
$\gamma^{(4)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$\gamma^{(4)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$\gamma^{(4)}$	$q_{lim}^{(2)}$	$\gamma^{(4)}$	$q_{lim}^{(2)}$
7,880	241,180	8,865	249,806	10,835	267,996	11,820	277,582
8,160	317,991	9,180	317,991	11,220	317,991	12,240	317,991
8,160	420,478	9,180	436,062	11,220	468,985	12,240	486,367
8,680	1033,704	9,765	1033,704	11,935	1033,704	13,020	1033,704
8,680	1690,833	9,765	1757,572	11,935	1899,056	13,020	1974,014
8,160	292,246	9,180	292,246	11,220	292,246	12,240	292,246
8,160	292,246	9,180	292,246	11,220	292,246	12,240	292,246
8,160	292,246	9,180	292,246	11,220	292,246	12,240	292,246
8,160	292,246	9,180	292,246	11,220	292,246	12,240	292,246
8,160	292,246	9,180	292,246	11,220	292,246	12,240	292,246
8,160	297,882	9,180	297,882	11,220	297,882	12,240	297,882
8,160	325,842	9,180	337,919	11,220	363,432	12,240	376,901
8,160	394,149	9,180	408,758	11,220	439,619	12,240	455,913
8,160	394,149	9,180	408,758	11,220	439,619	12,240	455,913
8,160	425,016	9,180	440,769	11,220	474,046	12,240	491,616
8,160	456,751	9,180	473,680	11,220	509,443	12,240	528,324
9,360	260,179	10,530	260,179	12,870	260,179	14,040	260,179
9,360	260,179	10,530	260,179	12,870	260,179	14,040	260,179
9,360	260,179	10,530	260,179	12,870	260,179	14,040	260,179
9,360	263,688	10,530	264,166	12,870	265,123	14,040	265,603
9,360	268,811	10,530	269,898	12,870	272,085	14,040	273,185
9,360	299,103	10,530	304,435	12,870	315,388	14,040	321,011
9,360	346,703	10,530	361,482	12,870	392,957	14,040	409,708
9,360	346,703	10,530	361,482	12,870	392,957	14,040	409,708
9,360	357,237	10,530	372,466	12,870	404,897	14,040	422,157
9,360	410,346	10,530	439,913	12,870	505,589	14,040	542,018
9,360	433,033	10,530	464,234	12,870	533,541	14,040	571,984
9,928	831,845	11,169	831,845	13,651	831,845	14,892	831,845
9,928	831,845	11,169	831,845	13,651	831,845	14,892	831,845
9,928	1864,571	11,169	1948,986	13,651	2129,452	14,892	2225,858
9,928	1864,571	11,169	1948,986	13,651	2129,452	14,892	2225,858
9,928	2404,153	11,169	2588,281	13,651	2999,923	14,892	3229,680
9,928	1776,677	11,169	1912,748	13,651	2216,953	14,892	2386,744
9,816	1113,456	11,043	1195,989	13,497	1379,860	14,724	1482,140
9,416	260,179	10,593	260,179	12,947	260,179	14,124	260,179

36	1,60	260,179	1,800	260,179	2,200	260,179	2,400	260,179
37	0,80	364,181	0,900	744,162	1,100	458,990	1,200	459,234
38	1,60	665,801	1,800	513,280	2,200	624,297	2,400	849,009
39	3,20	428,156	3,600	428,156	4,400	428,156	4,800	428,156
40	3,20	735,230	3,600	1130,436	4,400	1022,443	4,800	1028,868
41	2,40	633,975	2,700	655,527	3,300	718,945	3,600	678,241
42	2,40	559,270	2,700	559,270	3,300	559,270	3,600	559,270
43	0,80	1303,671	0,900	189,094	1,100	301,585	1,200	1007,170
44	0,80	710,676	0,900	725,943	1,100	537,918	1,200	1411,616
45	0,80	812,775	0,900	622,392	1,100	450,991	1,200	1842,475
46	0,80	1101,208	0,900	394,331	1,100	106,121	1,200	1526,837
47	0,80	888,445	0,900	917,811	1,100	646,995	1,200	1976,378
48	4,76	35,252	5,355	35,371	6,545	34,795	7,140	35,178
49	4,76	43,465	5,355	43,758	6,545	42,344	7,140	43,282
50	4,76	58,131	5,355	58,145	6,545	58,316	7,140	57,788
51	4,76	71,820	5,355	71,854	6,545	72,279	7,140	70,974
52	4,76	88,218	5,355	88,065	6,545	88,373	7,140	87,219
53	4,76	109,212	5,355	108,833	6,545	109,596	7,140	106,751
54	4,76	123,073	5,355	122,671	6,545	122,127	7,140	122,357
55	4,76	152,498	5,355	151,503	6,545	150,162	7,140	150,728
56	4,76	145,203	5,355	145,446	6,545	145,538	7,140	145,415
57	4,76	179,796	5,355	180,398	6,545	180,625	7,140	180,319
58	4,80	57,270	5,400	57,388	6,600	57,585	7,200	58,640
59	4,80	72,688	5,400	72,988	6,600	73,492	7,200	76,208
60	4,80	94,857	5,400	94,897	6,600	94,954	7,200	94,668
61	4,80	121,177	5,400	121,280	6,600	121,426	7,200	120,694
62	4,80	143,620	5,400	143,519	6,600	144,116	7,200	149,346
63	4,80	183,417	5,400	183,160	6,600	184,687	7,200	198,333
64	4,80	200,463	5,400	201,044	6,600	201,351	7,200	201,144
65	4,80	256,364	5,400	257,852	6,600	258,641	7,200	258,110
66	4,80	237,677	5,400	236,085	6,600	235,145	7,200	235,924
67	4,80	305,247	5,400	301,172	6,600	298,780	7,200	300,762
68	4,76	92,949	5,355	93,473	6,545	90,716	7,140	93,445
69	4,76	121,968	5,355	123,349	6,545	116,179	7,140	123,274
70	4,76	154,008	5,355	154,201	6,545	156,741	7,140	148,832
71	4,76	203,478	5,355	203,989	6,545	210,762	7,140	190,031
72	4,76	234,042	5,355	232,881	6,545	237,433	7,140	230,983

9,416	260,179	10,593	260,179	12,947	260,179	14,124	260,179
9,416	347,396	10,593	362,295	12,947	394,038	14,124	410,938
9,416	411,715	10,593	441,564	12,947	507,910	14,124	544,732
9,600	428,156	10,800	428,156	13,200	428,156	14,400	428,156
9,600	859,463	10,800	923,034	13,200	1064,630	14,400	1143,376
9,576	638,815	10,773	657,265	13,167	695,778	14,364	715,873
9,544	559,270	10,737	559,270	13,123	559,270	14,316	559,270
12,640	1337,816	14,220	1529,044	17,380	1997,409	18,960	2282,919
12,640	701,692	14,220	809,715	17,380	1078,210	18,960	1244,196
12,640	789,502	14,220	911,042	17,380	1213,136	18,960	1399,894
12,640	1233,555	14,220	1423,456	17,380	1895,463	18,960	2187,262
12,640	876,130	14,220	1035,424	17,380	1446,165	18,960	1709,101
12,560	34,883	14,130	35,072	17,270	35,454	18,840	35,646
12,560	42,558	14,130	43,021	17,270	43,963	18,840	44,442
12,880	57,353	14,490	57,672	17,710	58,316	19,320	58,641
12,880	69,910	14,490	70,691	17,710	72,279	19,320	73,086
13,200	87,500	14,850	87,999	18,150	89,006	19,800	89,514
13,200	107,441	14,850	108,671	18,150	111,173	19,800	112,445
13,440	120,482	15,120	121,182	18,480	122,595	20,160	123,307
13,440	146,145	15,120	147,848	18,480	151,315	20,160	153,079
13,680	143,844	15,390	144,695	18,810	146,412	20,520	147,278
13,680	176,446	15,390	178,540	18,810	182,802	20,520	184,971
12,560	55,814	14,130	56,306	17,270	57,303	18,840	57,808
12,560	69,040	14,130	70,263	17,270	72,773	18,840	74,062
12,880	92,708	14,490	93,546	17,710	95,245	19,320	96,106
12,880	115,749	14,490	117,851	17,710	122,171	19,320	124,390
13,200	140,020	14,850	141,317	18,150	143,948	19,800	145,282
13,200	174,337	14,850	177,582	18,150	184,256	19,800	187,686
13,440	197,579	15,120	199,443	18,480	203,224	20,160	205,142
13,440	249,040	15,120	253,762	18,480	263,475	20,160	268,470
13,680	230,194	15,390	232,405	18,810	236,891	20,520	239,166
13,680	286,330	15,390	291,856	18,810	303,231	20,520	309,084
12,560	90,195	14,130	91,467	17,270	94,065	18,840	95,392
12,560	114,849	14,130	118,111	17,270	124,916	18,840	128,464
12,880	147,884	14,490	150,023	17,710	154,394	19,320	156,627
12,880	187,616	14,490	193,082	17,710	204,498	19,320	210,457
13,200	228,172	14,850	231,555	18,150	238,472	19,800	242,007

73	4,76	310,272	5,355	307,199	6,545	319,326	7,140	302,212
74	4,76	327,007	5,355	325,411	6,545	312,087	7,140	317,137
75	4,76	434,559	5,355	430,327	6,545	395,808	7,140	408,722
76	4,76	386,073	5,355	386,929	6,545	385,550	7,140	383,269
77	4,76	513,054	5,355	515,330	6,545	511,664	7,140	505,628
78	0,80	58,120	0,900	56,310	1,100	54,982	1,200	65,218
79	0,80	74,864	0,900	70,274	1,100	66,996	1,200	94,264
80	0,80	90,113	0,900	98,703	1,100	94,926	1,200	95,668
81	0,80	109,359	0,900	131,203	1,100	121,355	1,200	123,258
82	0,80	145,894	0,900	144,503	1,100	149,911	1,200	142,289
83	0,80	189,272	0,900	185,679	1,100	199,836	1,200	180,032
84	0,80	206,687	0,900	194,115	1,100	205,553	1,200	193,682
85	0,80	272,530	0,900	240,384	1,100	269,549	1,200	239,313
86	0,80	238,728	0,900	225,386	1,100	239,811	1,200	205,626
87	0,80	307,955	0,900	274,494	1,100	310,754	1,200	228,472
88	0,80	94,723	0,900	90,404	1,100	87,148	1,200	107,816
89	0,80	126,670	0,900	115,381	1,100	107,220	1,200	164,105
90	0,80	142,928	0,900	164,992	1,100	154,454	1,200	156,107
91	0,80	175,253	0,900	233,535	1,100	204,657	1,200	209,062
92	0,80	239,730	0,900	235,268	1,100	250,703	1,200	229,687
93	0,80	325,536	0,900	313,529	1,100	356,018	1,200	298,832
94	0,80	341,181	0,900	308,581	1,100	338,710	1,200	307,877
95	0,80	473,046	0,900	386,965	1,100	466,220	1,200	385,202
96	0,80	389,481	0,900	358,180	1,100	392,564	1,200	330,029
97	0,80	522,150	0,900	441,596	1,100	530,451	1,200	374,910
98	0,80	161,080	0,900	161,080	1,100	161,080	1,200	161,080
99	0,80	291,103	0,900	291,103	1,100	291,103	1,200	291,103
100	0,80	104,215	0,900	104,215	1,100	104,215	1,200	104,215
101	0,80	161,080	0,900	161,080	1,100	161,080	1,200	161,080
102	0,80	199,456	0,900	199,456	1,100	199,456	1,200	199,456
103	0,80	291,103	0,900	291,103	1,100	291,103	1,200	291,103
104	0,80	372,842	0,900	372,842	1,100	372,842	1,200	372,842
105	0,80	443,960	0,900	443,960	1,100	443,960	1,200	443,960
106	0,80	505,471	0,900	505,471	1,100	505,471	1,200	505,471
107	0,80	60,452	0,900	60,452	1,100	60,452	1,200	60,452
108	0,80	75,463	0,900	75,463	1,100	75,463	1,200	75,463
109	0,80	91,252	0,900	91,252	1,100	91,252	1,200	91,252

13,200	294,901	14,850	303,711	18,150	322,127	19,800	331,750
13,440	311,698	15,120	316,404	18,480	326,030	20,160	330,953
13,440	394,821	15,120	406,834	18,480	431,965	20,160	445,107
13,680	375,122	15,390	380,888	18,810	392,686	20,520	398,722
13,680	484,361	15,390	499,365	18,810	530,780	20,520	547,221
12,560	58,066	14,130	58,578	17,270	59,615	18,840	60,140
12,560	74,723	14,130	76,046	17,270	78,763	18,840	80,158
12,880	91,495	14,490	92,322	17,710	93,999	19,320	94,848
12,880	112,740	14,490	114,787	17,710	118,995	19,320	121,156
13,200	137,040	14,850	138,310	18,150	140,885	19,800	142,190
13,200	166,995	14,850	170,104	18,150	176,497	19,800	179,783
13,440	197,383	15,120	199,245	18,480	203,023	20,160	204,938
13,440	248,547	15,120	253,259	18,480	262,953	20,160	267,938
13,680	236,628	15,390	238,900	18,810	243,511	20,520	245,850
13,680	302,559	15,390	308,398	18,810	320,418	20,520	326,602
12,560	94,548	14,130	95,882	17,270	98,605	18,840	99,996
12,560	126,203	14,130	129,787	17,270	137,265	18,840	141,164
12,880	145,279	14,490	147,380	17,710	151,674	19,320	153,868
12,880	181,064	14,490	186,340	17,710	197,357	19,320	203,108
13,200	216,987	14,850	220,204	18,150	226,783	19,800	230,145
13,200	266,699	14,850	274,666	18,150	291,322	19,800	300,024
13,440	318,351	15,120	323,157	18,480	332,989	20,160	338,017
13,440	411,856	15,120	424,386	18,480	450,602	20,160	464,311
13,680	385,269	15,390	391,190	18,810	403,307	20,520	409,506
13,680	510,917	15,390	526,743	18,810	559,881	20,520	577,224
13,760	161,080	15,480	161,080	18,920	161,080	20,640	161,080
13,760	291,103	15,480	291,103	18,920	291,103	20,640	291,103
13,760	104,215	15,480	104,215	18,920	104,215	20,640	104,215
13,680	161,080	15,390	161,080	18,810	161,080	20,520	161,080
13,680	199,456	15,390	199,456	18,810	199,456	20,520	199,456
13,680	291,103	15,390	291,103	18,810	291,103	20,520	291,103
13,680	372,842	15,390	372,842	18,810	372,842	20,520	372,842
13,680	443,960	15,390	443,960	18,810	443,960	20,520	443,960
13,680	505,471	15,390	505,471	18,810	505,471	20,520	505,471
12,712	60,452	14,301	60,452	17,479	60,452	19,068	60,452
12,712	75,463	14,301	75,463	17,479	75,463	19,068	75,463
12,712	91,252	14,301	91,252	17,479	91,252	19,068	91,252

110	0,80	20,446	0,900	20,446	1,100	20,446	1,200	20,446
111	0,80	107,576	0,900	107,576	1,100	107,576	1,200	107,576
112	0,80	107,576	0,900	107,576	1,100	107,576	1,200	107,576
113	0,94	1165,575	1,062	4400,059	1,298	914,926	1,416	1845,841
114	0,94	444,087	1,062	691,758	1,298	406,961	1,416	596,106
115	0,90	262,212	1,017	388,356	1,243	251,316	1,356	707,883
116	0,94	273,294	1,062	130,694	1,298	176,131	1,416	187,217
117	0,80	117,254	0,900	117,254	1,100	117,254	1,200	117,254
118	0,80	151,544	0,900	151,544	1,100	151,544	1,200	151,544
119	0,80	151,544	0,900	151,544	1,100	151,544	1,200	151,544
120	0,80	173,259	0,900	173,259	1,100	173,259	1,200	173,259
121	0,80	200,745	0,900	200,745	1,100	200,745	1,200	200,745
122	0,80	173,259	0,900	173,259	1,100	173,259	1,200	173,259
123	0,80	117,254	0,900	117,254	1,100	117,254	1,200	117,254
124	0,80	151,544	0,900	151,544	1,100	151,544	1,200	151,544
125	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
126	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
127	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
128	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
129	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
130	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
131	0,80	401,237	0,900	401,237	1,100	401,237	1,200	401,237
132	0,80	498,891	0,900	498,891	1,100	498,891	1,200	498,891
133	1,58	357,919	1,773	357,919	2,167	357,919	2,364	357,919
134	2,37	357,919	2,664	357,919	3,256	357,919	3,552	357,919
135	0,80	980,555	0,900	1095,792	1,100	1217,534	1,200	907,853
136	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
137	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
138	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
139	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
140	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
141	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
142	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442
143	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442
144	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442
145	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
146	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442

10,560	20,446	11,880	20,446	14,520	20,446	15,840	20,446
11,840	107,576	13,320	107,576	16,280	107,576	17,760	107,576
12,320	107,576	13,860	107,576	16,940	107,576	18,480	107,576
12,800	859,927	14,400	986,197	17,600	1297,081	19,200	1487,541
12,880	439,740	14,490	471,121	17,710	540,762	19,320	579,352
6,880	331,863	7,740	369,109	9,460	456,612	10,320	507,860
12,880	194,242	14,490	208,103	17,710	238,865	19,320	255,911
12,800	117,254	14,400	117,254	17,600	117,254	19,200	117,254
12,880	151,544	14,490	151,544	17,710	151,544	19,320	151,544
12,880	151,544	14,490	151,544	17,710	151,544	19,320	151,544
12,880	173,259	14,490	173,259	17,710	173,259	19,320	173,259
12,800	200,745	14,400	200,745	17,600	200,745	19,200	200,745
12,880	173,259	14,490	173,259	17,710	173,259	19,320	173,259
12,800	117,254	14,400	117,254	17,600	117,254	19,200	117,254
11,840	151,544	13,320	151,544	16,280	151,544	17,760	151,544
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,800	401,237	14,400	401,237	17,600	401,237	19,200	401,237
12,880	498,891	14,490	498,891	17,710	498,891	19,320	498,891
12,880	357,919	14,490	357,919	17,710	357,919	19,320	357,919
12,880	357,919	14,490	357,919	17,710	357,919	19,320	357,919
12,800	499,000	14,400	541,547	17,600	637,834	19,200	692,219
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442
13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442

147	0,80	660,285	0,900	660,285	1,100	660,285	1,200	660,285
148	0,80	605,587	0,900	605,587	1,100	605,587	1,200	605,587
149	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442
150	0,80	717,442	0,900	717,442	1,100	717,442	1,200	717,442
151	0,80	1009,218	0,900	756,751	1,100	1003,451	1,200	768,929
152	0,80	769,730	0,900	769,730	1,100	769,730	1,200	769,730
153	0,80	769,730	0,900	769,730	1,100	769,730	1,200	769,730
154	0,80	923,974	0,900	923,974	1,100	923,974	1,200	923,974
155	0,80	257,960	0,900	257,960	1,100	257,960	1,200	257,960
156	0,80	311,475	0,900	311,475	1,100	311,475	1,200	311,475
157	0,80	1062,700	0,900	1062,700	1,100	1062,700	1,200	1062,700
158	0,80	1167,987	0,900	1167,987	1,100	1167,987	1,200	1167,987
159	0,80	814,769	0,900	814,769	1,100	814,769	1,200	814,769
160	0,80	1005,863	0,900	1005,863	1,100	1005,863	1,200	1005,863
161	0,80	400,629	0,900	400,629	1,100	400,629	1,200	400,629
162	0,80	704,558	0,900	704,558	1,100	704,558	1,200	704,558
163	0,80	791,396	0,900	791,396	1,100	791,396	1,200	791,396
164	0,80	771,644	0,900	2435,761	1,100	1482,785	1,200	2507,329
165	0,80	967,965	0,900	2262,596	1,100	1434,974	1,200	2733,100
166	0,80	63,979	0,900	63,979	1,100	63,979	1,200	63,979
167	0,80	314,311	0,900	190,937	1,100	165,946	1,200	330,698
168	0,80	204,553	0,900	204,553	1,100	204,553	1,200	204,553
169	0,80	275,203	0,900	275,203	1,100	275,203	1,200	275,203
170	0,80	237,523	0,900	237,523	1,100	237,523	1,200	237,523
171	0,80	207,753	0,900	207,753	1,100	207,753	1,200	207,753
172	0,80	424,654	0,900	1696,378	1,100	1000,098	1,200	1580,296
173	0,80	407,888	0,900	407,888	1,100	407,888	1,200	407,888
174	0,80	321,215	0,900	471,291	1,100	402,573	1,200	469,762
175	0,80	336,618	0,900	336,618	1,100	336,618	1,200	336,618
176	0,80	321,215	0,900	471,291	1,100	402,573	1,200	469,762
177	0,80	615,143	0,900	615,143	1,100	615,143	1,200	615,143
178	0,80	641,325	0,900	641,325	1,100	641,325	1,200	641,325
179	0,80	280,121	0,900	280,121	1,100	280,121	1,200	280,121
180	0,80	270,424	0,900	270,424	1,100	270,424	1,200	270,424
181	0,80	293,832	0,900	293,832	1,100	293,832	1,200	293,832
182	0,80	214,446	0,900	173,769	1,100	175,216	1,200	210,919
183	0,80	184,888	0,900	169,099	1,100	167,452	1,200	188,545

13,440	660,285	15,120	660,285	18,480	660,285	20,160	660,285
13,440	605,587	15,120	605,587	18,480	605,587	20,160	605,587
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442
13,440	717,442	15,120	717,442	18,480	717,442	20,160	717,442
12,800	879,732	14,400	913,857	17,600	986,132	19,200	1024,385
13,920	769,730	15,660	769,730	19,140	769,730	20,880	769,730
13,920	769,730	15,660	769,730	19,140	769,730	20,880	769,730
13,920	923,974	15,660	923,974	19,140	923,974	20,880	923,974
16,480	257,960	18,540	257,960	22,660	257,960	24,720	257,960
16,400	311,475	18,450	311,475	22,550	311,475	24,600	311,475
16,000	1062,700	18,000	1062,700	22,000	1062,700	24,000	1062,700
16,000	1167,987	18,000	1167,987	22,000	1167,987	24,000	1167,987
16,000	814,769	18,000	814,769	22,000	814,769	24,000	814,769
16,000	1005,863	18,000	1005,863	22,000	1005,863	24,000	1005,863
16,000	400,629	18,000	400,629	22,000	400,629	24,000	400,629
16,000	704,558	18,000	704,558	22,000	704,558	24,000	704,558
16,000	791,396	18,000	791,396	22,000	791,396	24,000	791,396
12,800	1056,260	14,400	1277,651	17,600	1869,369	19,200	2261,186
12,800	1159,813	14,400	1402,908	17,600	2052,636	19,200	2482,866
11,680	63,979	13,140	63,979	16,060	63,979	17,520	63,979
11,680	353,796	13,140	372,714	16,060	413,639	17,520	435,757
11,680	204,553	13,140	204,553	16,060	204,553	17,520	204,553
11,680	275,203	13,140	275,203	16,060	275,203	17,520	275,203
11,680	237,523	13,140	237,523	16,060	237,523	17,520	237,523
11,680	207,753	13,140	207,753	16,060	207,753	17,520	207,753
9,440	729,931	10,620	839,904	12,980	1112,053	14,160	1279,598
14,720	407,888	16,560	407,888	20,240	407,888	22,080	407,888
15,200	351,159	17,100	376,640	20,900	433,283	22,800	464,722
15,200	336,618	17,100	336,618	20,900	336,618	22,800	336,618
15,200	351,159	17,100	376,640	20,900	433,283	22,800	464,722
13,680	615,143	15,390	615,143	18,810	615,143	20,520	615,143
13,680	641,325	15,390	641,325	18,810	641,325	20,520	641,325
13,680	280,121	15,390	280,121	18,810	280,121	20,520	280,121
12,400	270,424	13,950	270,424	17,050	270,424	18,600	270,424
12,400	293,832	13,950	293,832	17,050	293,832	18,600	293,832
16,320	183,829	18,360	197,708	22,440	228,688	24,480	245,954
16,320	161,484	18,360	173,676	22,440	200,891	24,480	216,058

184	0,80	512,471	0,900	753,150	1,100	613,303	1,200	576,282	16,320	386,170	18,360	415,326	22,440	480,407	24,480	516,678
185	0,80	465,202	0,900	465,202	1,100	465,202	1,200	465,202	16,000	465,202	18,000	465,202	22,000	465,202	24,000	465,202
186	0,80	753,359	0,900	753,359	1,100	753,359	1,200	753,359	16,000	753,359	18,000	753,359	22,000	753,359	24,000	753,359
187	0,80	1245,820	0,900	866,072	1,100	1282,675	1,200	330,737	16,320	1151,609	18,360	1238,555	22,440	1432,636	24,480	1540,800
188	0,80	362,640	0,900	362,640	1,100	362,640	1,200	362,640	16,000	362,640	18,000	362,640	22,000	362,640	24,000	362,640
189	0,80	818,572	0,900	818,572	1,100	818,572	1,200	818,572	16,000	818,572	18,000	818,572	22,000	818,572	24,000	818,572
190	0,80	465,202	0,900	465,202	1,100	465,202	1,200	465,202	16,000	465,202	18,000	465,202	22,000	465,202	24,000	465,202
191	0,80	264,525	0,900	264,525	1,100	264,525	1,200	264,525	16,000	264,525	18,000	264,525	22,000	264,525	24,000	264,525
192	0,80	186,653	0,900	186,653	1,100	186,653	1,200	186,653	12,800	186,653	14,400	186,653	17,600	186,653	19,200	186,653
193	0,80	1243,691	0,900	871,863	1,100	1340,386	1,200	817,453	13,840	755,140	15,570	803,219	19,030	908,757	20,760	966,617
194	0,80	1243,691	0,900	871,863	1,100	1340,386	1,200	817,453	13,840	755,140	15,570	803,219	19,030	908,757	20,760	966,617
195	0,80	370,727	0,900	370,727	1,100	370,727	1,200	370,727	12,960	370,727	14,580	370,727	17,820	370,727	19,440	370,727
196	0,80	604,070	0,900	604,070	1,100	604,070	1,200	604,070	12,960	604,070	14,580	604,070	17,820	604,070	19,440	604,070
197	0,80	370,727	0,900	370,727	1,100	370,727	1,200	370,727	12,960	370,727	14,580	370,727	17,820	370,727	19,440	370,727
198	0,80	120,377	0,900	421,525	1,100	316,577	1,200	228,880	9,536	145,684	10,728	163,179	13,112	204,726	14,304	229,312
199	0,80	92,734	0,900	314,495	1,100	241,049	1,200	179,768	10,560	122,535	11,880	134,638	14,520	162,548	15,840	178,603
200	0,80	130,356	0,900	901,337	1,100	591,561	1,200	371,786	12,000	194,571	13,500	230,505	16,500	323,508	18,000	383,255

(4) peso específico do solo, expresso em quilonewton por metro cúbico (kN/m³).

	Variação dos dados do ângulo de atrito $\phi^{(5)}$							
	-20%		- 10%		+ 10%		+ 20%	
Caso	$\phi^{(5)}$	$q_{lim}{}^{(2)}$	$\phi^{(5)}$	$q_{lim}{}^{(2)}$	$\phi^{(5)}$	$q_{lim}{}^{(2)}$	$\phi^{(5)}$	$q_{lim}{}^{(2)}$
1	27,92	119,633	31,41	178,494	38,39	520,908	41,88	1126,453
2	30,16	90,929	33,93	170,043	41,47	594,661	45,24	1112,051
3	30,16	157,812	33,93	242,052	41,47	1030,967	45,24	1867,639
4	35,84	233,501	40,32	491,295	49,28	2174,951	53,76	4576,179
5	35,84	204,638	40,32	815,539	49,28	2980,404	53,76	7202,697
6	30,16	83,568	33,93	156,276	41,47	546,517	45,24	1022,019
7	30,16	83,568	33,93	156,276	41,47	546,517	45,24	1022,019
8	30,16	83,568	33,93	156,276	41,47	546,517	45,24	1022,019
9	30,16	83,568	33,93	156,276	41,47	546,517	45,24	1022,019
10	30,16	83,568	33,93	156,276	41,47	546,517	45,24	1022,019
11	30,16	85,179	33,93	159,290	41,47	557,057	45,24	1041,729
12	30,16	136,701	33,93	286,633	41,47	913,829	45,24	1819,811
13	30,16	150,002	33,93	229,809	41,47	965,994	45,24	1772,620
14	30,16	150,002	33,93	229,809	41,47	965,994	45,24	1772,620
15	30,16	165,664	33,93	261,244	41,47	776,570	45,24	1483,514
16	30,16	139,680	33,93	217,349	41,47	886,242	45,24	1589,762
17	29,60	76,148	33,30	140,755	40,70	480,927	44,40	888,969
18	29,60	76,148	33,30	140,755	40,70	480,927	44,40	888,969
19	29,60	76,148	33,30	140,755	40,70	480,927	44,40	888,969
20	29,60	77,890	33,30	145,615	40,70	492,022	44,40	919,214
21	29,60	80,062	33,30	149,059	40,70	509,870	44,40	934,088
22	29,60	94,504	33,30	180,281	40,70	619,007	44,40	1100,312
23	29,60	125,536	33,30	301,334	40,70	796,260	44,40	1881,902
24	29,60	125,536	33,30	301,334	40,70	796,260	44,40	1881,902
25	29,60	125,278	33,30	249,473	40,70	862,327	44,40	1453,291
26	29,60	236,033	33,30	304,372	40,70	1235,940	44,40	2647,702
27	29,60	171,314	33,30	358,512	40,70	1248,843	44,40	1978,962
28	35,20	192,963	39,60	400,643	48,40	1727,138	52,80	3586,012
29	35,20	192,963	39,60	400,643	48,40	1727,138	52,80	3586,012
30	35,20	339,498	39,60	614,704	48,40	2430,815	52,80	6651,200
31	35,20	339,498	39,60	614,704	48,40	2430,815	52,80	6651,200
32	35,20	339,056	39,60	982,976	48,40	3711,915	52,80	7867,656
33	35,20	484,004	39,60	821,453	48,40	4591,318	52,80	8320,053
34	33,60	360,369	37,80	728,169	46,20	3121,451	50,40	5627,522
35	29,60	76,148	33,30	140,755	40,70	480,927	44,40	888,969
36	29,60	76,148	33,30	140,755	40,70	480,927	44,40	888,969
37	29,60	125,850	33,30	302,087	40,70	798,251	44,40	1886,608
38	29,60	237,018	33,30	305,641	40,70	1241,095	44,40	2658,746
39	32,00	113,428	36,00	220,375	44,00	831,845	48,00	1616,155
40	32,00	248,826	36,00	555,178	44,00	2009,642	48,00	3884,049
41	31,20	171,860	35,10	340,041	42,90	1771,813	46,80	2469,608
42	32,00	148,163	36,00	287,860	44,00	1086,581	48,00	2111,070
43	25,60	138,784	28,80	315,781	35,20	971,064	38,40	1026,708
44	25,60	168,942	28,80	630,214	35,20	627,756	38,40	2213,656
45	25,60	125,887	28,80	540,395	35,20	815,136	38,40	1951,757
46	25,60	123,563	28,80	409,913	35,20	1021,328	38,40	1422,842
47	25,60	200,355	28,80	850,858	35,20	698,632	38,40	2821,432
48	27,20	11,263	30,60	20,110	37,40	61,825	40,80	110,315
49	27,20	13,721	30,60	24,875	37,40	76,019	40,80	137,619
50	29,60	17,031	33,30	31,443	40,70	107,889	44,40	194,831
51	29,60	21,064	33,30	38,840	40,70	133,837	44,40	236,120
52	31,60	23,628	35,55	45,660	43,45	170,126	47,40	325,896
53	31,60	29,087	35,55	56,371	43,45	210,796	47,40	401,462
54	33,20	30,955	37,35	61,474	45,65	244,241	49,80	487,691

55	33,20	38,274	37,35	75,783	45,65	301,521	49,80	603,547
56	34,00	35,433	38,25	71,813	46,75	295,034	51,00	598,151
57	34,00	43,911	38,25	89,063	46,75	366,523	51,00	743,896
58	27,20	18,565	30,60	32,776	37,40	101,940	40,80	176,990
59	27,20	23,624	30,60	41,870	37,40	130,958	40,80	224,473
60	29,60	27,458	33,30	51,751	40,70	174,927	44,40	325,237
61	29,60	34,693	33,30	66,670	40,70	222,942	44,40	416,936
62	31,60	38,869	35,55	74,288	43,45	277,367	47,40	546,470
63	31,60	49,876	35,55	94,555	43,45	355,045	47,40	715,271
64	33,20	51,382	37,35	101,440	45,65	399,929	49,80	794,525
65	33,20	66,823	37,35	130,757	45,65	512,267	49,80	1015,055
66	34,00	57,249	38,25	115,901	46,75	475,004	51,00	961,580
67	34,00	72,635	38,25	147,000	46,75	602,011	51,00	1218,185
68	27,20	29,729	30,60	53,697	37,40	163,119	40,80	292,094
69	27,20	38,590	30,60	71,588	37,40	213,596	40,80	389,454
70	29,60	45,000	33,30	83,512	40,70	291,733	44,40	518,414
71	29,60	59,358	33,30	110,595	40,70	394,996	44,40	674,789
72	31,60	62,541	35,55	120,176	43,45	454,624	47,40	862,980
73	31,60	82,254	35,55	157,625	43,45	607,607	47,40	1136,279
74	33,20	82,334	37,35	163,018	45,65	641,646	49,80	1289,748
75	33,20	109,298	37,35	215,112	45,65	839,978	49,80	1703,841
76	34,00	93,923	38,25	190,596	46,75	784,766	51,00	1592,642
77	34,00	124,538	38,25	253,232	46,75	1046,731	51,00	2128,743
78	27,20	17,603	30,60	32,781	37,40	98,610	40,80	176,359
79	27,20	21,238	30,60	41,882	37,40	122,542	40,80	222,875
80	29,60	27,469	33,30	54,354	40,70	173,609	44,40	341,827
81	29,60	34,720	33,30	73,546	40,70	219,594	44,40	460,555
82	31,60	39,444	35,55	74,855	43,45	287,606	47,40	529,948
83	31,60	51,363	35,55	96,003	43,45	381,742	47,40	672,675
84	33,20	54,286	37,35	98,498	45,65	406,537	49,80	744,904
85	33,20	74,589	37,35	123,281	45,65	529,337	49,80	892,227
86	34,00	59,558	38,25	111,104	46,75	481,353	51,00	954,414
87	34,00	78,614	38,25	135,084	46,75	618,213	51,00	1200,095
88	27,20	27,450	30,60	53,332	37,40	157,304	40,80	285,065
89	27,20	32,900	30,60	70,616	37,40	198,639	40,80	370,937
90	29,60	44,407	33,30	90,713	40,70	280,775	44,40	569,707
91	29,60	57,801	33,30	130,490	40,70	365,880	44,40	814,924
92	31,60	64,931	35,55	121,767	43,45	479,727	47,40	856,729
93	31,60	88,660	35,55	161,827	43,45	676,561	47,40	1119,876
94	33,20	91,048	37,35	157,807	45,65	667,092	49,80	1176,544
95	33,20	133,657	37,35	201,578	45,65	907,919	49,80	1417,866
96	34,00	98,456	38,25	174,042	46,75	783,684	51,00	1538,728
97	34,00	136,849	38,25	211,155	46,75	1043,847	51,00	1987,060
98	34,24	38,885	38,52	79,143	47,08	327,849	51,36	667,275
99	34,24	70,272	38,52	143,026	47,08	592,486	51,36	1205,896
100	34,24	25,158	38,52	51,204	47,08	212,111	51,36	431,712
101	34,24	38,885	38,52	79,143	47,08	327,849	51,36	667,275
102	34,24	48,149	38,52	97,998	47,08	405,956	51,36	826,249
103	34,24	70,272	38,52	143,026	47,08	592,486	51,36	1205,896
104	34,24	90,004	38,52	183,187	47,08	758,851	51,36	1544,499
105	34,24	107,172	38,52	218,129	47,08	903,598	51,36	1839,106
106	34,24	122,021	38,52	248,350	47,08	1028,792	51,36	2093,916
107	33,60	14,986	37,80	30,099	46,20	121,416	50,40	243,859
108	33,60	18,707	37,80	37,573	46,20	151,564	50,40	304,410
109	33,60	22,621	37,80	45,434	46,20	183,276	50,40	368,103
110	25,60	7,065	28,80	12,019	35,20	34,783	38,40	59,172
111	33,60	26,668	37,80	53,561	46,20	216,061	50,40	433,950
112	33,60	26,668	37,80	53,561	46,20	216,061	50,40	433,950
113	28,96	491,095	32,58	1076,412	39,82	1094,154	43,44	4298,411

114	28,80	165,668	32,40	396,671	39,60	568,752	43,20	1613,288
115	24,00	148,805	27,00	2051,614	33,00	315,861	36,00	639,107
116	24,00	43,826	27,00	109,264	33,00	391,455	36,00	504,742
117	27,20	37,912	30,60	66,673	37,40	206,206	40,80	362,640
118	27,20	48,999	30,60	86,172	37,40	266,510	40,80	468,692
119	27,20	48,999	30,60	86,172	37,40	266,510	40,80	468,692
120	27,20	56,021	30,60	98,519	37,40	304,699	40,80	535,853
121	27,20	64,908	30,60	114,148	37,40	353,036	40,80	620,859
122	27,20	56,021	30,60	98,519	37,40	304,699	40,80	535,853
123	27,20	37,912	30,60	66,673	37,40	206,206	40,80	362,640
124	27,20	48,999	30,60	86,172	37,40	266,510	40,80	468,692
125	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
126	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
127	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
128	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
129	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
130	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
131	30,40	113,596	34,20	213,493	41,80	754,084	45,60	1417,224
132	32,00	132,167	36,00	256,782	44,00	969,273	48,00	1883,158
133	30,40	101,332	34,20	190,444	41,80	672,673	45,60	1264,219
134	30,40	101,332	34,20	190,444	41,80	672,673	45,60	1264,219
135	30,40	305,826	34,20	551,414	41,80	2140,623	45,60	3506,112
136	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
137	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
138	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
139	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
140	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
141	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
142	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
143	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
144	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
145	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
146	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
147	32,80	169,211	36,90	334,257	45,10	1304,317	49,20	2576,528
148	32,96	154,166	37,08	305,550	45,32	1200,247	49,44	2378,835
149	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
150	33,20	180,831	37,35	360,188	45,65	1429,038	49,80	2846,433
151	32,96	282,556	37,08	410,173	45,32	1933,576	49,44	2972,225
152	36,16	171,578	40,68	363,413	49,72	1630,333	54,24	3453,139
153	36,16	171,578	40,68	363,413	49,72	1630,333	54,24	3453,139
154	37,04	198,573	41,67	428,341	50,93	1993,102	55,56	4299,317
155	28,96	77,531	32,58	141,421	39,82	470,534	43,44	858,281
156	31,04	85,871	34,92	163,544	42,68	593,213	46,56	1129,790
157	36,64	232,211	41,22	496,760	50,38	2273,396	54,96	4863,396
158	36,00	262,088	40,50	553,277	49,50	2465,662	54,00	5205,100
159	35,36	187,750	39,78	391,118	48,62	1697,311	53,04	3535,804
160	35,28	232,556	39,69	483,652	48,51	2091,917	52,92	4350,610
161	33,12	101,314	37,26	201,468	45,54	796,669	49,68	1584,215
162	35,84	159,151	40,32	334,860	49,28	1482,416	53,76	3119,058
163	36,40	174,659	40,95	371,786	50,05	1684,593	54,60	3585,882
164	28,80	343,866	32,40	2374,181	39,60	1870,425	43,20	11703,745
165	28,40	338,188	31,95	2080,916	39,05	1640,942	42,60	9733,544
166	22,40	25,248	25,20	40,191	30,80	101,846	33,60	162,126
167	26,16	70,156	29,43	143,460	35,97	413,074	39,24	647,142
168	28,00	63,979	31,50	114,399	38,50	365,757	42,00	654,000
169	28,72	83,542	32,31	151,627	39,49	499,492	43,08	906,575
170	28,72	72,103	32,31	130,867	39,49	431,103	43,08	782,450
171	28,72	63,066	32,31	114,465	39,49	377,071	43,08	684,382
172	28,80	236,642	32,40	1843,140	39,60	1297,784	43,20	8522,703

173	30,40	115,479	34,20	217,031	41,80	766,584	45,60	1440,715
174	28,80	112,457	32,40	313,104	39,60	655,916	43,20	1757,822
175	30,40	95,302	34,20	179,110	41,80	632,639	45,60	1188,979
176	28,80	112,457	32,40	313,104	39,60	655,916	43,20	1757,822
177	32,80	157,642	36,90	311,404	45,10	1215,144	49,20	2400,375
178	33,44	160,043	37,62	320,374	45,98	1283,803	50,16	2569,915
179	30,16	80,101	33,93	149,793	41,47	523,843	45,24	979,617
180	31,12	74,307	35,01	141,754	42,79	515,885	46,68	984,150
181	31,52	79,409	35,46	152,752	43,34	565,215	47,28	1087,245
182	24,96	66,076	28,08	92,566	34,32	362,498	37,44	449,420
183	24,56	63,894	27,63	75,631	33,77	355,389	36,84	439,786
184	30,16	163,249	33,93	356,353	41,47	1090,833	45,24	2254,180
185	33,84	114,180	38,07	230,471	46,53	939,003	50,76	1895,366
186	33,20	189,884	37,35	378,220	45,65	1500,580	49,80	2988,933
187	33,84	351,791	38,07	418,226	46,53	2449,652	50,76	4297,590
188	32,64	93,553	36,72	184,190	44,88	713,979	48,96	1405,707
189	33,60	202,923	37,80	407,563	46,20	1644,068	50,40	3302,040
190	33,84	114,180	38,07	230,471	46,53	939,003	50,76	1895,366
191	31,12	72,686	35,01	138,662	42,79	504,633	46,68	962,684
192	29,44	54,993	33,12	101,314	40,48	343,875	44,16	633,529
193	31,92	314,829	35,91	452,698	43,89	2536,969	47,88	3007,670
194	31,92	314,829	35,91	452,698	43,89	2536,969	47,88	3007,670
195	32,64	95,639	36,72	188,297	44,88	729,900	48,96	1437,052
196	32,80	154,805	36,90	305,799	45,10	1193,270	49,20	2357,166
197	32,64	95,639	36,72	188,297	44,88	729,900	48,96	1437,052
198	22,40	144,716	25,20	116,183	30,80	576,606	33,60	886,852
199	22,40	108,239	25,20	102,296	30,80	394,904	33,60	668,090
200	22,40	286,419	25,20	199,706	30,80	985,515	33,60	1727,539

(5) ângulo de atrito, expresso em graus (º).

APÊNDICE III

Resultado comparativo da capacidade de carga (q_{lim}) entre os métodos teóricos, combinados e heurísticos respectivamente.

	Métodos Teóricos									
Caso	TZI	MYH	BHN	VSC	SHR	SHR_mod I	SHR_mod II	Z&M	PLS	VBR
1	230,1	265,9	219,8	259,6	116	206,8	139,3	308,8	232,9	92,3
2	200,3	223,9	130,6	181,8	157,5	157,5	200,3	262,7	142,9	56,3
3	381,1	438,1	340,5	404,5	202,5	338,3	245,3	522,1	364	134,6
4	916,5	1054,6	502,9	680,9	720,7	720,7	916,5	1299,2	499,4	161,1
5	1462,6	1795,2	1127,9	1372,5	856,6	1266,8	1052,4	2288	1187	369,5
6	148,4	218,6	81,6	113,6	121	121	148,4	218,1	89,3	32,6
7	148,4	218,6	81,6	113,6	121	121	148,4	218,1	89,3	32,6
8	166,9	186,6	108,9	151,5	136,1	136,1	166,9	218,9	119,1	46,9
9	166,9	186,6	108,9	151,5	136,1	136,1	166,9	218,9	119,1	46,9
10	173,1	175,9	117,9	164,1	141,2	141,2	173,1	212,1	129	53,3
11	182,9	178	126,8	176,4	148	148	182,9	215	138,7	58,8
12	329,2	473,8	346	404,5	167,7	301,8	195	525,3	376,6	106,1
13	347,8	404,4	323,1	378,9	182,8	317	213,6	478,3	343,7	125,3
14	347,8	404,4	323,1	378,9	182,8	317	213,6	478,3	343,7	125,3
15	353,9	381,2	315,4	370,4	187,8	322	219,8	450,3	332,8	133,7
16	363,7	377,1	316	372,5	194,3	328,8	229,2	442,2	332,6	140,5
17	144,6	218,5	83,2	116,2	117,9	117,9	144,6	218,1	91,1	34,1
18	144,6	218,5	83,2	116,2	117,9	117,9	144,6	218,1	91,1	34,1
19	162,6	187,2	110,9	154,9	132,6	132,6	162,6	218,8	121,5	49,1
20	152,7	228,8	93,7	127,7	120,1	126,1	146,8	231,7	102,6	37,4
21	189,9	189,7	141,7	191,8	145	158,3	176,6	230	154,2	68
22	251,6	254	202,6	254,6	161,3	219,9	193	305,7	216,9	96,3
23	333,4	481,5	359,1	418,2	166,6	306,7	193,3	531,3	389,4	111,2
24	333,4	481,5	359,1	418,2	166,6	306,7	193,3	531,3	389,4	111,2
25	360,5	377,9	322,9	379	188,7	328,8	220,4	439,5	338,8	146,3
26	477,3	586,8	515,6	583,2	210,9	447,4	240,9	661,5	532	186,9
27	486,4	537,7	482,6	543,9	218,3	454,7	249,9	594,1	491	204
28	645,3	1019,9	308,2	418,2	526,3	526,3	645,3	1017,1	312,2	94,8
29	766,3	746,9	462,3	627,2	624,9	624,9	766,3	890	468,3	165,9

30	1195,3	1926,1	1114,3	1353,2	668,2	1076,3	787,2	2207	1238,2	304,5
31	1195,3	1926,1	1114,3	1353,2	668,2	1076,3	787,2	2207	1238,2	304,5
32	1683	1929,7	1453,3	1675,4	852,9	1541,7	994,2	2239,4	1482,1	525,7
33	1156	1292,4	1029,5	1179,7	572,4	1063,4	665	1484	1056,1	392,5
34	145,4	219,8	83,7	116,9	118,6	118,6	145,4	219,4	91,6	34,3
35	163,6	188,3	111,5	155,8	133,4	133,4	163,6	220,1	122,2	49,4
36	335,4	484,3	361,2	420,7	167,6	308,6	194,4	534,5	391,7	111,9
37	480,2	590,3	518,7	586,7	212,2	450	242,3	665,4	535,2	188
38	344,6	313,4	214,8	295,4	281,1	281,1	344,6	376,2	231,7	91,3
39	832,2	902,2	757,5	861,2	402,3	768,7	465,9	1019	776	301,5
40	755	712,9	515,6	656,2	454,2	585,1	624,1	871,7	554	222,1
41	673,2	644,5	411,2	565,6	477,9	477,9	673,2	780,8	443,6	169,6
42	483,9	647,9	574,9	648,8	185,2	436,7	232,4	684,8	601,3	182,1
43	839	1111,3	752,8	915,4	340,9	625,7	554,1	1187	804,3	289,2
44	754	995,9	708,2	848,2	304	586,3	471,7	1066,9	755,6	264,2
45	589,5	779,7	634,1	731	229,3	504,7	314,1	834,2	671,4	216
46	898,2	1187	835,8	1004	351,2	683,9	565,5	1270,8	891,9	313,7
47	78,4	83,4	75,4	84,9	56,6	85,5	49,5	90,4	76,4	33,8
48	88,2	82,9	68	81,4	81,3	101,4	68,1	96,6	71,4	30,8
49	124,5	128,1	110	124,6	96	137,6	82,8	140,4	111,9	46,8
50	123,7	120,9	95	114,1	115,3	142,6	96,5	141,1	99,1	40,5
51	172,9	184	150,8	171,8	135,2	191,8	116,4	203,4	153,4	61,2
52	149,9	148,4	113,9	137	140,8	173,1	117,7	173,3	118,1	47,1
53	208	224,1	179,2	204,7	164,4	231,2	141,2	248,7	181,9	70,9
54	85,9	85,5	73,5	87,7	67,6	92,2	61,3	99,1	77,3	35,7
55	126,6	134,8	122	137,3	82,2	132,9	75,9	145,9	123,5	54,7
56	142,3	133,7	109,7	131,3	118,4	153,9	106,8	155,6	115,3	49,8
57	201	207	177,9	201,4	139,6	212,7	127,9	226,6	180,9	75,7
58	199,5	194,9	153,3	184	168	216,2	151,4	227,3	160	65,5
59	279,3	297,3	243,9	277,7	196,7	296	180	328,1	247,9	99
60	241,7	239,3	183,8	221	205,3	262,2	184,7	279,2	190,6	76
61	335,9	362,2	289,8	330,8	239,2	356,5	218,6	401,2	293,9	114,7
62	83,7	83,2	74,9	89,3	57,3	85,2	55,8	96	78,2	39,2
63	126,7	133,8	127,5	142,9	71	128,1	69,6	143	127,9	60,5
64	138	137,3	117,9	140,8	98,4	140,6	95,9	159,4	124	57,3
65	203	215,9	195,1	219,9	119,2	205,5	116,6	234,1	197,7	87,6
66	228,8	214,8	176,1	211	172,7	233,5	168	250,4	185,2	79,8

67	322,5	331,6	284,7	322,7	202,6	327,2	197,9	363,8	289,8	121,3
68	320,9	313,4	246,1	295,7	245,1	327,7	238,3	365,9	256,9	105,1
69	448,1	476,4	390,5	444,9	285,7	454,9	279	526,9	397,3	158,6
70	388,7	384,8	295,2	355,3	299,5	397,1	291,2	449,4	306,2	122
71	539,1	580,5	463,9	530,2	347,5	547,4	339,2	644,4	471	183,8
72	74,7	106,8	98,2	110	44,1	77,6	41,2	112,3	101,6	28,2
73	78,1	112,3	79,8	93,8	58,7	83,3	53,5	123,9	86,8	25,4
74	118,8	177,2	150,4	171,2	73,4	124	68,1	191,5	158,9	42,1
75	127,9	180,3	118,2	140,7	102	137,5	92,4	201,7	130,1	36,1
76	186,6	279,2	219,1	253,2	123,1	196,2	113,5	308,2	235,3	59,6
77	178,9	268,9	164	197,4	144,5	192,7	130,7	303,8	181,4	48,2
78	258,6	410,1	299,7	351,3	173,2	272,4	159,4	459,7	325,9	79,5
79	216,3	334,2	195,9	237,3	176,3	233,3	159,3	379,1	217,1	56,4
80	310,5	505,7	355,5	419,8	210,2	327,5	193,2	570,8	388,8	92,9
81	119,7	170,9	156,7	175,5	63,7	120,9	62,6	179,8	162,3	45,2
82	125,4	180,3	127,6	150,2	85,4	127,5	83,3	199	138,9	40,8
83	190,4	283,6	240	273,2	106,1	192,5	104	306,7	253,7	67,3
84	205,5	289,5	189,2	225,4	148,6	209,4	144,7	323,9	208,2	57,9
85	299,2	446,9	349,7	404,4	178,6	303,1	174,7	493,8	375,9	95,4
86	287,6	432	262,5	316,2	210,6	293,2	205	488	290,4	77,2
87	414,8	656,7	478,5	561	251,2	420,4	245,6	736,8	520,7	127,2
88	347,7	537	313,7	380,1	257	354,6	250,1	609	347,5	90,4
89	498	810	567,5	670,4	305	504,9	298,2	914,9	621,3	148,7
90	110,9	172,1	54,5	74,2	130,5	130,5	110,9	171,6	56,6	17,7
91	208	322,7	102,2	139,2	215,8	215,8	208	321,7	106,2	33,1
92	69,3	107,6	34,1	46,4	89,6	89,6	69,3	107,2	35,4	11
93	110,3	171,1	54,2	73,8	129,8	129,8	110,3	170,6	56,3	17,6
94	137,8	213,9	67,8	92,2	155,1	155,1	137,8	213,2	70,4	22
95	206,8	320,9	101,6	138,4	214,6	214,6	206,8	319,8	105,6	33
96	275,7	427,8	135,5	184,5	270,1	270,1	275,7	426,4	140,7	43,9
97	344,6	534,8	169,4	230,6	322,9	322,9	344,6	533	175,9	54,9
98	413,5	641,7	203,3	276,7	373,6	373,6	413,5	639,6	211,1	65,9
99	32,9	50	16,3	22,2	47	47	32,9	49,8	17,2	5,5
100	43,8	66,6	21,7	29,7	59,2	59,2	43,8	66,4	22,9	7,3
101	54,8	83,3	27,2	37,1	70,8	70,8	54,8	83	28,6	9,1
102	61,2	93,1	30,4	41,4	76,3	76,3	61,2	92,7	32	10,2
103	63,7	96,8	31,6	43,1	79,4	79,4	63,7	96,5	33,3	10,6

104	939,5	1277,8	1017,8	1177,1	383,6	823,7	499,4	1429,2	1089,6	337,2
105	458,1	622	498	575,5	216,3	421,1	253,3	694,5	532,6	165,5
106	203	245,8	224,6	254,4	90,9	188,4	105,4	259,3	232,4	80,3
107	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
108	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
109	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
110	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
111	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
112	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
113	502,3	728,1	269,6	374,5	356,6	356,6	502,3	726	294,6	106,4
114	552,9	781,8	272,8	375,2	420,4	420,4	552,9	778,8	294,2	99,4
115	403,1	444,4	255,9	355,4	306,5	306,5	403,1	521,1	279,6	108,8
116	418,3	418,2	277,7	385,7	318	318	418,3	504,4	303,4	123,8
117	925,8	1312,7	867,6	1033,8	450	780,1	595,7	1453,1	950,5	278
118	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
119	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
120	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
121	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
122	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
123	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
124	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
125	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
126	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
127	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
128	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
129	964	1418,5	479,1	656,3	684,5	684,5	964	1413,1	511,3	167,6
130	699,3	1036,4	347,6	475,9	533,2	533,2	699,3	1032,5	370,1	120,6
131	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
132	1054,8	1579,2	524,3	716,9	748,9	748,9	1054,8	1573,4	556	179,7
133	975,2	1433,6	758,2	936,1	583,4	817	741,6	1580,9	834,8	236,6
134	744,4	1176,6	337,9	457,1	668	668	744,4	1173,9	331,8	98,4
135	744,4	1176,6	337,9	457,1	668	668	744,4	1173,9	331,8	98,4
136	995	1540,1	420,4	567,4	892,9	892,9	995	1536,7	399	116,4
137	284,2	434,7	168,9	237,2	219,3	219,3	284,2	434,5	185,2	71,4
138	322,9	438,2	158,6	219,4	275,4	275,4	322,9	436,8	172,6	60,7
139	1449	2271,1	634,7	857,4	1207	1207	1449	2265,9	612,2	179,9
140	1970,3	3119	903,6	1222,9	1481,7	1481,7	1970,3	3111,5	892,4	265,7

141	979	1549,6	464,5	629,8	815,5	815,5	979	1545,5	468,3	141,6
142	1595,3	2523,4	759,5	1030,1	1199,7	1199,7	1595,3	2516,6	767,5	232,6
143	369,9	552	183,9	251,5	334,1	334,1	369,9	549,9	195,3	63,3
144	750,8	1189,6	347,7	470,7	678,2	678,2	750,8	1186,7	345,2	103,2
145	893,3	1407,2	398,7	539,0	806,9	806,9	893,3	1404,0	388,2	114,6
146	239	321,4	254,7	295	114,5	216,8	136,7	345,6	271	86,7
147	148,9	226,5	90,6	128,3	116,7	116,7	148,9	226,9	99,2	40
148	261,9	401	157	220,9	189,5	189,5	261,9	401	172,1	67,1
149	175,6	268,8	105,2	148,1	137,6	137,6	175,6	268,8	115,3	45
150	132,4	202,7	79,4	111,7	109,8	109,8	132,4	202,7	87	33,9
151	612,3	887,5	328,7	456,5	429,7	429,7	612,3	885	359,1	129,7
152	396,1	585,3	511	578,2	184,1	384	196,2	626,6	535,9	144,3
153	363,9	527,4	195,3	271,3	285,2	285,2	363,9	525,9	213,4	77,1
154	396,1	585,3	511	578,2	184,1	384	196,2	626,6	535,9	144,3
155	785	1155,1	390,1	534,4	582,8	582,8	785	1150,6	416,4	136,5
156	715	1080,8	355,1	485	556,8	556,8	715	1076,9	374,9	120,1
157	228,9	337,2	125,9	175,2	189,8	189,8	228,9	336,3	137,7	50,3
158	195,3	262,1	94,6	130,7	175,2	175,2	195,3	261,2	102,9	36
159	210,9	290,2	103,2	142,3	189,2	189,2	210,9	289,2	111,9	38,5
160	217,5	292,7	284,2	314,8	97,5	211,4	103,5	300,4	289,6	84
161	204,4	272,2	267	295,1	91,4	198,7	97	278	271,2	79,2
162	545,6	812	669,8	766,3	266,8	526,8	285,6	884,9	712,6	187,3
163	438,1	671,6	216,7	295,5	395,7	395,7	438,1	669,3	227,1	71,8
164	1506,9	2256	749	1024,2	1031,6	1031,6	1506,9	2247,7	794,3	256,7
165	1143	1852,1	1312,3	1547,2	600,3	1099,8	643,5	2087,6	1433,8	344
166	332,4	485,5	165,1	226,3	300,3	300,3	332,4	483,7	176,6	58,2
167	1654,1	2515,2	820,5	1119,9	1132,4	1132,4	1654,1	2506,2	863,7	275,3
168	438,1	671,6	216,7	295,5	395,7	395,7	438,1	669,3	227,1	71,8
169	243,8	327,3	118,1	163,3	220,2	220,2	243,8	326,1	128,5	45
170	113,6	172,4	66	92,3	102,6	102,6	113,6	172,2	72,3	27,3
171	917,9	1310,6	843,7	1007,5	496,7	809,4	605,2	1469,2	929,7	256,4
172	917,9	1310,6	843,7	1007,5	496,7	809,4	605,2	1469,2	929,7	256,4
173	278,2	406,4	138,2	189,4	249,7	249,7	278,2	404,8	147,8	48,7
174	706,5	1039,6	351,1	481	529,9	529,9	706,5	1035,6	374,7	122,8
175	278,2	406,4	138,2	189,4	249,7	249,7	278,2	404,8	147,8	48,7
176	206,1	253	244,4	271,8	80	189,2	96,9	255,8	249,5	79,2

	Métodos Combinados						
Caso	VSC-B&L_II	VSC-KUMB	VSC-W_II	PLS-Z&M	PLS-B&L_II	PLS-JHND	PLS-KM_II
1	266,4	260,5	268	259,3	265,2	250,4	259
2	196,2	190,5	198,8	190	196,2	178	190,6
3	418,9	413,3	421,6	411,1	417,3	399,1	411,7
4	807,6	825,2	825,6	799,9	807,6	815,6	807,3
5	1499,2	1516,8	1517,2	1487,5	1495,2	1503,2	1494,9
6	122,6	119,1	124,2	118,8	122,6	111,2	119,1
7	122,6	119,1	124,2	118,8	122,6	111,2	119,1
8	163,5	158,8	165,7	158,3	163,5	148,3	158,8
9	163,5	158,8	165,7	158,3	163,5	148,3	158,8
10	177,1	172	179,5	171,5	177,1	160,7	172,1
11	190,4	185	193	184,5	190,4	172,8	185
12	413,5	410	415,1	406,1	409,9	398,6	406,4
13	390,9	386,2	393,1	383	388,1	373	383,5
14	390,9	386,2	393,1	383	388,1	373	383,5
15	383,4	378,3	385,8	375,4	380,9	364,5	375,9
16	386,5	381	389	378,4	384,3	366,7	378,9
17	124,7	120,5	126,4	120,3	124,7	112,2	120,5
18	124,7	120,5	126,4	120,3	124,7	112,2	120,5
19	166,3	160,7	168,5	160,4	166,3	149,5	160,7
20	136,2	132	137,9	131,8	136,2	123,7	132,1
21	204,6	198,3	207,1	198	204,6	185,8	198,4
22	267,5	261,2	269,9	260,8	267,4	248,5	261,1
23	426,8	422,6	428,4	418,6	423	410,4	418,8
24	426,8	422,6	428,4	418,6	423	410,4	418,8
25	391,8	385,5	394,3	382,6	389,2	370,4	383
26	594,6	589	596,8	571	576,9	560,1	571,3
27	556,8	550,5	559,2	534,9	541,5	522,6	535,2
28	488,6	496,3	498,7	483,5	488,6	486,3	487,9
29	732,9	744,5	748	725,3	732,9	729,4	731,8
30	1423,6	1431,3	1433,7	1409,5	1414,6	1412,2	1413,8
31	1423,6	1431,3	1433,7	1409,5	1414,6	1412,2	1413,8
32	1781,1	1792,6	1796,2	1739,1	1746,7	1743,2	1745,6
33	1236,2	1237	1244,6	1203,9	1210,8	1192,9	1207,7
34	125,5	121,2	127,1	121	125,5	112,8	121,3
35	167,3	161,6	169,5	161,4	167,3	150,4	161,7

36	429,3	425,1	431	421,1	425,5	412,9	421,3
37	598,2	592,5	600,4	574,4	580,3	563,5	574,7
38	325,9	321,8	330,7	319,1	325,9	304,9	321,1
39	891,6	887,6	896,5	863,5	870,2	849,2	865,5
40	700,1	689,9	707,4	687	700	659,7	689,5
41	624	616,2	633,2	611,1	624	583,8	614,8
42	656,4	645,4	658,6	634,2	645,3	621,9	632,7
43	938,5	905,1	945,2	903,9	937,8	866,8	899,6
44	867,3	839,6	872,9	838,1	866,2	807,4	834,5
45	742,5	725,9	745,8	720,8	737,7	702,4	718,7
46	1027,2	993,6	1033,9	992	1026	954,7	987,6
47	87,1	86	87,5	83,7	84,8	81,6	83,7
48	85,8	85	86,5	84,4	85,5	82	84,7
49	129	128,2	129,7	124,9	126	122,5	125,2
50	122,1	122	123,3	120,7	121,8	118,6	121,2
51	179,9	179,7	181,1	175	176,1	172,9	175,5
52	148,2	148,6	149,8	146,6	147,8	145,1	147,4
53	215,8	216,3	217,5	210,4	211,6	208,9	211,1
54	91,1	89,4	91,8	89	90,8	85,7	89,1
55	140,8	139,1	141,4	135,3	137	132	135,3
56	138,4	137,1	139,5	136,1	137,9	132,3	136,6
57	208,5	207,2	209,7	201,8	203,6	197,9	202,2
58	197	196,7	198,9	194,6	196,5	191,3	195,5
59	290,6	290,4	292,6	282,6	284,4	279,2	283,5
60	238,9	239,6	241,5	236,4	238,3	234	237,6
61	348,7	349,4	351,3	339,7	341,6	337,4	340,9
62	91,9	89,2	92,6	88,8	91,6	85,1	88,6
63	145,5	142,8	146,2	138,6	141,3	134,8	138,3
64	146,4	143,6	147,5	143	145,9	137,7	143,2
65	225,4	222,7	226,5	216,8	219,6	211,4	216,9
66	222,4	220,3	224,2	218,8	221,7	212,6	219,5
67	334,1	332	335,9	323,5	326,4	317,3	324,2
68	316,7	316,3	319,8	312,9	315,9	307,5	314,3
69	465,9	465,5	469	453,3	456,3	447,9	454,7
70	384,2	385,4	388,4	380,2	383,3	376,4	382,1
71	559	560,2	563,3	545,1	548,1	541,2	547
72	111	110	111,3	105,9	107	104,4	105,8

73	96	94,9	96,4	94,4	95,5	92,3	94,4
74	173,4	172,3	173,8	166,4	167,5	164,3	166,5
75	145,3	144,5	146	143,4	144,6	141	143,7
76	257,8	257	258,5	248,7	249,9	246,2	249
77	205,8	205,6	207	203,7	204,9	201,6	204,3
78	359,6	359,5	360,9	348,2	349,4	346,1	348,8
79	248,8	249,2	250,4	246,5	247,8	245	247,3
80	431,3	431,7	432,9	418,3	419,5	416,8	419,1
81	177,2	175,5	177,6	169,1	170,9	166,7	169
82	153,8	152	154,5	151,2	153	147,7	151,3
83	276,8	275	277,5	265,9	267,8	262,5	266
84	232,7	231,4	233,9	229,8	231,7	225,8	230,3
85	411,7	410,4	412,9	397,5	399,4	393,5	398
86	329,7	329,5	331,7	326,5	328,4	323	327,4
87	574,5	574,2	576,5	556,8	558,7	553,3	557,7
88	398,7	399,4	401,4	395,2	397,1	392,7	396,4
89	689	689,7	691,7	668,9	670,9	666,4	670,1
90	85	85,6	86,6	84	85	82,9	84,7
91	159,4	160,5	162,3	157,4	159,4	155,5	158,7
92	53,1	53,5	54,1	52,5	53,1	51,8	52,9
93	84,5	85,1	86,1	83,5	84,5	82,4	84,2
94	105,6	106,4	107,6	104,3	105,6	103	105,2
95	158,5	159,6	161,4	156,5	158,5	154,5	157,8
96	211,3	212,8	215,2	208,7	211,3	206,1	210,4
97	264,1	266	269	260,8	264,1	257,6	263
98	316,9	319,2	322,7	313	316,9	309,1	315,6
99	25,2	25,2	25,6	24,8	25,2	24,2	25
100	33,6	33,6	34,1	33,1	33,6	32,3	33,3
101	42	42	42,7	41,4	42	40,4	41,7
102	46,9	47	47,7	46,2	46,9	45,2	46,6
103	48,8	48,9	49,6	48,1	48,8	47	48,5
104	1200,1	1185,8	1204,9	1172,3	1186,8	1147,1	1172,4
105	586,5	579,3	588,8	572,6	579,9	560,2	572,6
106	258	251,6	259,2	247,9	254,6	242,2	246,8
107	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
108	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
109	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5

110	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
111	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
112	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
113	405,2	394,5	410,7	393,1	405,2	369,1	394,5
114	413,9	408,8	420	405,3	413,9	387,2	407,8
115	384,5	374,3	389,7	373,1	384,5	350,3	374,4
116	417,3	406,2	422,9	404,9	417,3	380,1	406,3
117	1064,4	1053,7	1069,9	1049	1061,1	1025	1050,4
118	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
119	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
120	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
121	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
122	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
123	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
124	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
125	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
126	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
127	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
128	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
129	732,7	728,7	744,3	720,1	732,7	695,2	725,2
130	532,6	530,5	541,2	523,8	532,6	506,9	527,7
131	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
132	805,6	804	818,9	793	805,6	770,1	799
133	990,2	988,1	998,4	981,1	989,5	965	984,8
134	546,4	560	559,1	541,4	546,4	556,1	546,4
135	546,4	560	559,1	541,4	546,4	556,1	546,4
136	694,4	717,8	712,6	688,2	694,4	723,1	694,6
137	253,3	243,3	256,6	243,1	253,3	225,5	243,2
138	239,1	234,1	242,4	232,9	239,1	220,1	234
139	1037,9	1068,6	1063,6	1028,6	1037,9	1069,3	1038,2
140	1456	1489,9	1489,2	1442,4	1456	1476,1	1455,7
141	738,6	751,3	754,1	731,1	738,6	737,7	737,7
142	1205,8	1225,7	1230,8	1193,4	1205,8	1202,2	1204,2
143	282,3	281,5	286,9	277,8	282,3	269,4	279,9
144	558,2	570,4	570,7	552,9	558,2	563,8	558
145	648,3	665,9	663,8	642,4	648,3	663,8	648,4
146	299,9	293,5	301,3	291,8	298,2	284,1	291,1

147	136,2	129,6	138	129,6	136,2	119,4	129,3
148	235,5	225,6	238,6	225,6	235,5	208,8	225,5
149	157,9	151,3	159,9	151,2	157,9	140	151,2
150	119	114,1	120,6	114	119	105,6	114
151	493,9	480,8	500,6	479,2	493,9	449,9	480,9
152	584,8	580,5	586,2	560,1	564,5	552,6	560,1
153	293,5	285,7	297,5	284,8	293,5	267,3	285,8
154	584,8	580,5	586,2	560,1	564,5	552,6	560,1
155	596,6	593,3	606,1	586,4	596,6	566,1	590,5
156	547,3	547,3	556,5	539,2	547,3	525,5	543,4
157	189,1	183,7	191,6	183,2	189,1	171,6	183,7
158	142,6	139,7	144,6	139	142,6	131,4	139,7
159	156	153,4	158,2	152,4	156	144,7	153,2
160	317,5	313,2	318,3	301,4	305,9	297	300,8
161	297,6	293,4	298,4	282,2	286,6	278,1	281,6
162	777,5	773,1	779,5	749,1	753,9	739,8	749,5
163	335,9	337,1	341,8	331,3	335,9	325	334
164	1150,9	1148,6	1169,9	1132,9	1150,9	1100,1	1141,5
165	1588,4	1589,6	1594,4	1540,1	1544,8	1533,7	1542,9
166	252	250,3	256	247,5	252	238,4	249,2
167	1267,3	1269,1	1289	1249,2	1267,3	1220,5	1259,1
168	335,9	337,1	341,8	331,3	335,9	325	334
169	178,1	174,5	180,6	173,6	178,1	164,1	174,4
170	98,9	95,4	100,2	95,3	98,9	88,7	95,5
171	1042,2	1037,3	1047,8	1029,9	1037,8	1013,1	1032,1
172	1042,2	1037,3	1047,8	1029,9	1037,8	1013,1	1032,1
173	210,9	209,5	214,2	207,2	210,9	199,6	208,6
174	536,9	534	545,5	527,7	536,9	509,5	531,5
175	210,9	209,5	214,2	207,2	210,9	199,6	208,6
176	275,1	268,7	276,2	262,6	269,6	258	261,4

	Métodos Heurísticos								
Caso	KLN	SADRO	POOR,V	KHR	L&K-GOA	L&K-SSA	Z&X-MNLR	Z&X-MLR	Método Proposto
1	269,3	222,6	294,9	238	270,9	268,8	408,9	296,1	258,7
2	182,6	246,9	205,7	160,8	194,3	219,7	258,5	317,1	318
3	436,9	458,3	478,7	316,8	557,7	567,7	499,9	409,1	452,2
4	860	770,6	921,3	585,7	853,1	859,7	983,1	603	1033,7
5	1719,3	1759,7	1817,2	1011,8	1730,6	1758,3	1078,1	694,9	1826,9
6	177,1	221,5	157,7	153,8	152,9	156,2	217,9	287,1	292,2
7	177,1	221,5	157,7	153,8	152,9	156,2	217,9	287,1	292,2
8	151,2	221,5	180,9	134	196,9	204,2	164,7	280,7	292,2
9	151,2	221,5	180,9	134	196,9	204,2	164,7	280,7	292,2
10	142,5	221,5	210,7	143	232,1	228,2	176,9	274,3	292,2
11	144,4	226,6	244,6	161,9	187,1	170,8	255,3	276,1	297,9
12	480,2	481,7	666,9	341,5	677,2	674,5	470	379	350,4
13	409,8	432,9	450,2	297,4	537,4	542,1	421,2	372,6	423,9
14	409,8	432,9	450,2	297,4	537,4	542,1	421,2	372,6	423,9
15	386,3	416,6	406,6	317,4	405,9	375	437,7	366,2	457,1
16	380,8	414,5	413,6	349,9	415,9	414,5	516,8	368,1	491,2
17	177	185	135	165,8	130,5	129,9	153,2	263,4	260,2
18	177	185	135	165,8	130,5	129,9	153,2	263,4	260,2
19	151,6	185	155,8	144,4	147,8	120,4	71,1	257	260,2
20	182,1	185,4	136,3	172,5	141,6	134,3	163,6	267,4	264,6
21	150	186,6	214,1	186	116,8	135,1	127,6	253,1	271
22	215	216,4	244,6	245,3	183,6	184,8	216,2	283,2	309,9
23	489,8	399,8	595,2	368,2	438,3	407,8	430,1	355,4	376,9
24	489,8	399,8	595,2	368,2	438,3	407,8	430,1	355,4	376,9
25	384,4	360,3	357,2	378,6	320,8	323,9	392,8	336,2	388,3
26	707,1	708,6	811,7	495,4	549,5	543,3	582,6	410,3	471,6
27	648	672	580,8	585	429,6	422,3	629	397,5	497,7
28	826,4	605	622,5	627,6	789,1	779,8	710,4	545,4	831,8
29	605,2	605	871,5	560,5	791,9	798,8	714,1	526,2	831,8
30	1881,6	2095,4	2046,2	1193,5	1775,9	2104,6	843,5	637,4	2037,2
31	1881,6	2095,4	2046,2	1193,5	1775,9	2104,6	843,5	637,4	2037,2
32	2207,8	2105,4	2053,8	1513,6	1678,1	2044,2	1000,5	679,5	2059,2
33	1491,9	1507,7	1376,3	1124,4	1461,8	1492,8	832,7	596,1	1284,6
34	178,1	185	135	166,8	116,8	129,9	152,7	263,6	260,2

35	152,5	185	155,8	145,3	131,5	118,3	69,3	257,2	260,2
36	492,7	400	595,2	370,4	377	393,3	430	355,6	377,8
37	711,4	709,2	811,7	498,4	472,8	476,4	581,6	410,5	473,6
38	253,9	350	385,4	227,6	465,8	448	307,7	365,1	428,2
39	1064,8	1116,9	977,8	780,8	1133,5	1180,1	731	518,4	991,3
40	632,1	599,9	608,8	502,6	707,1	704,6	672,3	575	676,2
41	535,1	600	578	409,1	632	632,9	678,2	553,6	559,3
42	846,8	1190,5	1405,3	712,4	71	1765,8	1246,4	472,3	1747,6
43	1267	907,7	808,3	1222,6	58,9	1018,3	917,3	1221,9	934,4
44	1166,8	1031,3	1255,5	1086,4	59	1160	1039,3	1034,2	1051,3
45	986,7	1270,6	1585	843,3	59,7	1539,2	1243	670,6	1642,6
46	1424,4	1464,1	1315,6	1296,8	59	1162,1	1001,3	1265,2	1223,7
47	61,5	110,3	76	114,2	101,3	98,9	46,4	101,3	71,5
48	56,6	127,1	124,2	84,1	120,2	128,2	78,5	193,6	88,5
49	94,5	134	128,2	145,8	138,9	147,8	109	202,5	109,9
50	83	146,2	186,8	130,6	157,1	165,2	173,9	274,4	121,9
51	135,8	155,3	192,4	203,6	182,9	187,9	200,6	283,3	149,6
52	102,3	156,3	228,9	152,2	185,2	187,3	229,4	315,3	145,6
53	165,6	166,7	235,5	237,2	214,7	210,7	254,2	324,2	180,7
54	62,1	114,4	91,2	106,8	106,3	99,2	47,1	110,6	94,4
55	110,2	128,1	98,3	186	129,8	121,5	104,8	125	120
56	97,5	146,6	153	136,4	149,8	152,1	115,2	211,7	142,6
57	168,5	164,7	163,5	237,5	184,3	188	165	226,1	180,9
58	142,6	175	229,2	211,7	201	198	211,1	292,6	201,3
59	241,3	198,7	243,9	331	245,3	234,6	254,6	307	258,6
60	175,4	190,2	280,6	246,7	237,7	223,7	266,4	333,4	234,6
61	293,6	217,4	298	385,6	285,9	259,7	306,8	347,8	297,5
62	65,2	81,7	63,5	126,8	94,4	90,8	73,8	19,5	92,8
63	122,2	110,6	75,3	219,5	119,6	129,3	181,5	42,5	121,5
64	107,5	132,2	121,7	170,5	141,1	118,6	82,5	140,6	152,2
65	195,6	167	139,8	295,3	180,5	168,6	175	163,6	198,7
66	168,1	181,7	201,9	217,8	209,8	202,3	151,3	241,8	235
67	298,1	228	228,8	377,1	258,3	270,3	231,2	264,8	312,8
68	245,1	226,4	301	338,6	287,2	289	247,8	322,6	321,2
69	425,5	286,9	338,6	527,1	344,2	343,4	317,7	345,6	419,2
70	300,9	250,6	367,9	394,6	338,6	336	302,9	363,5	386,7
71	516,8	320,1	412,5	614,1	398,2	384,6	367,9	386,5	514,8

72	87,6	93,1	59,9	109,4	87,7	88,5	146,8	35,8	77,4
73	81,6	115,5	74,5	84,5	103,8	101,1	60,4	142,6	93,2
74	144,8	132,4	108	147,2	129,3	123,2	114,6	157	116,9
75	131,5	152,4	125,9	108	150	149	109	243,7	139,6
76	227,3	188	174,6	187,9	186,9	187,9	155,4	258,1	173,3
77	196,8	187,8	189,9	197	202,9	193,8	187,6	324,6	201,1
78	332,9	249,7	257	307,9	245,8	255,9	227,7	339	258,1
79	244,9	207,6	233,3	229,5	233,7	232,7	247,2	365,4	241,2
80	410	287	312,7	358,7	277,5	302,6	284,2	379,8	314,4
81	156,1	113,1	111,7	174,5	118,4	124,1	242,4	74,1	133,5
82	141,2	135	102,4	135,6	133	134,6	118,8	172,3	149,5
83	256,9	178	187,8	234,8	186,2	176,6	205,9	195,3	191,8
84	226,6	196,5	169,2	173,2	200,1	205,1	168,3	273,4	223,5
85	401,8	287,2	293,1	299,8	265,1	262,6	242,8	296,4	282,9
86	337,9	258,8	252,8	316,4	271,1	271,7	247,7	354,3	328
87	586,6	416,5	423,6	492,5	339,5	368,2	312,1	377,3	437,3
88	419,9	294,7	309,5	368,7	309,9	310,7	307	395,2	397,2
89	721,1	496,8	511,8	573,8	381	422,7	366,7	418,2	543,1
90	130,8	173,8	210,9	118,4	186,4	176,2	223	358,2	161,1
91	250,7	232,2	255,5	222	227,1	213,7	272	383,7	291,1
92	80,4	148,7	191,8	74	171	161,4	201,9	347,3	104,2
93	130	173,8	210,9	117,7	186,1	167,3	218,6	357,9	161,1
94	163,8	190,5	223,7	147,2	197,1	178,2	232,8	365,2	199,5
95	249,2	232,2	255,5	220,7	226,7	207,9	268,3	383,4	291,1
96	335,7	273,9	287,3	294,3	259,3	240,1	303,6	401,7	372,8
97	422,9	315,7	319,1	367,9	293,8	274,3	338,8	419,9	444
98	510,7	357,4	350,9	441,5	329,1	309,7	374	438,1	505,5
99	36,7	127,1	151,7	36,8	134,8	70,8	88,2	304,2	60,5
100	49,4	134,4	157	49,1	138,3	71,6	95,9	307,8	75,5
101	62,2	141,8	162,3	61,4	141,9	72,5	103,6	311,5	91,3
102	70	149,1	167,6	68,6	127	85,6	75,6	312	107,6
103	72,8	149,1	167,6	71,4	137,9	73,6	93,9	313,7	107,6
104	1597,8	1280	2204,3	1030,6	63,5	2622,6	1093	682,3	1131
105	667	398,2	607,7	509,3	454	235,7	568,3	363,6	504,7
106	273,2	373,4	259,3	290	203,8	190	825,3	123,7	223
107	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
108	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2

109	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
110	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
111	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
112	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
113	604,5	380	270,9	495,6	154,3	883,4	491,5	498,2	401,2
114	641,3	455	330,5	421,7	284,4	780,5	449,4	472,7	498,9
115	364,5	297,4	246,5	308,2	298,5	117,3	179,1	386,5	357,9
116	343,1	297,4	290,5	327,9	379,7	60,7	76,8	380,2	357,9
117	1376,9	1009,2	1369,3	895,8	144,3	438	814,8	630	587,7
118	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
119	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
120	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
121	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
122	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
123	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
124	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
125	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
126	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
127	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
128	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
129	1177,6	717,5	527,9	1133,4	240,4	785,6	692,3	620,5	660,3
130	849,7	550	424,9	815,2	363,7	590,2	523,9	519,1	605,6
131	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
132	1311,1	778,1	589,7	1212,9	256,4	863,5	736,8	640,5	717,4
133	1276	894,5	824	1076,9	515,3	1245,9	644,1	578,1	949,3
134	937,5	470,3	605,1	641	507,6	515,1	578,1	538,6	769,7
135	937,5	470,3	605,1	641	507,6	515,1	578,1	538,6	769,7
136	1227,1	521,2	775,3	743,2	660,1	921,7	685,5	582,6	924
137	355,7	162,2	135,6	358,8	182,1	210,1	457,3	315,6	258
138	352,3	244,4	174,6	272,5	210,8	211,9	424,6	324,5	311,5
139	1833,3	671	870,2	1159,4	1975,5	187,1	776,1	621,2	1062,7
140	2563,4	956,3	1039,9	1735,4	1201,9	209,1	875,8	698,6	1168
141	1251	568	607,2	935,1	703,8	207,5	644,9	557,2	814,8
142	2073,9	862,7	848,2	1537,6	713,4	216,7	792,3	662,6	1005,9
143	439,3	302,2	259,6	427,3	255	215,4	422,9	390,5	400,6
144	946,7	441,3	543,5	675,7	797,4	196,2	606,7	526,5	704,6
145	1119,9	472,1	635,2	742,4	1395,2	185,8	659,8	554,5	791,4

146	329	167,8	316,9	332,6	208,1	207,5	546,7	231,9	392,6
147	184,8	87,5	97,3	210,9	93,8	111,5	181,9	231,9	204,6
148	331,8	163,3	157,2	341,3	107,9	621,7	359	377,3	275,2
149	219,3	139	120	228,8	106,2	124,2	199,5	267,9	237,5
150	163,8	126,9	99,8	172,5	94,7	83,3	118,3	213,2	207,8
151	738,3	397,1	281,8	604,1	147,7	238,2	498,3	527	407,9
152	631,3	321,8	505,3	523,7	476,6	213,1	688,8	270,4	404
153	430,3	268,9	192,2	359	224	219,3	377,7	364,7	336,6
154	631,3	321,8	505,3	523,7	476,6	213,1	688,8	270,4	404
155	951,5	594,5	447,9	922,9	329,6	499,1	568,5	548,4	615,1
156	882,8	552,2	449,6	810	405,8	469,5	523,9	518,4	641,3
157	272,4	211,3	149,6	237,3	177,1	270,7	237,8	292,5	280,1
158	208,8	214,8	154,3	161,1	142,7	96,9	135	281,2	270,4
159	231,3	232,9	172	168,3	156,1	97,9	154,2	301,1	293,8
160	319,7	291,2	241,5	348,4	308,8	207,5	1141,2	79,4	212,6
161	298	317,4	226,2	331,9	283,7	207,2	1190,3	59,4	186,8
162	859	468	624,4	633,2	964,8	221,1	745,1	339,3	446,7
163	534,5	337,3	315	482,6	298,6	214,7	459,6	426,5	465,2
164	1885	913	675,3	1732,7	160,9	225,3	763,9	722,7	753,4
165	1914,9	1377,4	1362	1329,4	2825,8	297	733,8	519,7	1332,1
166	386,4	279,5	228,3	393,9	232,8	215,1	403,2	366,5	362,6
167	2101,6	987	755,7	1853,9	170,7	227,2	807	742,7	818,6
168	534,5	337,3	315	482,6	298,6	214,7	459,6	426,5	465,2
169	260,4	211	151,7	201,1	179,2	213	366,2	290,6	264,5
170	137,2	141,7	95,4	133,7	108,1	140,8	101,6	195	186,7
171	1289,4	943,9	1005,5	753	703,3	318,5	631	527,7	854,4
172	1289,4	943,9	1005,5	753	703,3	318,5	631	527,7	854,4
173	323,8	285,4	232,3	329,7	223,1	196,2	238,5	359,2	370,7
174	854,8	569,9	431,5	830,6	335,1	967	551,7	531,2	604,1
175	323,8	285,4	232,3	329,7	223,1	196,2	238,5	359,2	370,7
176	327,8	2039,4	642,4	336,2	121,8	113,7	1250,8	204,8	147,9

APÊNDICE IV

Resultados obtidos nas análises estatísticas para cada método avaliado, com destaque para o Método Proposto.

Ranking Distance		
Ordem	**Método**	**RD**
1	SHR_mod I	0,3082
2	**Método Proposto**	**0,3721**
3	PLS-JHND	0,3740
4	PLS-Z&M	0,3787
5	PLS-KM_II	0,3788
6	PLS-B&L_II	0,3839
7	VSC	0,3866
8	VSC-KUMB	0,3867
9	VSC-B&L_II	0,3911
10	SHR	0,3925
11	VSC-W_II	0,3936
12	TZI	0,3939
13	PLS	0,4101
14	BHN	0,4169
15	L&K-GOA	0,4317
16	SHR_mod II	0,4492
17	L&K-SSA	0,4783
18	KHR	0,4916
19	KLN	0,5973
20	POOR,V	0,6195
21	VBR	0,7363
22	MYH	0,7473
23	Z&X-MLR	0,7511
24	Z&M	0,7862
25	Z&X-MNLR	1,1339
26	SADRO	1,6726

Ranking Index		
Ordem	**Método**	**RI**
1	**Método Proposto**	**0,3519**
2	TZI	0,3963
3	VSC-W_II	0,4415
4	SADRO	0,4425
5	KHR	0,4473
6	VSC-B&L_II	0,4544
7	PLS-B&L_II	0,4576
8	VSC-KUMB	0,4638
9	PLS-KM_II	0,4721
10	SHR_mod I	0,4761
11	PLS-Z&M	0,4764
12	POOR,V	0,4870
13	Z&X-MNLR	0,4997
14	PLS-JHND	0,5075
15	KLN	0,5310
16	VSC	0,5439
17	Z&X-MLR	0,5669
18	MYH	0,6773
19	L&K-SSA	0,6928
20	Z&M	0,7221
21	SHR_mod II	0,7420
22	PLS	0,7671
23	BHN	0,8234
24	SHR	0,8278
25	L&K-GOA	1,0356
26	VBR	1,8625

Coeficiente de Determinação		
Ordem	**Método**	**r^2**
1	**Método Proposto**	**0,8782**
2	POOR,V	0,7715
3	PLS-JHND	0,7115
4	PLS-B&L_II	0,7098
5	PLS-Z&M	0,7094
6	VSC-B&L_II	0,7092
7	VSC-W_II	0,7088
8	VSC-KUMB	0,7087
9	PLS-KM_II	0,7086
10	VSC	0,7075
11	SADRO	0,7044
12	BHN	0,6966
13	PLS	0,6883
14	VBR	0,6659
15	SHR_mod I	0,6651
16	KLN	0,6590
17	L&K-SSA	0,6141
18	Z&M	0,6031

Erro Absoluto Médio		
Ordem	**Método**	**MAE**
1	**Método Proposto**	**90,8**
2	SADRO	115,5
3	POOR,V	121,0
4	PLS-B&L_II	133,4
5	PLS-Z&M	133,6
6	PLS-KM_II	133,8
7	PLS-JHND	133,9
8	VSC-KUMB	134,6
9	VSC-B&L_II	134,6
10	VSC-W_II	134,8
11	SHR_mod I	135,2
12	VSC	137,6
13	L&K-SSA	145,6
14	Z&X-MNLR	152,2
15	TZI	154,8
16	PLS	165,9
17	BHN	174,0
18	Z&X-MLR	181,4

19	TZI	0,6018
20	KHR	0,5632
21	Z&X-MNLR	0,5518
22	MYH	0,5486
23	Z&X-MLR	0,4961
24	SHR	0,4297
25	L&K-GOA	0,4018
26	SHR_mod II	0,4012

19	KHR	181,6
20	L&K-GOA	185,2
21	SHR	187,6
22	KLN	200,0
23	SHR_mod II	204,2
24	MYH	255,8
25	Z&M	275,0
26	VBR	361,1

Raiz do Erro Quadrático Médio		
Ordem	**Método**	**RMSE**
1	**Método Proposto**	**142,2**
2	POOR,V	202,8
3	VSC-W_II	221,2
4	VSC-B&L_II	221,4
5	PLS-B&L_II	221,5
6	VSC-KUMB	221,9
7	PLS-Z&M	222,5
8	PLS-KM_II	222,6
9	PLS-JHND	223,3
10	VSC	228,7
11	SADRO	230,1
12	SHR_mod I	249,8
13	PLS	264,9
14	TZI	266,8
15	Z&X-MNLR	275,4
16	BHN	276,3
17	L&K-SSA	281,5
18	KHR	286,0
19	Z&X-MLR	313,6
20	KLN	329,3
21	SHR_mod II	341,3
22	SHR	342,8
23	L&K-GOA	362,2
24	MYH	434,0
25	Z&M	445,5
26	VBR	496,6

Erro Percentual Absoluto Médio		
Ordem	**Método**	**MAPE**
1	SHR_mod I	22,8%
2	**Método Proposto**	**24,4%**
3	PLS-JHND	27,8%
4	PLS-Z&M	27,9%
5	PLS-KM_II	27,9%
6	PLS-B&L_II	28,1%
7	L&K-SSA	28,1%
8	TZI	28,2%
9	VSC-KUMB	28,5%
10	L&K-GOA	28,7%
11	VSC-B&L_II	28,7%
12	VSC	28,7%
13	VSC-W_II	28,8%
14	POOR,V	30,5%
15	SHR	32,4%
16	PLS	32,9%
17	BHN	34,3%
18	KHR	35,4%
19	SADRO	36,2%
20	SHR_mod II	37,7%
21	Z&X-MNLR	40,1%
22	KLN	41,2%
23	Z&X-MLR	47,0%
24	MYH	52,0%
25	Z&M	57,0%
26	VBR	72,7%

Índice a20		
Ordem	**Método**	**a20**
1	**Método Proposto**	**0,6080**
2	L&K-SSA	0,6023
3	SHR_mod I	0,5625
4	L&K-GOA	0,5568
5	SADRO	0,5398
6	POOR,V	0,5170
7	PLS-JHND	0,4830
8	TZI	0,4773
9	PLS-KM_II	0,4659
9	PLS-Z&M	0,4659
9	Z&X-MNLR	0,4659
12	PLS-B&L_II	0,4602
13	VSC-B&L_II	0,4545
13	VSC-W_II	0,4545
15	VSC-KUMB	0,4489
16	VSC	0,4318

Probabilidade LogNormal		
Ordem	**Método**	**P_ln**
1	**Método Proposto**	**48,4%**
2	SHR_mod I	42,4%
3	TZI	41,3%
4	PLS-B&L_II	39,3%
5	VSC-W_II	39,2%
6	PLS-KM_II	39,0%
7	VSC-B&L_II	39,0%
8	PLS-Z&M	38,9%
9	VSC-KUMB	38,9%
10	PLS-JHND	38,1%
11	KHR	37,7%
12	SADRO	37,4%
13	POOR,V	37,0%
14	VSC	36,4%
15	KLN	35,4%
16	Z&X-MNLR	33,0%

17	KHR	0,3636
18	KLN	0,3523
19	MYH	0,3352
19	SHR	0,3352
21	Z&X-MLR	0,3295
22	PLS	0,3125
22	Z&M	0,3125
24	BHN	0,2670
25	SHR_mod II	0,2500
26	VBR	0,0057

17	MYH	30,3%
18	SHR_mod II	28,9%
19	PLS	28,4%
20	Z&X-MLR	28,4%
21	L&K-SSA	28,0%
22	Z&M	27,5%
23	BHN	26,1%
24	SHR	26,0%
25	L&K-GOA	20,4%
26	VBR	0,6%

Probabilidade Normal		
Ordem	**Método**	**P**
1	SHR_mod I	48,3%
2	**Método Proposto**	**40,9%**
3	PLS-JHND	40,7%
4	PLS-Z&M	40,3%
5	PLS-KM_II	40,3%
6	PLS-B&L_II	39,8%
7	VSC	39,5%
8	VSC-KUMB	39,5%
9	VSC-B&L_II	39,1%
10	VSC-W_II	38,9%
11	TZI	38,8%
12	PLS	36,9%
13	SHR	36,8%
14	L&K-GOA	35,6%
15	BHN	35,5%
16	SHR_mod II	34,3%
17	L&K-SSA	32,4%
18	KHR	31,6%
19	KLN	26,1%
20	POOR,V	25,3%
21	Z&X-MLR	21,0%
22	MYH	20,3%
23	Z&M	18,6%
24	Z&X-MNLR	14,0%
25	SADRO	9,5%
26	VBR	0,0%

Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		
Ordem	**Método**	**E**
1	**Método Proposto**	**87,8%**
2	POOR,V	75,2%
3	VSC-W_II	70,5%
4	VSC-B&L_II	70,5%
5	PLS-B&L_II	70,4%
6	VSC-KUMB	70,3%
7	PLS-Z&M	70,2%
8	PLS-KM_II	70,1%
9	PLS-JHND	70,0%
10	VSC	68,5%
11	SADRO	68,1%
12	SHR_mod I	62,4%
13	PLS	57,7%
14	TZI	57,1%
15	Z&X-MNLR	54,3%
16	BHN	54,0%
17	L&K-SSA	52,2%
18	KHR	50,7%
19	Z&X-MLR	40,7%
20	KLN	34,7%
21	SHR_mod II	29,8%
22	SHR	29,2%
23	L&K-GOA	20,9%
24	MYH	-13,5%
25	Z&M	-19,6%
26	VBR	-48,7%

Índice de Concordância de Willmott		
Ordem	**Método**	**d**
1	**Método Proposto**	**0,9666**
2	POOR,V	0,9350
3	SADRO	0,9150
4	VSC-W_II	0,9101
5	VSC-B&L_II	0,9091
6	VSC-KUMB	0,9090
7	PLS-B&L_II	0,9084
8	PLS-KM_II	0,9072
9	PLS-Z&M	0,9069
10	PLS-JHND	0,9062
11	VSC	0,8969
12	L&K-SSA	0,8838
13	TZI	0,8745
14	KLN	0,8672

Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático		
Ordem	**Método**	**RMSEs**
1	**Método Proposto**	**50,5**
2	POOR,V	59,9
3	SADRO	74,0
4	L&K-SSA	75,2
5	TZI	106,6
6	KHR	109,6
7	VSC-W_II	109,9
8	VSC-KUMB	113,5
9	VSC-B&L_II	114,3
10	KLN	115,5
11	PLS-B&L_II	117,1
12	PLS-KM_II	119,8
13	PLS-Z&M	121,4
14	PLS-JHND	124,6

15	SHR_mod I	0,8668
16	KHR	0,8582
17	PLS	0,8508
18	BHN	0,8329
19	Z&X-MNLR	0,8295
20	Z&M	0,7973
21	MYH	0,7921
22	L&K-GOA	0,7861
23	SHR_mod II	0,7732
24	SHR	0,7302
25	Z&X-MLR	0,6950
26	VBR	0,5062

15	VSC	146,1
16	SHR_mod I	179,7
17	MYH	187,0
18	SHR_mod II	192,2
19	Z&X-MNLR	195,6
20	L&K-GOA	202,7
21	PLS	212,6
22	Z&M	231,3
23	BHN	234,0
24	SHR	277,7
25	Z&X-MLR	282,8
26	VBR	494,1

Índice de Mielke Modificado		
Ordem	**Método**	**λ**
1	**Método Proposto**	**0,9350**
2	POOR,V	0,8758
3	SADRO	0,8381
4	VSC-W_II	0,8330
5	VSC-B&L_II	0,8311
5	VSC-KUMB	0,8311
7	PLS-B&L_II	0,8300
8	PLS-KM_II	0,8279
9	PLS-Z&M	0,8274
10	PLS-JHND	0,8262
11	VSC	0,8099
12	L&K-SSA	0,7787
13	TZI	0,7748
14	KLN	0,7631
15	SHR_mod I	0,7614
16	KHR	0,7492
17	PLS	0,7317
18	BHN	0,7038
19	Z&X-MNLR	0,6980
20	Z&M	0,6583
21	MYH	0,6513
22	SHR_mod II	0,6175
23	L&K-GOA	0,6044
24	SHR	0,5474
25	Z&X-MLR	0,5268
26	VBR	0,1879

Variância Explicada		
Ordem	**Método**	**VAF**
1	**Método Proposto**	**87,8%**
2	POOR,V	75,8%
3	PLS-JHND	71,1%
4	PLS-B&L_II	71,0%
5	PLS-Z&M	70,9%
6	VSC-B&L_II	70,9%
7	PLS-KM_II	70,9%
8	VSC-KUMB	70,8%
9	VSC-W_II	70,8%
10	VSC	70,6%
11	SADRO	68,4%
12	PLS	67,0%
13	BHN	66,4%
14	SHR_mod I	65,9%
15	TZI	57,1%
16	Z&X-MNLR	55,1%
17	L&K-SSA	53,1%
18	KHR	51,0%
19	Z&X-MLR	44,0%
20	SHR	43,0%
21	KLN	42,4%
22	SHR_mod II	33,3%
23	L&K-GOA	30,0%
24	VBR	30,0%
25	Z&M	10,3%
26	MYH	7,2%

Índice de Performance		
Ordem	**Método**	**ρ**
1	**Método Proposto**	**0,1542**
2	POOR,V	0,2269
3	VSC-W_II	0,2523
4	PLS-B&L_II	0,2525
4	VSC-B&L_II	0,2525
6	VSC-KUMB	0,2531
7	PLS-Z&M	0,2537
8	PLS-KM_II	0,2539
9	PLS-JHND	0,2545
10	VSC	0,2609
11	SADRO	0,2628
12	SHR_mod I	0,2890

Índice de Performance Modificado		
Ordem	**Método**	**ρmod**
1	**Método Proposto**	**0,0986**
2	SADRO	0,1320
3	POOR,V	0,1356
4	PLS-B&L_II	0,1532
5	PLS-Z&M	0,1536
6	PLS-KM_II	0,1537
7	PLS-JHND	0,1540
8	VSC-B&L_II	0,1545
8	VSC-KUMB	0,1545
8	VSC-W_II	0,1545
11	VSC	0,1597
12	SHR_mod I	0,1613

13	PLS	0,3042
14	TZI	0,3157
15	BHN	0,3164
16	L&K-SSA	0,3316
17	Z&X-MNLR	0,3319
18	KHR	0,3433
19	KLN	0,3818
20	Z&X-MLR	0,3865
21	SHR	0,4351
22	SHR_mod II	0,4390
23	L&K-GOA	0,4657
24	MYH	0,5237
25	Z&M	0,5268
26	VBR	0,5745

13	L&K-SSA	0,1720
14	TZI	0,1832
15	Z&X-MNLR	0,1883
16	PLS	0,2013
17	BHN	0,2145
18	KHR	0,2181
19	KLN	0,2383
20	L&K-GOA	0,2426
21	Z&X-MLR	0,2496
22	SHR	0,2547
23	SHR_mod II	0,2652
24	MYH	0,3254
25	Z&M	0,3483
26	VBR	0,6387

Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado		
Ordem	**Método**	**WMAPE**
1	**Método Proposto**	**19,1%**
2	SADRO	24,3%
3	POOR,V	25,4%
4	PLS-B&L_II	28,0%
5	PLS-Z&M	28,1%
6	PLS-KM_II	28,1%
7	PLS-JHND	28,1%
8	VSC-B&L_II	28,3%
8	VSC-KUMB	28,3%
10	VSC-W_II	28,3%
11	SHR_mod I	28,4%
12	VSC	28,9%
13	L&K-SSA	30,6%
14	Z&X-MNLR	32,0%
15	TZI	32,5%
16	PLS	34,9%
17	BHN	36,6%
18	Z&X-MLR	38,1%
19	KHR	38,2%
20	L&K-GOA	38,9%
21	SHR	39,4%
22	KLN	42,0%
23	SHR_mod II	42,9%
24	MYH	53,7%
25	Z&M	57,8%
26	VBR	75,9%

Índice de Legate & McCabe		
Ordem	**Método**	**LMI**
1	**Método Proposto**	**0,6977**
2	SADRO	0,6155
3	POOR,V	0,5971
4	PLS-B&L_II	0,5558
5	PLS-Z&M	0,5552
6	PLS-KM_II	0,5548
7	PLS-JHND	0,5545
8	VSC-B&L_II	0,5519
8	VSC-KUMB	0,5519
10	VSC-W_II	0,5514
11	SHR_mod I	0,5499
12	VSC	0,5419
13	L&K-SSA	0,5154
14	Z&X-MNLR	0,4935
15	TZI	0,4848
16	PLS	0,4478
17	BHN	0,4209
18	Z&X-MLR	0,3963
19	KHR	0,3954
20	L&K-GOA	0,3834
21	SHR	0,3755
22	KLN	0,3342
23	SHR_mod II	0,3203
24	MYH	0,1486
25	Z&M	0,0848
26	VBR	-0,2021

Incerteza Expandida		
Ordem	**Método**	**U95**
1	**Método Proposto**	**395**
2	POOR,V	560
3	PLS-B&L_II	612
4	VSC-B&L_II	612
5	VSC-W_II	613
6	VSC-KUMB	613
7	PLS-JHND	614
8	PLS-Z&M	614
9	PLS-KM_II	614
10	VSC	624

Índice de Referência		
Ordem	**Método**	**IR**
1	**Método Proposto**	**78**
2	POOR,V	108
3	SADRO	115
4	PLS-B&L_II	118
5	VSC-W_II	119
6	VSC-B&L_II	119
7	PLS-Z&M	119
8	PLS-KM_II	119
9	VSC-KUMB	119
10	PLS-JHND	119

11	SADRO	637
12	SHR_mod I	677
13	PLS	694
14	BHN	713
15	TZI	741
16	Z&X-MNLR	761
17	L&K-SSA	778
18	KHR	793
19	Z&X-MLR	858
20	KLN	886
21	SHR	904
22	SHR_mod II	935
23	L&K-GOA	976
24	MYH	1148
25	Z&M	1156
26	VBR	1182

11	VSC	122
12	SHR_mod I	128
13	TZI	141
14	L&K-SSA	142
15	Z&X-MNLR	143
16	PLS	144
17	BHN	150
18	KHR	156
19	Z&X-MLR	165
20	KLN	177
21	SHR	177
22	SHR_mod II	182
23	L&K-GOA	183
24	MYH	230
25	Z&M	240
26	VBR	286

Coeficiente de concordância		
Ordem	**Método**	**ρc**
1	**Método Proposto**	**0,9350**
2	POOR,V	0,8758
3	SADRO	0,8381
4	VSC-W_II	0,8330
5	VSC-B&L_II	0,8312
6	VSC-KUMB	0,8311
7	PLS-B&L_II	0,8300
8	PLS-KM_II	0,8279
9	PLS-Z&M	0,8274
10	PLS-JHND	0,8263
11	VSC	0,8100
12	L&K-SSA	0,7787
13	TZI	0,7748
14	KLN	0,7632
15	SHR_mod I	0,7615
16	KHR	0,7492
17	PLS	0,7320
18	BHN	0,7041
19	Z&X-MNLR	0,6980
20	Z&M	0,6586
21	MYH	0,6515
22	SHR_mod II	0,6176
23	L&K-GOA	0,6045
24	SHR	0,5477
25	Z&X-MLR	0,5269
26	VBR	0,1884

APÊNDICE V

Resultados obtidos na análise de erro percentual entre o Método Proposto e o Método Proposto Simplificado, para cada um dos 200 casos analisados.

Caso	Método Proposto (kPa)	Método Proposto Simplificado (kPa)	Erro percentual relativo (%)
1	258,7	256,8	0,76
2	318,0	311,3	2,10
3	452,2	439,6	2,80
4	1033,7	1008,2	2,47
5	1826,9	1799,4	1,51
6	292,2	286,0	2,12
7	292,2	286,0	2,12
8	292,2	286,0	2,12
9	292,2	286,0	2,12
10	292,2	286,0	2,12
11	297,9	291,6	2,12
12	350,4	333,2	4,93
13	423,9	411,8	2,87
14	423,9	411,8	2,87
15	457,1	445,8	2,47
16	491,2	479,4	2,40
17	260,2	254,8	2,08
18	260,2	254,8	2,08
19	260,2	254,8	2,08
20	264,6	259,0	2,13
21	271,0	264,2	2,51
22	309,9	297,7	3,91
23	376,9	364,9	3,19
24	376,9	364,9	3,19
25	388,3	363,8	6,33
26	471,6	452,9	3,96
27	497,7	452,7	9,03
28	831,8	811,5	2,44
29	831,8	811,5	2,44
30	2037,2	1909,4	6,27
31	2037,2	1909,4	6,27
32	2786,5	2810,3	0,85
33	2059,2	2016,9	2,06
34	1284,6	1267,0	1,37
35	260,2	254,8	2,08
36	260,2	254,8	2,08
37	377,8	365,8	3,19
38	473,6	454,8	3,96
39	428,2	418,6	2,24
40	991,3	966,4	2,52
41	676,2	664,6	1,72
42	559,3	547,1	2,18
43	1747,6	2154,1	23,26
44	934,4	904,3	3,22
45	1051,3	1013,1	3,63
46	1642,6	1507,1	8,25
47	1223,7	1181,3	3,46
48	35,3	34,5	2,02
49	43,5	42,5	2,17

50	58,0	56,7	2,18
51	71,5	69,8	2,32
52	88,5	86,5	2,28
53	109,9	107,3	2,40
54	121,9	119,1	2,32
55	149,6	146,0	2,38
56	145,6	142,0	2,45
57	180,7	176,0	2,59
58	56,8	55,5	2,23
59	71,5	69,8	2,45
60	94,4	92,2	2,31
61	120,0	117,0	2,46
62	142,6	139,3	2,36
63	180,9	176,5	2,42
64	201,3	196,2	2,54
65	258,6	251,6	2,68
66	234,6	228,3	2,70
67	297,5	288,7	2,96
68	92,8	90,8	2,09
69	121,5	118,9	2,12
70	152,2	148,8	2,22
71	198,7	194,3	2,23
72	235,0	229,5	2,35
73	312,8	305,4	2,35
74	321,2	312,5	2,70
75	419,2	406,8	2,96
76	386,7	377,0	2,51
77	514,8	501,8	2,53
78	59,1	57,7	2,30
79	77,4	75,4	2,60
80	93,2	90,9	2,41
81	116,9	113,8	2,66
82	139,6	136,5	2,19
83	173,3	169,6	2,10
84	201,1	196,3	2,39
85	258,1	251,9	2,39
86	241,2	235,4	2,40
87	314,4	306,9	2,37
88	97,2	94,9	2,39
89	133,5	129,8	2,73
90	149,5	145,8	2,50
91	191,8	186,4	2,78
92	223,5	218,8	2,08
93	282,9	277,7	1,83
94	328,0	320,4	2,32
95	437,3	427,7	2,20
96	397,2	388,1	2,30
97	543,1	531,6	2,11
98	161,1	157,3	2,35
99	291,1	284,0	2,44
100	104,2	101,9	2,22
101	161,1	157,3	2,35
102	199,5	194,7	2,39
103	291,1	284,0	2,44
104	372,8	363,7	2,44
105	444,0	433,1	2,44
106	505,5	493,2	2,43
107	60,5	59,2	2,01

108	75,5	73,9	2,11
109	91,3	89,3	2,18
110	20,4	20,1	1,72
111	107,6	105,2	2,24
112	107,6	105,2	2,24
113	1131,0	1092,9	3,37
114	504,7	491,1	2,70
115	410,5	396,6	3,39
116	223,0	221,5	0,64
117	117,3	114,9	1,97
118	151,5	148,6	1,94
119	151,5	148,6	1,94
120	173,3	169,9	1,91
121	200,7	197,0	1,88
122	173,3	169,9	1,91
123	117,3	114,9	1,97
124	151,5	148,6	1,94
125	401,2	392,9	2,08
126	401,2	392,9	2,08
127	401,2	392,9	2,08
128	401,2	392,9	2,08
129	401,2	392,9	2,08
130	401,2	392,9	2,08
131	401,2	392,9	2,08
132	498,9	487,9	2,21
133	357,9	350,4	2,10
134	357,9	350,4	2,10
135	587,7	604,7	2,89
136	660,3	645,6	2,23
137	660,3	645,6	2,23
138	660,3	645,6	2,23
139	660,3	645,6	2,23
140	660,3	645,6	2,23
141	660,3	645,6	2,23
142	717,4	701,3	2,26
143	717,4	701,3	2,26
144	717,4	701,3	2,26
145	660,3	645,6	2,23
146	717,4	701,3	2,26
147	660,3	645,6	2,23
148	605,6	591,8	2,27
149	717,4	701,3	2,26
150	717,4	701,3	2,26
151	949,3	933,1	1,71
152	769,7	750,1	2,55
153	769,7	750,1	2,55
154	924,0	899,9	2,60
155	258,0	252,8	2,02
156	311,5	304,6	2,20
157	1062,7	1035,6	2,55
158	1168,0	1139,3	2,46
159	814,8	794,7	2,46
160	1005,9	981,6	2,41
161	400,6	391,2	2,35
162	704,6	686,7	2,53
163	791,4	771,1	2,56
164	1545,4	1482,4	4,08
165	1697,0	1631,5	3,86

166	64,0	63,0	1,60
167	392,6	365,7	6,86
168	204,6	200,5	1,96
169	275,2	269,8	1,97
170	237,5	232,7	2,01
171	207,8	203,5	2,04
172	966,4	926,4	4,14
173	407,9	399,4	2,07
174	404,0	392,8	2,77
175	336,6	329,5	2,12
176	404,0	392,8	2,77
177	615,1	601,3	2,25
178	641,3	626,5	2,31
179	280,1	274,2	2,13
180	270,4	264,4	2,22
181	293,8	287,2	2,25
182	212,6	210,3	1,11
183	186,8	184,5	1,20
184	446,7	428,3	4,12
185	465,2	454,0	2,40
186	753,4	736,5	2,24
187	1332,1	1313,2	1,42
188	362,6	354,2	2,32
189	818,6	800,0	2,27
190	465,2	454,0	2,40
191	264,5	258,6	2,23
192	186,7	182,7	2,12
193	854,4	843,1	1,32
194	854,4	843,1	1,32
195	370,7	362,1	2,32
196	604,1	590,5	2,25
197	370,7	362,1	2,32
198	182,8	183,8	0,57
199	147,9	148,2	0,19
200	273,1	276,6	1,29
		Média do Erro Percentual	2,57

Resultados obtidos nas análises estatísticas para cada método avaliado, com destaque para o Método Proposto Simplificado.

Ranking Distance		
Ordem	**Método**	**RD**
1	SHR mod I	0,3082
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,3592**
3	Método Proposto	0,3721
4	PLS-JHND	0,3740
5	PLS-Z&M	0,3787
6	PLS-KM II	0,3788
7	PLS-B&L II	0,3839
8	VSC	0,3866
9	VSC-KUMB	0,3867
10	VSC-B&L II	0,3911
11	SHR	0,3925
12	VSC-W II	0,3936
13	TZI	0,3939

Ranking Index		
Ordem	**Método**	**RI**
1	**Método Proposto Simplificado**	**0,3292**
2	Método Proposto	0,3519
3	TZI	0,3963
4	VSC-W II	0,4415
5	SADRO	0,4425
6	KHR	0,4473
7	VSC-B&L II	0,4544
8	PLS-B&L II	0,4576
9	VSC-KUMB	0,4638
10	PLS-KM II	0,4721
11	SHR mod I	0,4761
12	PLS-Z&M	0,4764
13	POOR,V	0,4870

14	PLS	0,4101
15	BHN	0,4169
16	L&K-GOA	0,4317
17	SHR_mod II	0,4492
18	L&K-SSA	0,4783
19	KHR	0,4916
20	KLN	0,5973
21	POOR,V	0,6195
22	VBR	0,7363
23	MYH	0,7473
24	Z&X-MLR	0,7511
25	Z&M	0,7862
26	Z&X-MNLR	1,1339
27	SADRO	1,6726

14	Z&X-MNLR	0,4997
15	PLS-JHND	0,5075
16	KLN	0,5310
17	VSC	0,5439
18	Z&X-MLR	0,5669
19	MYH	0,6773
20	L&K-SSA	0,6928
21	Z&M	0,7221
22	SHR_mod II	0,7420
23	PLS	0,7671
24	BHN	0,8234
25	SHR	0,8278
26	L&K-GOA	1,0356
27	VBR	1,8625

Coeficiente de Determinação		
Ordem	**Método**	**r^2**
1	Método Proposto	0,8782
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,8703**
3	POOR,V	0,7715
4	PLS-JHND	0,7115
5	PLS-B&L_II	0,7098
6	PLS-Z&M	0,7094
7	VSC-B&L_II	0,7092
8	VSC-W_II	0,7088
9	VSC-KUMB	0,7087
10	PLS-KM_II	0,7086
11	VSC	0,7075
12	SADRO	0,7044
13	BHN	0,6966
14	PLS	0,6883
15	VBR	0,6659
16	SHR_mod I	0,6651
17	KLN	0,6590
18	L&K-SSA	0,6141
19	Z&M	0,6031
20	TZI	0,6018
21	KHR	0,5632
22	Z&X-MNLR	0,5518
23	MYH	0,5486
24	Z&X-MLR	0,4961
25	SHR	0,4297
26	L&K-GOA	0,4018
27	SHR_mod II	0,4012

Erro Absoluto Médio		
Ordem	**Método**	**MAE**
1	Método Proposto	90,8
2	**Método Proposto Simplificado**	**92,1**
3	SADRO	115,5
4	POOR,V	121,0
5	PLS-B&L_II	133,4
6	PLS-Z&M	133,6
7	PLS-KM_II	133,8
8	PLS-JHND	133,9
9	VSC-KUMB	134,6
10	VSC-B&L_II	134,6
11	VSC-W_II	134,8
12	SHR_mod I	135,2
13	VSC	137,6
14	L&K-SSA	145,6
15	Z&X-MNLR	152,2
16	TZI	154,8
17	PLS	165,9
18	BHN	174,0
19	Z&X-MLR	181,4
20	KHR	181,6
21	L&K-GOA	185,2
22	SHR	187,6
23	KLN	200,0
24	SHR_mod II	204,2
25	MYH	255,8
26	Z&M	275,0
27	VBR	361,1

Raiz do Erro Quadrático Médio		
Ordem	**Método**	**RMSE**
1	Método Proposto	142,2
2	**Método Proposto Simplificado**	**147,0**
3	POOR,V	202,8
4	VSC-W_II	221,2
5	VSC-B&L_II	221,4
6	PLS-B&L_II	221,5
7	VSC-KUMB	221,9
8	PLS-Z&M	222,5
9	PLS-KM_II	222,6

Erro Percentual Absoluto Médio		
Ordem	**Método**	**MAPE**
1	SHR_mod I	22,8%
2	**Método Proposto Simplificado**	**23,8%**
3	Método Proposto	24,4%
4	PLS-JHND	27,8%
5	PLS-Z&M	27,9%
6	PLS-KM_II	27,9%
7	PLS-B&L_II	28,1%
8	L&K-SSA	28,1%
9	TZI	28,2%

10	PLS-JHND	223,3
11	VSC	228,7
12	SADRO	230,1
13	SHR_mod I	249,8
14	PLS	264,9
15	TZI	266,8
16	Z&X-MNLR	275,4
17	BHN	276,3
18	L&K-SSA	281,5
19	KHR	286,0
20	Z&X-MLR	313,6
21	KLN	329,3
22	SHR_mod II	341,3
23	SHR	342,8
24	L&K-GOA	362,2
25	MYH	434,0
26	Z&M	445,5
27	VBR	496,6

10	VSC-KUMB	28,5%
11	L&K-GOA	28,7%
12	VSC-B&L_II	28,7%
13	VSC	28,7%
14	VSC-W_II	28,8%
15	POOR,V	30,5%
16	SHR	32,4%
17	PLS	32,9%
18	BHN	34,3%
19	KHR	35,4%
20	SADRO	36,2%
21	SHR_mod II	37,7%
22	Z&X-MNLR	40,1%
23	KLN	41,2%
24	Z&X-MLR	47,0%
25	MYH	52,0%
26	Z&M	57,0%
27	VBR	72,7%

Índice a20		
Ordem	**Método**	**a20**
1	Método Proposto	0,6080
2	L&K-SSA	0,6023
3	**Método Proposto Simplificado**	**0,5852**
4	SHR_mod I	0,5625
5	L&K-GOA	0,5568
6	SADRO	0,5398
7	POOR,V	0,5170
8	PLS-JHND	0,4830
9	TZI	0,4773
9	PLS-KM_II	0,4659
9	PLS-Z&M	0,4659
12	Z&X-MNLR	0,4659
13	PLS-B&L_II	0,4602
13	VSC-B&L_II	0,4545
15	VSC-W_II	0,4545
16	VSC-KUMB	0,4489
17	VSC	0,4318
18	KHR	0,3636
19	KLN	0,3523
19	MYH	0,3352
21	SHR	0,3352
22	Z&X-MLR	0,3295
22	PLS	0,3125
24	Z&M	0,3125
25	BHN	0,2670
26	SHR_mod II	0,2500
27	VBR	0,0057

Probabilidade LogNormal		
Ordem	**Método**	**P_ln**
1	**Método Proposto Simplificado**	**48,8%**
2	Método Proposto	48,4%
3	SHR_mod I	42,4%
4	TZI	41,3%
5	PLS-B&L_II	39,3%
6	VSC-W_II	39,2%
7	PLS-KM_II	39,0%
8	VSC-B&L_II	39,0%
9	PLS-Z&M	38,9%
10	VSC-KUMB	38,9%
11	PLS-JHND	38,1%
12	KHR	37,7%
13	SADRO	37,4%
14	POOR,V	37,0%
15	VSC	36,4%
16	KLN	35,4%
17	Z&X-MNLR	33,0%
18	MYH	30,3%
19	SHR_mod II	28,9%
20	PLS	28,4%
21	Z&X-MLR	28,4%
22	L&K-SSA	28,0%
23	Z&M	27,5%
24	BHN	26,1%
25	SHR	26,0%
26	L&K-GOA	20,4%
27	VBR	0,6%

Probabilidade Normal		
Ordem	**Método**	**P**
1	SHR_mod I	48,3%
2	**Método Proposto Simplificado**	**42,2%**
3	Método Proposto	40,9%
4	PLS-JHND	40,7%
5	PLS-Z&M	40,3%

Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		
Ordem	**Método**	**E**
1	Método Proposto	87,8%
2	**Método Proposto Simplificado**	**87,0%**
3	POOR,V	75,2%
4	VSC-W_II	70,5%
5	VSC-B&L_II	70,5%

6	PLS-KM_II	40,3%
7	PLS-B&L_II	39,8%
8	VSC	39,5%
9	VSC-KUMB	39,5%
10	VSC-B&L_II	39,1%
11	VSC-W_II	38,9%
12	TZI	38,8%
13	PLS	36,9%
14	SHR	36,8%
15	L&K-GOA	35,6%
16	BHN	35,5%
17	SHR_mod II	34,3%
18	L&K-SSA	32,4%
19	KHR	31,6%
20	KLN	26,1%
21	POOR,V	25,3%
22	Z&X-MLR	21,0%
23	MYH	20,3%
24	Z&M	18,6%
25	Z&X-MNLR	14,0%
26	SADRO	9,5%
27	VBR	0,0%

6	PLS-B&L_II	70,4%
7	VSC-KUMB	70,3%
8	PLS-Z&M	70,2%
9	PLS-KM_II	70,1%
10	PLS-JHND	70,0%
11	VSC	68,5%
12	SADRO	68,1%
13	SHR_mod I	62,4%
14	PLS	57,7%
15	TZI	57,1%
16	Z&X-MNLR	54,3%
17	BHN	54,0%
18	L&K-SSA	52,2%
19	KHR	50,7%
20	Z&X-MLR	40,7%
21	KLN	34,7%
22	SHR_mod II	29,8%
23	SHR	29,2%
24	L&K-GOA	20,9%
25	MYH	-13,5%
26	Z&M	-19,6%
27	VBR	-48,7%

Índice de Concordância de Willmott		
Ordem	**Método**	**d**
1	Método Proposto	0,9666
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,9639**
3	POOR,V	0,9350
4	SADRO	0,9150
5	VSC-W_II	0,9101
6	VSC-B&L_II	0,9091
7	VSC-KUMB	0,9090
8	PLS-B&L_II	0,9084
9	PLS-KM_II	0,9072
10	PLS-Z&M	0,9069
11	PLS-JHND	0,9062
12	VSC	0,8969
13	L&K-SSA	0,8838
14	TZI	0,8745
15	KLN	0,8672
16	SHR_mod I	0,8668
17	KHR	0,8582
18	PLS	0,8508
19	BHN	0,8329
20	Z&X-MNLR	0,8295
21	Z&M	0,7973
22	MYH	0,7921
23	L&K-GOA	0,7861
24	SHR_mod II	0,7732
25	SHR	0,7302
26	Z&X-MLR	0,6950
27	VBR	0,5062

Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático		
Ordem	**Método**	**RMSEs**
1	Método Proposto	50,5
2	**Método Proposto Simplificado**	**56,4**
3	POOR,V	59,9
4	SADRO	74,0
5	L&K-SSA	75,2
6	TZI	106,6
7	KHR	109,6
8	VSC-W_II	109,9
9	VSC-KUMB	113,5
10	VSC-B&L_II	114,3
11	KLN	115,5
12	PLS-B&L_II	117,1
13	PLS-KM_II	119,8
14	PLS-Z&M	121,4
15	PLS-JHND	124,6
16	VSC	146,1
17	SHR_mod I	179,7
18	MYH	187,0
19	SHR_mod II	192,2
20	Z&X-MNLR	195,6
21	L&K-GOA	202,7
22	PLS	212,6
23	Z&M	231,3
24	BHN	234,0
25	SHR	277,7
26	Z&X-MLR	282,8
27	VBR	494,1

Índice de Mielke Modificado		
Ordem	**Método**	**λ**
1	Método Proposto	0,9350
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,9299**
3	POOR,V	0,8758
4	SADRO	0,8381
5	VSC-W_II	0,8330
5	VSC-B&L_II	0,8311
7	VSC-KUMB	0,8311
8	PLS-B&L_II	0,8300
9	PLS-KM_II	0,8279
10	PLS-Z&M	0,8274
11	PLS-JHND	0,8262
12	VSC	0,8099
13	L&K-SSA	0,7787
14	TZI	0,7748
15	KLN	0,7631
16	SHR_mod I	0,7614
17	KHR	0,7492
18	PLS	0,7317
19	BHN	0,7038
20	Z&X-MNLR	0,6980
21	Z&M	0,6583
22	MYH	0,6513
23	SHR_mod II	0,6175
24	L&K-GOA	0,6044
25	SHR	0,5474
26	Z&X-MLR	0,5268
27	VBR	0,1879

Variância Explicada		
Ordem	**Método**	**VAF**
1	Método Proposto	87,8%
2	**Método Proposto Simplificado**	**87,0%**
3	POOR,V	75,8%
4	PLS-JHND	71,1%
5	PLS-B&L_II	71,0%
6	PLS-Z&M	70,9%
7	VSC-B&L_II	70,9%
8	PLS-KM_II	70,9%
9	VSC-KUMB	70,8%
10	VSC-W_II	70,8%
11	VSC	70,6%
12	SADRO	68,4%
13	PLS	67,0%
14	BHN	66,4%
15	SHR_mod I	65,9%
16	TZI	57,1%
17	Z&X-MNLR	55,1%
18	L&K-SSA	53,1%
19	KHR	51,0%
20	Z&X-MLR	44,0%
21	SHR	43,0%
22	KLN	42,4%
23	SHR_mod II	33,3%
24	L&K-GOA	30,0%
25	VBR	30,0%
26	Z&M	10,3%
27	MYH	7,2%

Índice de Performance		
Ordem	**Método**	**ρ**
1	Método Proposto	0,1542
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,1598**
3	POOR,V	0,2269
4	VSC-W_II	0,2523
4	PLS-B&L_II	0,2525
6	VSC-B&L_II	0,2525
7	VSC-KUMB	0,2531
8	PLS-Z&M	0,2537
9	PLS-KM_II	0,2539
10	PLS-JHND	0,2545
11	VSC	0,2609
12	SADRO	0,2628
13	SHR_mod I	0,2890
14	PLS	0,3042
15	TZI	0,3157
16	BHN	0,3164
17	L&K-SSA	0,3316
18	Z&X-MNLR	0,3319
19	KHR	0,3433
20	KLN	0,3818
21	Z&X-MLR	0,3865
22	SHR	0,4351
23	SHR_mod II	0,4390
24	L&K-GOA	0,4657
25	MYH	0,5237

Índice de Performance Modificado		
Ordem	**Método**	**ρmod**
1	Método Proposto	0,0986
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,1002**
3	SADRO	0,1320
4	POOR,V	0,1356
5	PLS-B&L_II	0,1532
6	PLS-Z&M	0,1536
7	PLS-KM_II	0,1537
8	PLS-JHND	0,1540
8	VSC-B&L_II	0,1545
8	VSC-KUMB	0,1545
11	VSC-W_II	0,1545
12	VSC	0,1597
13	SHR_mod I	0,1613
14	L&K-SSA	0,1720
15	TZI	0,1832
16	Z&X-MNLR	0,1883
17	PLS	0,2013
18	BHN	0,2145
19	KHR	0,2181
20	KLN	0,2383
21	L&K-GOA	0,2426
22	Z&X-MLR	0,2496
23	SHR	0,2547
24	SHR_mod II	0,2652
25	MYH	0,3254

26	Z&M	0,5268
27	VBR	0,5745

26	Z&M	0,3483
27	VBR	0,6387

Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado		
Ordem	**Método**	**WMAPE**
1	Método Proposto	19,1%
2	**Método Proposto Simplificado**	**19,3%**
3	SADRO	24,3%
4	POOR,V	25,4%
5	PLS-B&L_II	28,0%
6	PLS-Z&M	28,1%
7	PLS-KM_II	28,1%
8	PLS-JHND	28,1%
8	VSC-B&L_II	28,3%
10	VSC-KUMB	28,3%
11	VSC-W_II	28,3%
12	SHR_mod I	28,4%
13	VSC	28,9%
14	L&K-SSA	30,6%
15	Z&X-MNLR	32,0%
16	TZI	32,5%
17	PLS	34,9%
18	BHN	36,6%
19	Z&X-MLR	38,1%
20	KHR	38,2%
21	L&K-GOA	38,9%
22	SHR	39,4%
23	KLN	42,0%
24	SHR_mod II	42,9%
25	MYH	53,7%
26	Z&M	57,8%
27	VBR	75,9%

Índice de Legate & McCabe		
Ordem	**Método**	**LMI**
1	Método Proposto	0,6977
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,6935**
3	SADRO	0,6155
4	POOR,V	0,5971
5	PLS-B&L_II	0,5558
6	PLS-Z&M	0,5552
7	PLS-KM_II	0,5548
8	PLS-JHND	0,5545
8	VSC-B&L_II	0,5519
10	VSC-KUMB	0,5519
11	VSC-W_II	0,5514
12	SHR_mod I	0,5499
13	VSC	0,5419
14	L&K-SSA	0,5154
15	Z&X-MNLR	0,4935
16	TZI	0,4848
17	PLS	0,4478
18	BHN	0,4209
19	Z&X-MLR	0,3963
20	KHR	0,3954
21	L&K-GOA	0,3834
22	SHR	0,3755
23	KLN	0,3342
24	SHR_mod II	0,3203
25	MYH	0,1486
26	Z&M	0,0848
27	VBR	-0,2021

Incerteza Expandida		
Ordem	**Método**	**U95**
1	Método Proposto	395
2	**Método Proposto Simplificado**	**408**
3	POOR,V	560
4	PLS-B&L_II	612
5	VSC-B&L_II	612
6	VSC-W_II	613
7	VSC-KUMB	613
8	PLS-JHND	614
9	PLS-Z&M	614
10	PLS-KM_II	614
11	VSC	624
12	SADRO	637
13	SHR_mod I	677
14	PLS	694
15	BHN	713
16	TZI	741
17	Z&X-MNLR	761
18	L&K-SSA	778
19	KHR	793
20	Z&X-MLR	858
21	KLN	886

Índice de Referência		
Ordem	**Método**	**IR**
1	Método Proposto	78
2	**Método Proposto Simplificado**	**80**
3	POOR,V	108
4	SADRO	115
5	PLS-B&L_II	118
6	VSC-W_II	119
7	VSC-B&L_II	119
8	PLS-Z&M	119
9	PLS-KM_II	119
10	VSC-KUMB	119
11	PLS-JHND	119
12	VSC	122
13	SHR_mod I	128
14	TZI	141
15	L&K-SSA	142
16	Z&X-MNLR	143
17	PLS	144
18	BHN	150
19	KHR	156
20	Z&X-MLR	165
21	KLN	177

22	SHR	904
23	SHR_mod II	935
24	L&K-GOA	976
25	MYH	1148
26	Z&M	1156
27	VBR	1182

22	SHR	177
23	SHR_mod II	182
24	L&K-GOA	183
25	MYH	230
26	Z&M	240
27	VBR	286

Coeficiente de concordância		
Ordem	**Método**	**ρc**
1	Método Proposto	0,9350
2	**Método Proposto Simplificado**	**0,9299**
3	POOR,V	0,8758
4	SADRO	0,8381
5	VSC-W_II	0,8330
6	VSC-B&L_II	0,8312
7	VSC-KUMB	0,8311
8	PLS-B&L_II	0,8300
9	PLS-KM_II	0,8279
10	PLS-Z&M	0,8274
11	PLS-JHND	0,8263
12	VSC	0,8100
13	L&K-SSA	0,7787
14	TZI	0,7748
15	KLN	0,7632
16	SHR_mod I	0,7615
17	KHR	0,7492
18	PLS	0,7320
19	BHN	0,7041
20	Z&X-MNLR	0,6980
21	Z&M	0,6586
22	MYH	0,6515
23	SHR_mod II	0,6176
24	L&K-GOA	0,6045
25	SHR	0,5477
26	Z&X-MLR	0,5269
27	VBR	0,1884