

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Otimização de Misturas Granulares

Valteson da Silva Santos
Professor, IFPB, Patos, Brasil, valteson.santos@ifpb.eu.br

Allan Benício Silva de Medeiros
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, allanbenicio08@gmail.com

Romário Stéffano Amaro da Silva
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, romario.tw@gmail.com

Ana Beatriz Stefany Santos Campos
UFRN, Natal, Brasil, abstefany23@gmail.com

Oswaldo de Freitas Neto
Professor, UFRN, Natal, Brasil, osvaldo.neto@ufrn.br

RESUMO: Este estudo propõe o desenvolvimento e teste de uma ferramenta computacional para otimização de misturas granulares em engenharia civil. A metodologia envolveu a criação de uma planilha eletrônica que permite a inserção das curvas de distribuição granulométrica de até dez materiais, juntamente com a curva granulométrica alvo desejada para a mistura. Foi empregado o método dos mínimos quadrados e a ferramenta Solver do Microsoft EXCEL®, com automatização dos cálculos por meio da linguagem *Visual Basic for Applications (VBA)*. Os principais aspectos analisados incluem a eficácia da ferramenta na otimização das misturas granulares e sua adaptabilidade a diferentes cenários. Os resultados dos testes realizados em uma central dosadora de agregados para pavimentação demonstraram um ajuste bem-sucedido das faixas granulométricas, com tempo de processamento rápido. Além disso, a ferramenta foi avaliada em cinco projetos de pesquisa, evidenciando sua robustez e eficácia na otimização de misturas binárias e ternárias. Conclui-se que a ferramenta desenvolvida é uma solução prática e eficiente para otimização de misturas granulares com base na distribuição granulométrica dos materiais constituintes.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados, Faixa Granulométrica, Pavimentação, Solos.

ABSTRACT: This study proposes the development and testing of a computational tool for optimizing granular mixtures in civil engineering. The methodology involved the creation of an electronic spreadsheet allowing the insertion of the particle size distribution curves of up to ten materials, along with the desired target particle size distribution curve for the mixture. The least squares method and the Solver tool in Microsoft EXCEL® were employed, with automation of calculations through the Visual Basic for Applications (VBA) language. The key aspects analyzed include the effectiveness of the tool in optimizing granular mixtures and its adaptability to different scenarios. The results of tests conducted at an aggregate batching plant for pavement indicated successful adjustment of particle size distribution ranges, with rapid processing time. Additionally, the tool was evaluated in five research projects, demonstrating its robustness and effectiveness in optimizing binary and ternary mixtures. It is concluded that the developed tool is a practical and efficient solution for optimizing granular mixtures based on the particle size distribution of constituent materials.

KEYWORDS: Aggregates, Particle size distribution, Pavement, Soils.

1. INTRODUÇÃO

A granulometria dos materiais constituintes de um compósito afeta o seu desempenho de forma que a otimização da sua granulometria é uma das formas de melhorar suas propriedades (Wang, 2013). De fato, diversos normativos sugerem faixas granulométricas utilizáveis para materiais granulares comercializados como materiais de construção. Cita-se como exemplo as faixas para agregado graúdo e as faixas utilizável e ótima de agregado miúdo para concreto prevista pela NBR 7211:2009. A norma 141:2010 – ES do DNIT também sugere faixas granulométricas às quais solos ou misturas de solo devem se adequar. Por fim, cita-se as faixas granulares de material para concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), conforme norma 031:2006 do DNIT.

Esse trabalho surgiu a partir de uma demanda de uma central dosadora de agregados para CAUQ. Rotineiramente o ajuste do material era feito por tentativa e erro. O responsável pela central apontava proporções adequadas de cada material (pedrisco, pó de pedra, areia) e realizava a mistura. Após a mistura dos materiais era feito o ensaio granulométrico e verificada a adequabilidade às faixas normatizadas, caso não fosse possível encaixar a mistura na faixa adequada, era então repetido o processo até que se encontrasse resultado satisfatório. Esse procedimento demandava um tempo significativo, devido à necessidade de repetição, chegando em algumas situações a ser necessárias semanas de tentativas.

Esse trabalho, propôs-se, a princípio, automatizar esse processo de adequabilidade da granulometria resultante da mistura de materiais através de uma planilha eletrônica. Ao longo do desenvolvimento, percebeu-se o potencial da ferramenta para outras aplicações.

2. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional foi desenvolvida na forma de uma planilha eletrônica compatível com o MS EXCEL® da Microsoft. Os dados de entrada são as curvas granulométricas dos materiais a serem misturados. A entrada de dados para cada projeto foi habilitada para ser realizada de forma massiva ou manual. Para entrada de dados massiva, foi desenvolvido um código em VBA (*Visual Basic for Applications*) a partir do qual o usuário importa os arquivos das curvas granulométricas dos materiais em formato de planilha eletrônica. O código foi desenvolvido de forma que seja possível uma compatibilização com qualquer formato de planilha granulométrica. Desta forma, a planilha permite trabalhar com até 10 amostras de uma mesma vez. O Quadro 1 representa os dados consolidados de três amostras importadas para a planilha.

Quadro 1. Dados de entrada da planilha.

Amostra	Granulometria													
	Material passando nas peneiras (%)												Sedimentação	
	1'	3/8	-	4	8	10	16	32	64	100	40	200		
	25,4	9,5	6,3	4,8	2,36	2	1,18	0,6	0,42	0,3	0,15	0,074	0,06	0,002
Areia	100%	100%	100%	100%	78%	75%	60%	50%	40%	30%	20%	6%	3%	2%
RPP	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	27%
Cal	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	34%

Uma vez que a ferramenta desenvolvida tem potencial para ser aplicada em diversas situações, foi implementada uma função de escolha pelo usuário da curva granulométrica desejada, conforme apresentado na Figura 1. Foi utilizada uma ferramenta de validação de dados do MS EXCEL® para restringir a escolha curva desejada apenas àquelas cadastradas. A escolha da curva carrega internamente os dados que serão utilizados na otimização. Foi implementado na planilha um banco de dados para as faixas granulométricas previstas na norma 141:2010 – ES do DNIT, na norma NBR 7211:2009 e na norma 031:2006 do DNIT. De forma complementar, foi implementada a curva ótima prevista pelo modelo de empacotamento de Alfred conforme recomendações de Funk & Dinger (1994).

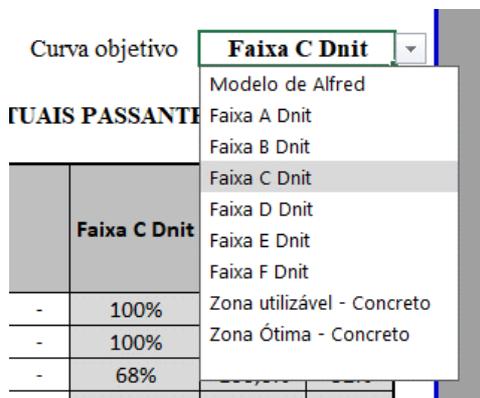


Figura 1. Caixa de seleção para a escolha da curva granulométrica desejada.

Para implementação do modelo de Alfred, utilizou-se a equação 1.

$$CPFT = \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (1)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D;

q é uma constante, designada por coeficiente ou módulo de distribuição;

D_L é o diâmetro da maior partícula da amostra;

D_s é o diâmetro da menor partícula da amostra.

Uma vez que algumas curvas são apresentadas como limites superiores e inferiores, optou-se por utilizar como referência para o processo de otimização a média desses limites calculada para cada diâmetro. A metodologia de implementação adotada permite a inserção de outros modelos de empacotamento assim como outras curvas granulométricas.

Após escolhida a curva objeto, a planilha já apresenta em um gráfico as curvas granulométricas dos materiais inseridos, a curva granulométrica escolhida para otimização e uma curva teórica com a mistura dos materiais granulares, conforme apresentado na Figura 2.

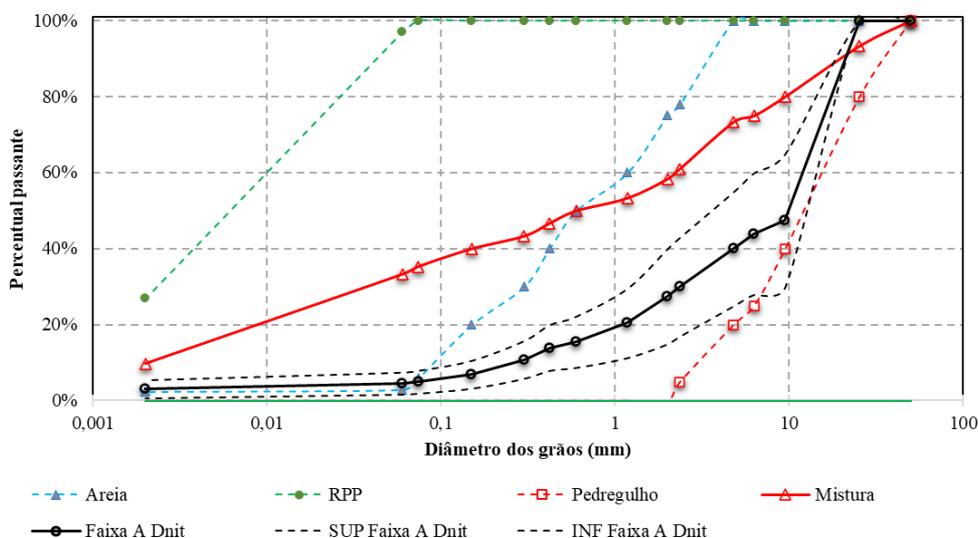


Figura 2. Gráfico extraído da planilha que mostra as curvas granulométricas analisadas.

Foi desenvolvido um algoritmo em VBA para que a curva inicial da mistura tenha proporções iguais de cada um dos seus componentes. A Figura 3 exemplifica a mistura de areia, Resíduo de polimento de porcelanato (RPP) e Pedregulho em quantidades iguais de 33,33%. Adotou-se esse valor como parâmetro de

partida para otimização. O cálculo do percentual passante da mistura para cada diâmetro foi feito através do somatório do produto da proporção de cada material passante pela porcentagem do mesmo na mistura, conforme Equação 2.

$$CPFT = \sum_{i=1}^n P_i \cdot CPFT_i \quad (2)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D;

P_i é a proporção do material i na mistura;

n é o total de materiais misturados;

$CPFT_i$ é a porcentagem acumulada de partículas do material i menores que o diâmetro D.

O objetivo principal da otimização realizada pela planilha é aproximar ao máximo as curvas da mistura e a curva objeto. A quantificação dessa distância foi feita a partir da soma das raízes dos quadrados das distâncias no eixo das abscissas entre os pontos das duas curvas. De forma adicional, implementou-se um método análogo ao método dos mínimos quadrados (MMQ) com o objetivo de encontrar as proporções de materiais que resultem em uma curva de mistura que mais se assemelhe à curva objetivo.

Segundo Guidorizzi (2014), o uso de uma função para aproximar um conjunto de dados implica em um erro E_i , indicado pelos traços verticais na Figura 3, que será nulo apenas quando a função passa em todos os pontos. O método dos mínimos quadrados determina a função cuja soma dos quadrados dos erros seja mínima. A soma dos quadrados é uma alternativa ao fato de que a soma de erros positivos com erros negativos resultaria em soma nula ou quase nula, mesmo quando o conjunto de dados apresenta valores dispersos.

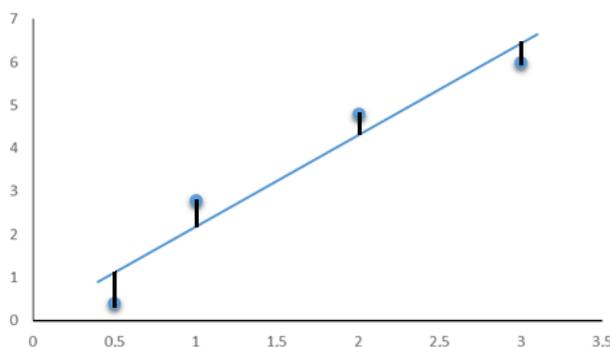


Figura 3. Erros de aproximação (E_i) entre uma função e um conjunto de dados experimentais.

Para otimização dos percentuais dos materiais da mistura foi implementado na programação VBA o módulo SOLVER do MS EXCEL®. O método utilizado no SOLVER foi o *Generalized Reduced Gradient (GRG)*, destinado a resolver problemas suaves e não lineares das variáveis de decisão, com variáveis irrestritas não negativas. A Figura 4 apresenta a tela de configuração do SOLVER.

Foi definido como objetivo do SOLVER a célula da planilha que contém a soma das raízes dos quadrados das distâncias entre as curvas, Célula O32. Para esse objetivo, requereu-se o valor mínimo. Para atingir o objetivo, o SOLVER irá alterar os valores das células que contém a proporção de cada material na mistura. Esses dados estão no intervalo de células C32:L32. Adicionalmente, foram impostas três restrições para o processo de otimização. As restrições um e dois delimitam a proporção de cada material entre 100% e 0%. A terceira restrição adicionada ao SOLVER define que a soma das proporções dos materiais deve ser sempre igual a 100%. Ademais, para tornar o processo computacional mais rápido, limitou-se as variáveis como positivas.

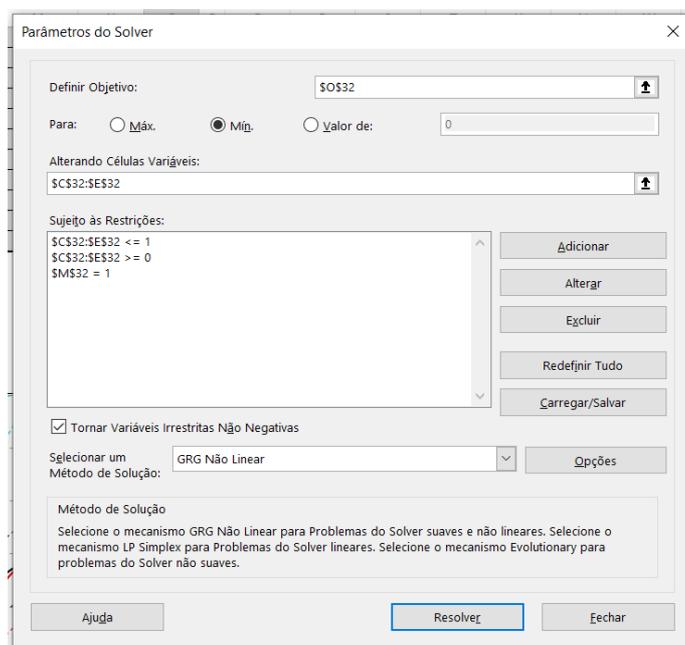


Figura 4. Tela de configuração do módulo SOLVER do MS EXCEL®.

O processo de configuração do SOLVER foi integralmente implementado em VBA, evitando configurações manuais por parte do usuário da planilha, Figura 5. Uma vez que a planilha trabalha com quantidades de amostras entre duas e dez, foi necessário implementar um cálculo para o intervalo a ser alterado que pode variar entre os intervalos C32:D32 a C32:L32. Da mesma forma, foi implementado o cálculo para o percentual inicial de cada material na mistura.

```
Sub Otimiza()
Dim colunas As Integer 'Total de amostras a serem misturadas
Dim letra As String 'Intervalo variável

colunas = Application.WorksheetFunction.CountIf(Sheets("Resumo").Range("b5:b100"), ">0")
letra = Sheets("Auxiliar").Cells(colunas + 1, 4).Value

Range("C32:L32").Value = 0 'Zera cálculos anteriores
Range("C32: " & letra & "32").Value = 1 / colunas 'Define as proporções iniciais dos materiais

SolverReset 'Zera o solver
SolverOk SetCell:="$O$32", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$C$32:$" & letra & "$32", _
Engine:=3, EngineDesc:="Evolutionary"
SolverAdd CellRef:="$C$32:$" & letra & "$32", Relation:=1, FormulaText:="1"
SolverAdd CellRef:="$C$32:$" & letra & "$32", Relation:=3, FormulaText:="0"
SolverAdd CellRef:="$M$32", Relation:=2, FormulaText:="1"
SolverSolve (True) 'Clica no botão OK do solver

End Sub
```

Figura 5. Tela de configuração pelo VBA do módulo SOLVER do MS EXCEL®.

Ao final do processo iterativo do SOLVER, a planilha apresenta a melhor combinação de materiais que vai resultar na menor soma das raízes das distâncias ao quadrado em relação à curva objetivo, ou seja, a melhor proporção de mistura dos materiais possível de ser alcançada, Figura 6.

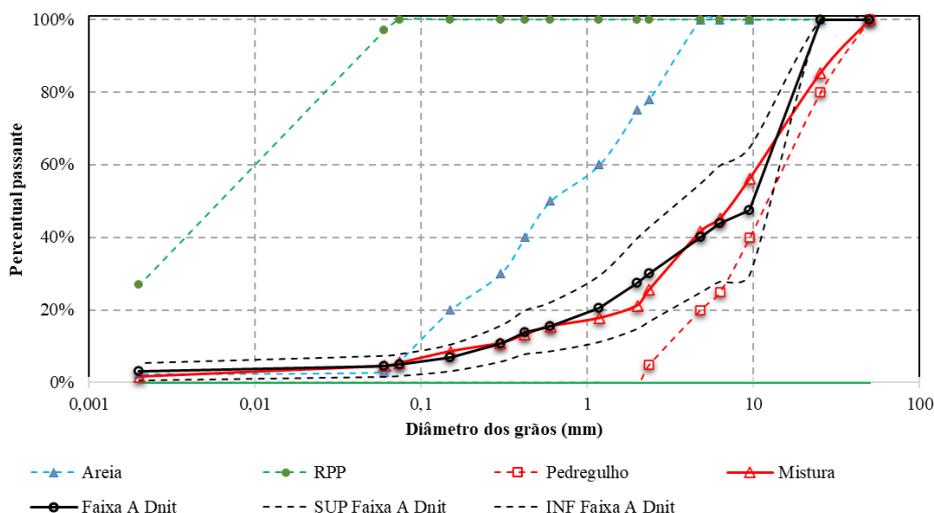


Figura 6. Gráfico extraído da planilha que mostra as curvas granulométricas otimizadas.

3. TESTES DE DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta foi testada inicialmente em âmbito de laboratório por trabalhos como Medeiros et. al (2021) para ajustar uma mistura de areia, resíduo de polimento de porcelanato (RPP) e resíduo de schelita (RS). O objetivo dos autores era ajustar a mistura à zona ótima de areia para concreto prevista pela NBR 7211:2009. Adicionalmente, desejava-se que o teor de RPP fosse o maior possível. Conforme relatado pelos autores, a ferramenta permitiu encontrar uma mistura ideal teórica que foi confirmada, posteriormente, experimentalmente.

A ferramenta computacional também foi testada de forma retroativa com os dados experimentais do trabalho publicado por Silva, Santos Junior e Paiva (2022). Os autores estudaram parâmetros físicos e geotécnicos de misturas granulares de uma areia eólica com cal e RPP. Foram inseridas as curvas granulométricas de cada material e solicitado um ajuste pelo modelo de Alfred. A planilha apontou como melhor ajuste um teor de 20% de finos (cal + RPP) e 80% de areia. Para o teor de cal, foi obtido um valor de 6%. Os testes ANOVA realizados sobre valores de resistência e empacotamento apontaram valores semelhantes. Mesmo com o efeito da pozolanidade da cal, o ajuste puramente granulométrico feito pela ferramenta foi eficiente.

Em campo, a ferramenta foi testada em uma central dosadora de agregados para pavimentação com resultados imediatos de ajuste dos materiais misturados às faixas granulométricas normatizadas. Após o ensaio granulométrico dos materiais componentes da mistura, procedia-se à importação dos dados para a planilha e otimização. Com as proporções ideais era feita a mistura com o ligante asfáltico e coletada uma amostra para análise granulométrica da mistura. Após extração do ligante asfáltico era realizada a granulometria do material que confirmava a adequação da curva de distribuição granulométrica à faixa desejada. Utilizando o método GRG não linear, o tempo de processamento médio é de 4 segundos. Para o método evolucionário, o tempo de processamento médio é de 45 segundos.

Freire (2019) e Santos (2022) estudaram o efeito do teor de finos nas propriedades geotécnicas de uma mistura de finos plásticos e uma areia lavada. Os autores realizaram ensaios de cisalhamento direto e triaxiais. Foram medidos todos os índices físicos dos corpos de prova ensaiados. Os resultados das curvas granulométricas obtidas por Freire (2019) e Santos (2022) foram importados para a planilha de otimização. Utilizando o modelo de empacotamento de Alfred implementado na planilha obteve-se as proporções ideais da mistura de areia e finos que mais se aproxima da curva objetivo. Experimentalmente, foi verificado que as amostras moldadas com teores de finos próximos do teor ótimo obtidos pela planilha tiveram os maiores valores de densidade aparente seca e resistência.

Outros trabalhos não publicados também utilizaram a ferramenta para estimativa de valores ideais de mistura antes de realizarem procedimentos experimentais.

4. APLICAÇÕES PRÁTICAS E POTENCIAIS BENEFÍCIOS

Ao longo de mais de quatro anos de testes e implementações, a ferramenta computacional desenvolvida foi aplicada em ajuste de curvas granulométricas de agregados e misturas de solos. Com a possibilidade de implementação de modelos de empacotamento e faixas granulométricas foi possível substituir métodos experimentais de dosagem por tentativa e erro por um método teórico de ajuste. Essa equipe de pesquisa vislumbra a aplicação da planilha desenvolvida em ajuste de faixas granulométricas de agregados para concreto e argamassas, insumos da indústria cerâmica, agregados para pavimentação, solos de bases e sub-bases de rodovias, agregados não convencionais como cinzas, resíduos da construção civil e agregados leves. Não foram feitos testes usando essa ferramenta para misturas com fibras minerais ou vegetais.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar uma ferramenta computacional na forma de uma planilha eletrônica capaz de otimizar misturas granulares. Foi possível implementar uma rotina em *VBA* que permite otimizar uma mistura de até 10 materiais de forma que esta se aproxime ao máximo de uma curva objetivo. O tempo de processamento da otimização foi sempre inferior a 45 segundos. A ferramenta computacional foi validada em laboratório e em campo ao longo de quatro anos. Os resultados da etapa de validação permitiram aprimorar a ferramenta. Conclui-se que a ferramenta desenvolvida está pronta para uso por usuários diversos. O acesso ao produto desse projeto é aberto e gratuito, e pode ser obtido entrando em contato com o autor principal deste artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFRN, ao departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFRN e ao Departamento de engenharia Civil do IFPB/Patos e pelo fornecimento da infraestrutura física para o desenvolvimento desse projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 7211. *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, Brasil.

Freire, Lisyane de Vasconcelos (2019). *Comportamento mecânico de misturas de areia e finos de um sedimento pós-barreiras da cidade de Natal/RN*. 113 f.: il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN.

Funk, J. E.; Dinger, D. R. (1994). Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. *Springer US*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3118-0>

Guidorizzi, Hamilton Luiz (2014). *Um curso de cálculo*. Vol 2 - 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 476 p.

Medeiros, Alisson G.; Gurgel, Marcelo T.; SILVA, Walney G. da; Oliveira, Marilía P. de; FERREIRA, Ruan L.s.; LIMA, Francisco J.N. de. (2021) Evaluation of the mechanical and durability properties of eco-efficient concretes produced with porcelain polishing and scheelite wastes. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 296, p. 123719, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123719>.

Santos, Valteson da Silva (2022). *Efeito do teor de finos nos parâmetros de estados críticos de solos transicionais*. Orientador: Olavo Francisco dos Santos Júnior. 2022. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Silva, José; Santos Júnior, Olavo; Paiva, William (2022). Compressive and tensile strength of aeolian sand stabilized with porcelain polishing waste and hydrated lime. *Soils And Rocks*, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 1-15, 1 dez.

2022. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
<http://dx.doi.org/10.28927/sr.2023.002322>.

Wang, Jun-Jie et al. (2013) Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 139, n. 11, p. 1994-1997.