



# ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04  
de dezembro 2020

## Otimização da dosagem do concreto asfáltico misturado a quente por modelo linear restrito

**Ingrid Santos Almeida**

COECI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Guilherme Santos da Silveira**

COECI – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Thalita Monteiro Obal**

COEME - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Flávia Konowalenko**

COEME - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Rodrigo Scoczynski Ribeiro**

COECI- Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Resumo:** Ao longo dos anos, muitos métodos de revestimentos de pavimentos asfálticos foram empregados na área da pavimentação, dentre os quais a aplicação do concreto asfáltico tomou destaque, sendo o principal material empregado nesta área, constituído por agregados graúdos, miúdos, filer e ligante asfáltico. Este trabalho apresenta como objetivo a otimização do traço do concreto asfáltico segundo as normas vigentes, o qual, atualmente, é determinado por meio de testes. O problema foi modelado matematicamente e implementado computacionalmente no software Julia, com objetivo de determinar uma distribuição otimizada dentre as porcentagens de cada material presente em sua composição, de modo a contribuir em um material de melhor qualidade, além de minimizar seu custo. O modelo conta com parâmetros definidos pela norma técnica, seguidos pelo DNIT, com os resultados obtidos no ensaio de peneiramento de agregados de uma indústria do interior do estado de São Paulo e com custos dos materiais segundo a tabela SINAPI a fim de aplicá-los no modelo matemático desenvolvido computacionalmente.

**Palavras-chave:** Concreto, Otimização, Agregados.

## Optimization of hot mixed asphalt concrete dosing by restricted linear model

**Abstract:** Over the years, many methods of asphalt pavements have been employed in the area of paving, among which the application of asphalt concrete has stood out, being the main material used in this area, consisting of coarse aggregates and giblets, filer and asphalt binder. This work aims to optimize the asphalt concrete mix according to current standards, which, currently, is determined through tests. The problem was modeled mathematically and implemented computationally in the Julia software, in order to determine an optimized distribution among the percentages of each material present in its composition, in order to contribute in a better quality material. The model has parameters defined by the technical standard, followed by DNIT, the result obtained in the aggregate screening test of an industry in the interior of the state of São Paulo and material costs according to the SINAPI table in order to apply them in the mathematical model developed computationally.

**Keywords:** Concrete, Optimization, Aggregate.

## 1. Introdução

O concreto asfáltico é um importante material que é empregado na área de pavimentação em diferentes etapas presentes na execução, tais como: revestimento, camada de ligação, base, regularização ou reforço. As propriedades do concreto asfáltico, tais como sua resistência, são definidas por meio de sua microestrutura. Esta microestrutura é composta pelo agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento filler e ligante asfáltico. (NEVILLE, 2016)

O revestimento é a camada responsável por receber e transmitir a carga dos veículos que trafegam a via, portanto é necessário nesta camada as propriedades como resistência ao cisalhamento, estabilidade, durabilidade e resistência ao atrito. (ORLANDO, 2016).

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é um dos tipos de revestimentos asfálticos mais utilizados no Brasil, o qual é espalhado e comprimido a quente. O cálculo de sua dosagem, que determina a porcentagem de cada agregado da mistura, atualmente é realizado por meio de tentativas e erros, a partir dos quais se determina a melhor relação que atende às características desejáveis, como a trabalhabilidade e consistência, além de cumprir as recomendações normativas.

Segundo Vavrik et al (2002) falta orientação na seleção da estrutura agregado do projeto de misturas asfálticas e no entendimento da interação dessas estruturas e das propriedades volumétricas da mistura.

Outro método que usualmente é aplicado no cálculo da dosagem do CBUQ, o método Bailey, desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey em Illinois utilizado desde a década de 80, consiste na seleção granulométrica por volume, que a partir de equações sistemáticas ajusta a graduação dos agregados na preparação da mistura asfáltica. (CUNHA, 2004).

Breno et al. (2018) afirma que a permeabilidade é propriedade importante para os concretos utilizados em pavimentos, é a dosagem dos agregados, ponto relevante para estudos e práticas com concretos asfálticos. Orlando (2016) traz a importância do estudo desses agregados na produção do CBUQ visto que a deformação permanente nos revestimentos asfálticos se dá pela relação com o ligante asfáltico e o agregado mineral utilizado, sendo o agregado o principal responsável pela resistência ao cisalhamento do concreto asfáltico em temperaturas altas, além de sua granulometria ter grande influência na rigidez, estabilidade, durabilidade e resistência ao atrito do pavimento.

A dosagem dos agregados por meio de tentativa e erro pode trazer algumas consequências para o material final, assunto que é levantado por Vladimir Coelho (1996), uma vez que a granulometria dos agregados seja encaixada nas faixas "B" e "C", sendo a C a faixa ideal, da DNIT (031/2006), e as misturas asfálticas sejam corretamente projetadas e adequadamente preparadas e compactadas, a ocorrência de deformações permanentes prematuramente elevadas talvez não seja relacionada a problemas de granulometria dos agregados mas sim de dosagem dos mesmos.

Em pesquisas mais atuais ainda é possível observar a prática do método tentativa e erro, mostrando a falta no avanço de técnicas para dosagem de concretos asfálticos. No estudo realizado em Souza & Leite (2018), a determinação das porcentagens a serem utilizadas no cálculo da dosagem, é obtida através desse método de tentativa e erro para alcançar o mais próximo da média dos limites da faixa C, requerida pela ABNT (1993).

Uma vez que é difícil chegar a um traço que atenda as definições dadas por normas, muitas vezes é adotado um traço cuja curva é a mais próxima possível do centro da faixa de trabalho, para o CBUQ é utilizada a faixa "C", definida pelo DNIT (2016), como utilizada na análise da influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso,

realizada por Diego et al. (2018). Essa aproximação pode ser um meio para a aparição de deformações definitivas no pavimento.

No projeto de CBUQ com agregados de origem granítica desenvolvido por Hugo Sasha e Pedro Arns (s.d), a faixa adotada de granulometria dos agregados foi a faixa B, visto que o material ensaiado se aproximou da faixa, havendo um enquadramento com a utilização de cinza pesada.

Referências fora do Brasil trazem modelos de otimização aplicados á concretos asfálticos no cenário de cálculos de dosagem, tanto dos agregados como do ligante asfáltico.

Um estudo desenvolvido por Sivilevicius et al. (2011), traz a otimização através de modelos matemáticos restritos e irrestritos na graduação de projetos de misturas asfálticas à quente, visando determinar a porção ideal de cada agregado mineral em massa. Outro estudo desenvolvido por Haissam Sebaaly et al. (2018), apresenta o desenvolvimento de um processo de design de mistura automática com a capacidade de prever e otimizar os constituintes da mistura do concreto asfáltico para obter propriedades desejadas. O modelo foi desenvolvido para automatizar a seleção da graduação dos agregados e do conteúdo do ligante asfáltico para produzir misturas de asfalto que atendem aos requisitos de especificação aplicáveis. Estas pesquisas visam a mesma proposta do presente trabalho, porém o modelo desenvolvido aqui propõe a adequação à norma brasileira DNIT (031/2016).

Há também estudos na otimização do design da mistura de asfalto quente voltado exclusivamente para a dosagem de betume presente na mistura do concreto asfáltico. A metodologia apresentada por Sara Bressi (2016) tem como objetivo propor uma abordagem analítica para determinar uma dosagem ideal de betume para o asfalto misturado a quente.

Na aplicação de modelos matemáticos na área de concretos usuais, há estudos para otimização da proporção de misturas utilizando areia do deserto ao invés de areias retiradas de rios, através de modelo estatístico. São propostos critérios de otimização visando a seleção de parâmetros de projeto de mistura apropriados do concreto com areia do deserto para várias demandas de construção. (YAN et al, 2019)

Além da dosagem do material, um ponto importante é o seu custo, uma dosagem adequada pode minimizar o custo final, para isso é preciso fazer análise da porcentagem de cada material constituinte da mistura juntamente com seus preços. Essa análise, se bem feita, pode resultar em um material de maior qualidade e durabilidade com um preço mínimo, adequado a granulometria dos materiais disponíveis na região e seus devidos custos, enquanto que por outro lado, uma dosagem mal feita pode resultar em altos custos e com uma qualidade inferior, podendo causar danos irreversíveis no asfalto, diminuindo sua durabilidade e seu desempenho.

Até o presente momento do trabalho não foi encontrado estudos que trazem modelos matemáticos para dosagem de concretos e em especial para concretos asfálticos, aplicados às normas brasileiras (DNIT 031/2016). Neste cenário, o foco deste trabalho está no estudo e desenvolvimento de modelo matemático de otimização (MOREIRA, 2010) capaz de auxiliar na determinação da dosagem dos agregados que compõem o CBUQ, o que possibilita a quantificação ideal da porcentagem destes, desse modo otimizando a composição do CBUQ e melhorando seu desempenho, seguindo especificações citadas na norma Brasileira DNIT (031/2006), além de realizar a minimização do seu custo final a partir da análise da dosagem segundo a granulometria dos materiais utilizados juntamente com seu custo de acordo com cada região do país.

## **2. Modelo matemático**

O modelo matemático desenvolvido consiste na otimização da dosagem do concreto, levando em consideração a norma DNIT-031/2006-ES, que trata de concreto asfáltico, e considera ensaios de peneiramento para classificação granulométrica do material. Os conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão e modelo para aplicação ao problema estão descritos respectivamente nos itens A, B, C e D a seguir:

A. Conjuntos:

$i$  : conjunto dos materiais constituintes da mistura;

$j$  : conjunto das peneiras utilizadas para o ensaio.

B. Parâmetros:

$n$  : total de agregados;

$m$  : total de peneiras;

$P_j$ : porcentagem máxima de material que passa na  $j$ -ésima peneira;

$M_i$ : porcentagem máxima do material  $i$  que deve compor a mistura;

$c_{ij}$  : porcentagem do material  $i$  que passou na peneira  $j$ .

$d_i$  : custo do material  $i$ .

C. Variável de decisão:

$x_i$ : porção ideal em massa do material  $i$ .

D. Modelo matemático:

$$\text{máx} \sum_{i=1}^n d_i x_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n c_{ij} x_i = 1 \text{ para } j = 1 \quad (3)$$

$$P_j^- \leq \sum_{i=1}^n c_{ij} x_i \leq P_j^+ \text{ para } j = 2 \dots 8 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n (c_{ij} x_i - c_{i(j+1)} x_i) \geq 0,04 \text{ para } \forall i, j = 1 \dots 7 \quad (5)$$

$$0 \leq x_i \leq 1 \text{ para } i = 1 \dots 4 \quad (6)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o custo monetário empregado para obtenção da mistura. A restrição (2) garante que a soma da massa ótima de cada material na mistura seja 100%. A restrição (3) estabelece que deve passar 100% dos materiais na primeira peneira. A restrição (4) fixa os valores máximos e mínimos de material passante a partir da segunda até a oitava peneira. A restrição (5) determina que a fração retida entre duas peneiras consecutivas seja maior que 4%. Por fim, a restrição (6) implica que a porcentagem de cada material deve estar entre 0% e 100%.

### 3. Parâmetros de entrada

Os valores utilizados na entrada do modelo, resultados do ensaio de peneiramento dos materiais da mistura, foram obtidos em uma indústria de concreto asfáltico do interior do estado de São Paulo. Os valores são apresentados na tabela 1.:

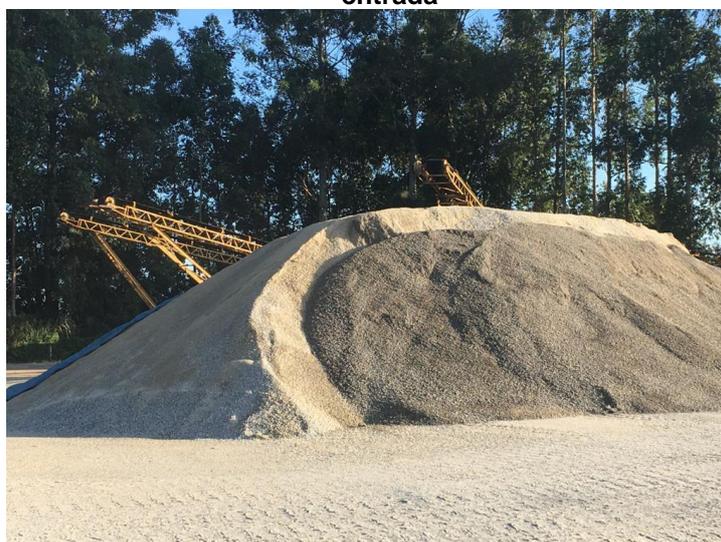
**Tabela 1 – Porcentagem de agregado passante nas peneiras**

Peneira Abertura (mm)	Agregado (%)			
	Areia	Cal	Pedrisco	Brita
19,10	1	1	1	1
12,70	1	1	0,9950	0,4130
9,50	1	1	0,6460	0,0960
4,80	1	1	0,0860	0,0150
2,00	0,6860	1	0,0190	0,005
0,42	0,2120	1	0,0140	0,003
0,18	0,1200	0,9990	0,0120	0,002
0,08	0,080	0,8800	0,010	0,002

**Fonte: indústria de concreto asfáltico do interior do estado de São Paulo**

Os materiais utilizado para a determinação de granulometria aplicada no modelo são mostrados pela figura 1 e 2.

**Figura 1 – Material granular do estado de são Paulo, utilizado para obtenção de parâmetros de entrada**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

**Figura 2 – Material granular do estado de são Paulo, utilizado para obtenção de parâmetros de entrada**



Fonte: Autoria própria (2020)

O custo dos materiais constituintes da mistura foi obtido a partir de uma pesquisa por estados do país. Para obtenção dos custos médios para implementação do modelo foi calculado a média dos custos dos estados situados em cada região. Os valores são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Custo dos materiais por região

Região	Estado	Custo médio por agregado (R\$.m³)			
		Areia	Cal (1700kg/m³)	Pedrisco	Brita
Sul	RS, SC, PR	62,74	861,33	65,98	62,12
Sudeste	SP, RJ, MG, ES	53,54	1.160,25	79,60	72,80
Norte	AM, AC, RO, RR, TO, PA, AP	66,49	1.668,43	140,11	128,14
Nordeste	MA, PI, BA, CE, SE, RN, PB, PE	63,94	1.090,13	80,66	73,77
Centro-oeste	MS, GO, DF, MT	76,31	1.292,00	83,53	76,39

Fonte: Tabela SINAPI (2020)

#### 4. Implementação

O modelo foi implementado no software Júlia, que utiliza uma linguagem fácil e se mostra eficiente na resolução de problemas com as citadas características, e resolvido pelo solver GLPK, com os seguintes parâmetros:

$$n = 4$$

$$m = 8$$

$$P_j^- = [0,80; 0,70; 0,44; 0,22; 0,08; 0,04; 0,02]$$

$$P_j^+ = [1; 0,90; 0,72; 0,50; 0,26; 0,16; 0,10]$$

$$d_i = [53.54 \ 0.68 \ 79.60 \ 72.80]$$

$$x_2 = 0,0$$

O valor de  $x_2$  foi definido em 3% por especialista, visando melhor desempenho da mistura e menor custo. Enquanto os valores de  $P_j^-$ ,  $P_j^+$  foram definidos a partir da norma DNIT 031/2006- ES, estipulando uma determinada variação entre os parâmetros de porcentagens de cada material presente na mistura asfáltica.

Os custos definidos por  $d_i$  são referentes a região sudeste, uma vez que os valores de  $c_{ij}$  são da mesma região.

## 5. Resultados

Os valores obtidos na implementação são apresentados na tabela a seguir:

**Tabela 3– Valores obtidos na implementação do modelo no software Júlia**

Agregado	Variável	Fração constituinte da mistura (%)
Areia	X <sub>1</sub>	68,20
Cal	X <sub>2</sub>	3,00
Pedrisco	X <sub>3</sub>	5,23
Brita	X <sub>4</sub>	23,57
Porcentagem final		100

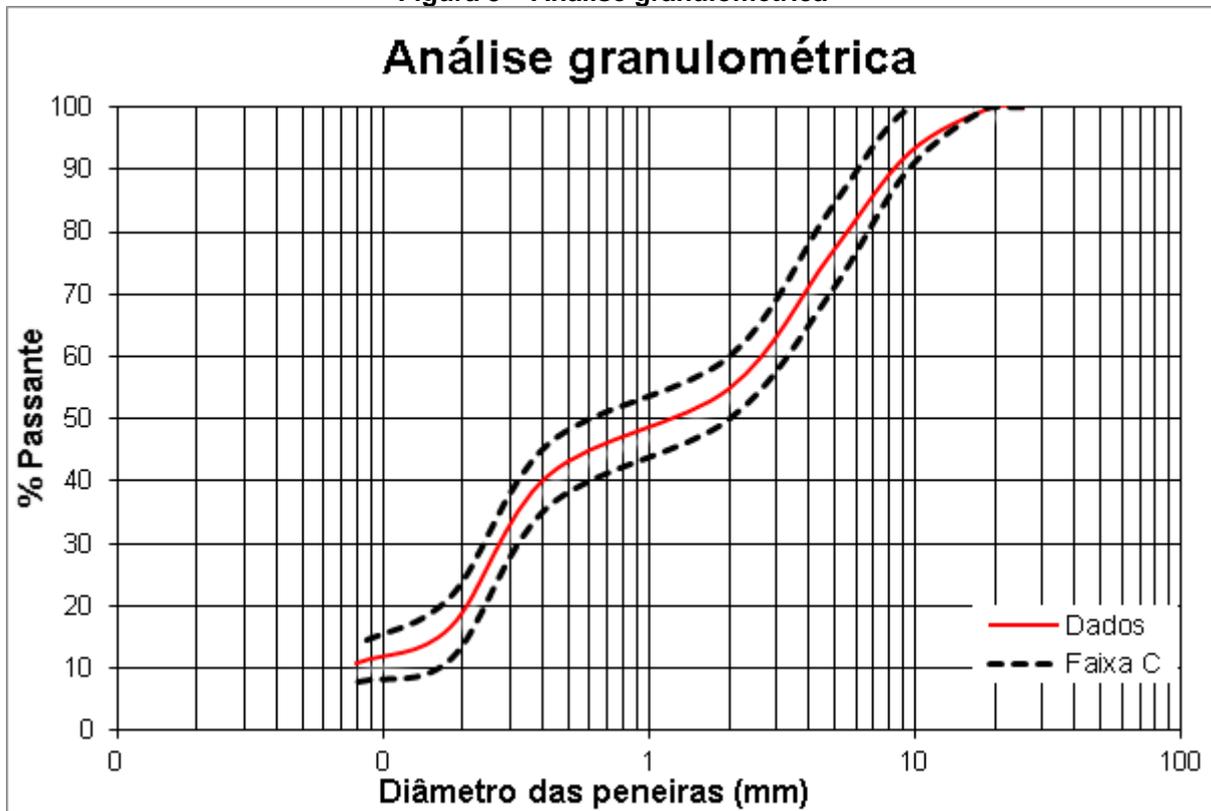
Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados obtidos são satisfatórios, apresentando na mistura final a seguinte composição: 68,20% de areia, 3% de cal, 5,23% de pedrisco e 23,57% de brita. Os valores estão obedecendo a restrição definida pelo DNIT de porcentagem de material passante pelas peneiras de ensaio.

Para comercialização é usual a adoção da unidade de medida tonelada, portanto a porcentagem apresentada pode ser descrita como porcentagem dentro de uma tonelada de agregado constituinte de concreto asfáltico.

A mistura obtida se encaixa nas porcentagens de material passante da faixa C do DNIT, como mostrado no gráfico da figura 3.

Figura 3 – Análise granulométrica



Fonte: Autoria própria (2020)

### 3. Considerações

O problema apresentado no trabalho trata da dosagem do concreto asfáltico, o qual atualmente é determinada por tentativa e erro, e por ser responsável por grande parte do desempenho do material é de relevante importância seu estudo. Nesse cenário, foi proposto um modelo linear para cálculo da dosagem com base em dados adquiridos em ensaio de peneiramento dos agregados constituintes da mistura asfáltica, atendendo aos parâmetros do Departamento Nacional de Infraestrutura e transporte (DNIT), minimizando seu custo final.

A análise de custo do material é de grande importância, pois não basta ter um material de alta índice de qualidade e desempenho se não é acessível monetariamente no mercado, uma vez que já existem materiais que são comercializados e fabricados pelas indústrias. Assim a proposta é trazer um material superior e acessível que siga todas as especificações da norma brasileira para asfáltico flexíveis.

O modelo proposto se mostrou eficiente, com os resultados de uma dosagem teoricamente coerente a esperada para produção de um concreto asfáltico, seguindo a norma DNIT 031/2006, além do custo do material ter apresentado um valor mínimo, levando em consideração o custo individual de cada agregado e sua porcentagem ideal na mistura. Porém, quando apresentados os percentuais obtidos pelo modelo matemático desenvolvido à indústria, esta fez uma observação de que estes resultados não se encaixam no traço adotado por ela. Como futura investigação, pretende-se avaliar os motivos desta divergência.

### 3. Referências

A.M. NEVILLE. **Propriedades do concreto**. 5. edição. Bookman, 2016.

BRESSI, S. et al. An advanced methodology for the mix design optimization of hot mix asphalt. **Materials & Design**. Volume 98, 2016. p. 174-185.

CASTRO, et al. Estudo do concreto permeável: resistência e permeabilidade. **Revista Científica de Engenharia Civil**, v. 01, n. 01, 2018.

CASTRO, L. F. A.. **Estudo de traço de concreto permeável de cimento portland**. Santa Cruz do Sul, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil- Universidade Santa Cruz do Sul,. [Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos].

COELHO, V. **Contribuição ao estudo das informações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação**.1996. Dissertação (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. [Orientador: Prof. Dr. Manoel Henrique A. Sória].

CORRÊA, H. S. H.; ARNS, P. **Projeto de concreto asfáltico usinado a quente de acordo com o departamento estadual de infraestrutura com agregados de origem granítica**. Universidade do Extremo Sul Catarinense.

CUNHA, M. B. **Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos. [Orientador: Prof. Assoc. José Leomar Fernandes Júnior].

D.A. MOREIRA. **Pesquisa operacional**: curso introdutório. 2. edição. São Paulo: Cengage Learning. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 031/2006-ES: **Pavimentos flexíveis- Concreto asfáltico- Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2016.

GOMES, K. S.; SILVA, R. L. M. **Estudo de dosagem para definição do traço do CBUQ faixa C ideal com materiais da região de Anápolis-Goiás**. Anápolis, 2018. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil- Unievangélica. [Orientadora: Isa Lorena Silva Barbosa].

JÚNIOR, P. O. B. A. **Comportamento Mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. [Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo. Coorientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht].

MARTINI, T. S. **Desenvolvimento de dosagem para mistura asfáltica de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) com emprego de fresado para aplicação em vias urbanas de Porto Alegre**. Porto Alegre, 2018. Trabalho de diplomação. Curso de Engenharia Civil- Escola de Engenharia da UNiversidade Federal do Rio Grande do Sul. [Orientador: Washington Peres Núñez].

NORMAS NACIONAIS BRASILEIRAS. NBR 7217: **Agregados-Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: AGO, 1987.

SANTOS, D. H.; FERREIRA, V. F. **Análise da influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso utilizado para revestimento asfáltico**. Anápolis, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil- Universidade Evangélica. [Orientadora: Isa Lorena Silva Barbosa].

SEBAALY, H. et al. Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. **Construction and Building Materials**. Volume 168. 2018. p. 660–670.

SIVILEVICIUS, H. et al. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. Volume 25. 2011. p.115-122

VAVRIK, W. R. et al. Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: Bailey Method. **Transportation Research Record**. Illinois. Volume 1789. 2002. p. 146-153.

YAN, W. et al. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. **Construction and Building Materials**. China. Volume 226. 2019. p. 469-482.