



Modelagem matemática no auxílio da determinação ótima da dosagem dos agregados do CBUQ

Mathematical modeling to assist in determining the optimal dosage of aggregates in CBUQ

Guilherme Santos da Silveira *, Dr^a Thalita Monteiro Obal[†], Dr^a Flávia Konowalenko[‡],
Ingrid Santos Almeida[§]

RESUMO

A camada de ligação é uma das partes constituintes do pavimento asfáltico, sendo constituída de: areia, cal, pedrisco, brita e fíler. O presente trabalho propõe um modelo matemático que determine o traço ótimo e que respeite as imposições normativas. O modelo matemático foi implementado em Matlab utilizando como parâmetros dados obtidos de uma indústria Paulista. Obteve-se como resultados valores de dosagem dos materiais que permitiram a mistura obedecer os requisitos das normas brasileiras.

Palavras-chave: Otimização. Traço do concreto. CBUQ.

ABSTRACT

The binding layer is one of the constituent parts of the asphalt paving, consisting of: sand, lime, gravel, crushed stone and filler. The present work proposes a mathematical model to determine the optimal mix design that complies with the normative requirements. The mathematical model was implemented in Matlab using as parameters parameters obtained from an industry in São Paulo. It was obtained the result of dosage values of the materials that allowed the mixture to meet the requirements of Brazilian standards.

Keywords: Optimization. Concrete mix design. CBUQ.

1 INTRODUÇÃO

Define-se pavimento como sendo uma estrutura constituída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto com a máxima qualidade e o mínimo custo (SANTANA, 1992). O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é um dos componentes mais utilizados para a pavimentação asfáltica no Brasil, sendo executado por um espalhamento do material seguido da sua compressão a quente. As propriedades desse, tais como sua resistência, são definidas por meio de sua microestrutura, que é composta pelo agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento fíler e ligante asfáltico (NEVILLE, 2015).

Atualmente, o método de dosagem dos agregados constituintes da mistura a quente se dá em sua maioria por tentativa e erro, consistido em seguidos testes até uma dosagem satisfatória da mistura. De acordo com Coelho

* Departamento de Engenharia Civil; ✉ guilhermesilveira@alunos.utfpr.edu.br.

† Departamento de Engenharia Mecânica; ✉ thalitaobal@utfpr.edu.br.

‡ Departamento de Engenharia Mecânica; ✉ flaviak@utfpr.edu.br.

§ Departamento de Engenharia Civil; ✉ santosalmeida.ingrid@gmail.com.



(1996), tal método possibilita consequências negativas ao material final, como complementa Almeida Júnior et al. (2016), que destaca a importância de se analisar a granulometria da mistura, visto que sua deformação plástica está associada ao agregado mineral.

Com isso, evidencia-se a problematização de se determinar a dosagem dos agregados que atendam a norma DNIT (2006). Assim, esta pesquisa visa trabalhar no estudo e no desenvolvimento de um modelo matemático de otimização linear que auxilie na determinação das dosagens do agregados do concreto asfáltico usinado a quente, afim de garantir um produto ótimo, garantindo um melhor desempenho e durabilidade do revestimento asfáltico.

2 ENSAIO E NORMAS

A presente pesquisa tem como pilar as diretrizes da DNIT (2006), assim como o ensaio granulométrico dos agregados descritos pela ABNT (1987), as quais são descritas a seguir.

2.1 Norma NBR 7217

O ensaio de peneiramento consiste em um ensaio de classificação do agregado de acordo com sua granulometria. Para a realização do ensaio é necessário uma balança de precisão (com resolução de 0,1% da massa da amostra de ensaio), estufa, um jogo de peneiras das séries normal e intermediária com tampa e fundo, agitador mecânico e bandejas.

Para iniciar o ensaio é preciso secar a amostra na estufa e, após o resfriamento natural pesá-la e determinar sua massa. Em seguida as peneiras são empilhadas em ordem decrescente, da maior abertura de malha para a menor, e o material é depositado na peneira superior, então é iniciada a agitação do conjunto por um tempo considerável com auxílio do agitador mecânico, como é observado nas figuras 1 e 2 a seguir do ensaio do agregado graúdo e miúdo, respectivamente. Por fim, é verificado qual a porcentagem em massa da amostra que passou em cada peneira, assim sendo viável a classificação granulométrica do material.

Figura 1 – Ensaio do agregado graúdo



Fonte: Os autores (2020).

Figura 2 – Ensaio dos agregados miúdos



Fonte: Didática Artigos para Laboratório LTDA (2021).



2.2 DNIT 031/2006 - ES

Esta norma define o planejamento a ser utilizado para a confecção da mistura asfáltica usinada a quente, estabelecendo os materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade dos agregados. Assim, para a determinação da dosagem dos concreto asfáltico é necessário realizar o ensaio descrito em 2.1, extraindo a quantidade de material passante e retido nas peneiras. De acordo com o item 5.2 da norma DNIT (2006), a porcentagem retida entre as peneiras consecutivas não deve ser superior a 4%.

2.2.1 Faixa de trabalho C

A Faixa C classifica um pavimento que apresenta determinadas características e granulometria para atuar na camada de rolamento de vias urbanas e rodovias. Por ser a camada mais externa do pavimento, superior, responsável por receber os esforços e distribuir para as demais camadas do pavimento, deve apresentar propriedades como flexibilidade, resistência e estabilidade de modo a garantir seu correto funcionamento e segurança. Esta camada do revestimento asfáltico faz parte do pavimento flexível e é regida pela DNIT (2006), com os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de trabalho C do DNIT 031/2006.

Série ASTM	Abertura (mm)	% em massa passando Faixa C		Tolerância
		Inferior	Superior	
3/4"	19,1	-	100	±7
1/2"	12,7	80	100	±7
3/8"	9,5	70	90	±7
Nº 4	4,8	44	72	±5
Nº 10	2	22	50	±5
Nº 40	0,42	8	26	±5
Nº 80	0,18	4	16	±3
Nº 200	0,75	2	10	±2

Fonte: Tabela DNIT 031/2006 (2020) (adaptada).

Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade propor um modelo matemático que determine o traço do concreto asfáltico, respeitando a limitação de 4% de material passante entre peneiras consecutivas e os limites percentuais indicados pela faixa C.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Para a formulação matemática, teve-se como base o modelo desenvolvido em Santos et al. (2020), no qual adotou-se o seguinte conjunto de dados: parâmetros de entrada, variáveis de decisão e modelo matemático.

1. Conjuntos:

i : conjunto dos materiais que constituem a mistura;

j : conjunto das peneiras ensaiadas.

2. Parâmetros de entrada:



m : refere-se ao total de agregados da mistura;

n : refere-se ao total de peneiras ensaiadas;

P_j : refere-se a porcentagem passante de cada peneira que a Faixa C da DNIT (2006);

c_{ij} : refere-se a porcentagem do material i passante na peneira j .

3. Variáveis de decisão:

x_i : refere-se a porcentagem ótima dos materiais constituintes da mistura final.

O modelo matemático desenvolvido em Santos et al. (2020) visa determinar o traço do concreto de modo que a porcentagem de material retida entre peneiras consecutivas seja maior ou igual a 4%, com o seguinte modelo:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^m c_{ij}x_i - c_{ij-1}x_i \quad (1)$$

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

$$\sum_{i=1}^n c_{i1}x_i = 1 \quad (3)$$

$$P_j^- \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} c_{ij}x_i \leq P_j^+ \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^m c_{ij}x_i - c_{ij+1}x_i \geq 0,04 \quad (5)$$

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (6)$$

A função objetivo (1) busca maximizar a diferença dos materiais passantes entre peneiras consecutiva na fase de 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%.

Entretanto, verificou-se que os resultados obtidos em Santos et al. (2020) não satisfazem todo o conjunto de restrições (4), ou seja, que em algumas peneiras passava um percentual maior do que o limite da Faixa C, apresentado na tabela 1.

Dessa forma, o presente trabalho propõe um modelo matemático que incorpora variáveis de folga no conjunto de restrições (4) de modo a flexibilizar a limitação do percentual da mistura passante entre as peneiras. Esta folga é quantificada nas variáveis σ_j^+ e σ_j^- , relacionando a folga acima e abaixo do valor requerido na tabela 1, respectivamente. Assim, o conjunto de o conjunto de restrições (4) de Santos et al. (2020) é substituído por (7).

$$P_j^- - \sigma_j^- \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^m c_{ij}x_i \leq P_j^+ + \sigma_j^+ \quad (7)$$



Porém, ao se permitir a flexibilização da mistura que passa nas peneiras, deve-se impor que as variáveis de folga tenham o valor mínimo, para que a extrapolação da limitação apresentada na tabela 1 seja a mínima e esteja dentro da faixa de tolerância presente nesta tabela. Assim, a função objetivo passa a ser (8).

$$\text{Min} \sum_{j=2}^m \sigma_j^- + \sigma_j^+ \quad (8)$$

Portanto o modelo matemático proposto neste trabalho considera a função objetivo (8), com o conjunto de restrições (2)-(4), (5)-(6), (7) e (9).

$$0 \leq \sigma_j^+, \sigma_j^- \leq 1 \quad (9)$$

4 RESULTADOS

Para a determinação da mistura asfáltica é necessário a presença dos seguintes materiais: areia, pedrisco, brita e ligante asfáltico, logo $n = 4$ m refere-se à quantidade de peneiras, que foram 8, sendo suas aberturas de 19,10 mm até a de 0,75 mm. Os parâmetros P_j^- e P_j^+ foram retirados da tabela 1, na qual é possível observar estes limitantes inferior e superior.

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

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

O valores obtidos na análise granulométrica dos agregados, referente ao material passante pela peneiras foram fornecidos pela industria localizada no interior do estado de São Paulo, e estão apresentados na tabela 2, representando os parâmetros c_{ij} do modelo.

Tabela 2 – Porcentagem de material passante nas peneiras

Numero Peneira	Abertura das peneiras (mm)	Agregados %			
		Areia	Cal	Pedrisco	Brita 1
1	19,10	100	100	100	100
2	12,70	100	100	99,5	41,3
3	9,50	100	100	64,5	9,6
4	4,80	100	100	8,6	1,5
5	2,00	68,6	100	1,9	0,5
6	0,42	21,2	100	1,4	0,3
7	0,18	12	99,9	1,2	0,2
8	0,08	8	88	1	0,2

Fonte: Aatoria própria (2020) (Adaptada).

Usualmente, adota-se um valor entre 1,5% e 3,0% para a cal hidratada, segundo Núñez et al. (2007), e por recomendação de especialista foi aplicado neste trabalho o valor de 3% visando melhorar as propriedades do produto final.

O modelo matemático proposto foi então implementado em Matlab, teve como solução ótima para a areia, cal, pedrisco e brita 1 o valor de 36,96%, 3,00%, 44,22% e 15,82%, respectivamente. Pode-se observar que o modelo apresentou valores que respeitam a limitação de mistura passante pelas peneiras, dentro da tolerância estipulada por norma.



5 CONCLUSÕES

O concreto asfáltico usinado a quente é um material aplicado na pavimentação das ruas e vias brasileiras, sendo cerca de 90% das rodovias constituídas por CBUQ. Logo é imprescindível a pesquisa que auxilie a determinação da dosagem de seus agregados afim de proporcionar um produto final ótimo e regido pela norma DNIT (2006).

O modelo matemático proposto neste trabalho apresenta de forma inovadora uma possibilidade de determinação do traço do concreto de modo a otimizar sua composição obedecendo critérios estabelecidos por norma.

Os resultados obtidos com a aplicação em dados reais advindos de uma indústria mostraram que o modelo é capaz de determinar o traço, mantendo os materiais passantes nas peneiras dentro dos valores.

Como trabalhos futuros, pretende-se aplicar dados advindos de outras indústrias e laboratórios a fim de validar o modelo em diferentes cenários. Além disso, a incorporação do custo dos materiais permitirá avaliar a composição do traço do concreto sob a perspectiva econômica.

AGRADECIMENTOS

O autor, Guilherme Santos da Silveira, agradece ao financiamento e o incentivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A equipe faz agradecimentos a indústria do interior de São Paulo, pelo resultado do ensaio granulométrico dos agregados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA JÚNIOR, Pedro Orlando Borges de et al. Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- COELHO, Vladimir. **Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação**. 1996. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT 031**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- DIDÁTICA SP: Artigos e Equipamentos para Laboratório. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [🔗](#).
- NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. [S.l.]: Bookman Editora, 2015.
- NÚÑEZ, Washington Peres et al. Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. **ABPv-38a Reunião Anual de Pavimentação–Manaus**, 2007.
- SANTANA, Humberto. **Manual de pré-misturados a frio**. [S.l.]: IBP, 1992.
- SANTOS, Ingrid et al. Aplicação de um modelo de otimização linear restrita no traço do concreto asfáltico misturado a quente. **SICITE**, 2020.