

ABORDAGEM DE PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADO A SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Glaydston Mattos Ribeiro

Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ)

RESUMO

O presente trabalho propõe a abordagem da seleção granulométrica para misturas asfálticas como um problema de programação linear, com a aplicação na obra de restauração do pavimento do Aeroporto Internacional da Grande Natal. Sob o foco da deformação permanente em misturas asfálticas, as simulações de granulometria ocorreram sob restrições de limites de faixas (1ª fase) e de limites de parâmetros Bailey conjugados aos pontos de controle *Superpave* (2ª fase). As simulações foram consideradas aplicáveis ao caso real, com funções objetivo relacionadas às peneiras de controle de cada metodologia. A aplicação verificada na 2ª fase mostrou-se mais estruturalmente estável quando todas as composições foram avaliadas pelo método Bailey. Essa última simulação ainda foi empregada na dosagem da mistura asfáltica final, a qual apresentou comportamento mecânico adequado quanto à resistência à deformação permanente para a aplicação na obra, quando avaliada pelo ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*).

ABSTRACT

This paper proposes a linear programming problem as approach of the granulometric selection problem for asphalt mixtures, applied to the pavement restoration work of Greater Natal International Airport. Prioritizing permanent deformation in asphalt mixtures, granulometry simulations occurred under restrictions of gradation limits (first stage) and Bailey parameter limits added to Superpave control points (second stage). The simulations were considered applicable to the real case, which objective functions was related to control sieves of each methodology. The second stage application presented a better structural stability when all compositions were evaluated by Bailey method. This last simulation was still used in Superpave volumetric mix design, which presented a suitable mechanical behavior regarding the resistance to permanent deformation for the construction work, when evaluated by the uniaxial repeated load test (*Flow Number*).

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido bastante comum a ocorrência de problemas associados à deformação permanente nos revestimentos asfálticos aplicados em rodovias brasileiras. O que agrava a situação é que este tipo de defeito costuma se manifestar de maneira precoce, prejudicando a serventia dos pavimentos em poucas semanas (Nascimento, 2008). Nesse sentido, o afundamento da trilha de roda (ATR) não só reduz a vida de serviço do pavimento, como também afeta o nível de conforto do usuário, principalmente a manobra dos veículos, comprometendo a segurança da via (Fontes *et al.*, 2009). Basicamente, uma compactação adequada e uma criteriosa seleção dos materiais podem evitar esse fenômeno.

Na composição dos agregados, Stakston (2002) afirma que a granulometria e a angularidade são as propriedades que mais influenciam o comportamento das misturas. Nesse mesmo raciocínio, a granulometria é considerada por alguns pesquisadores (Fred, 1967; Roberts *et al.*, 1996) como a mais importante propriedade, pois interage diretamente com outras características: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, atrito e resistência à umidade. A distribuição granulométrica em misturas asfálticas é responsável pelo embricamento ou entrosamento dos agregados, de maneira que os agregados menores ocupem os vazios deixados pelos agregados maiores (Momm, 1998).

Portanto, a presente pesquisa propõe constituir a composição granulométrica de misturas asfálticas em um problema de programação linear, cuja solução aplicável é o algoritmo Simplex. As análises ocorrem por meio de um estudo de caso, com os materiais aplicados na obra de restauração da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional da Grande Natal. Espera-se obter misturas granulométricas compostas por um método racional, cujas análises possam ser desenvolvidas por meio de critérios objetivos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão apresentadas as caracterizações dos materiais pétreos utilizados nas simulações de composições granulométricas de misturas asfálticas, bem como as metodologias adotadas para a formação do esqueleto pétreo das misturas dessa pesquisa.

2.1. Caracterização dos agregados do concreto asfáltico

Os agregados utilizados na pesquisa são graníticos originários de uma pedra da região metropolitana de Natal-RN. Comercialmente, os produtos de britagem são distintos em material graúdo (brita 19mm, brita 16mm e brita 12,5mm) e material miúdo (pó de pedra). O material de enchimento (fíler) utilizado foi o cimento Portland tipo CP II Z 32 RS. Todos foram caracterizados segundo os ensaios previstos nas especificações da obra, cujos índices apresentaram-se satisfatoriamente, conforme a Tabela 3. Os limites adotados foram retirados da norma DIRENG 04.05.610.

Tabela 3: Caracterização dos agregados para concreto asfáltico dessa pesquisa

ENSAIO	NORMA	AGREGADO	RESULTADO	LIMITES
Abrasão "Los Angeles"	DNER ME 035/98	Brita 19mm	17,30%	≤ 40%
Adesividade (0,07% de Petrodope C)	DNER ME 078/94	Brita 19mm Brita 16mm	SATISFATÓRIA	SATISFATÓRIA
Índice de Forma	DNER ME 086/94	Brita 19mm	0,72	≥ 0,60
		Brita 16mm	0,62	
Equivalente de Areia	DNER ME 054/97	Pó de pedra	88,57%	≥ 35%
Perda ao choque (Treton)	DNER-ME 399/99	Brita 19mm	6,95%	-
Absorção	DNER-ME 081/98	Brita 19mm	0,68%	-
Densidade Real	DNER ME 195/97	Brita 19mm	2,66	-
		Brita 16mm	2,66	
		Brita 12,5mm	2,65	
		Pó de Pedra	2,67	
Densidade Aparente	DNER-ME 081/98	Brita 19mm	2,58	-
		Brita 16mm	2,58	
		Brita 12,5mm	2,57	
		Pó de pedra	2,59	

Para a granulometria dos agregados, foi utilizada a norma DNER-ME 083/98, com a abertura das peneiras caracterizadas pelo método Bailey. A Figura 1 ilustra essa característica granulométrica de cada agregado. De antemão, verifica-se que os agregados graúdos se caracterizam pela baixa distribuição de suas partículas entre as peneiras, o que dificulta ou limita a composição da mistura de agregados.

2.2. Metodologia para a composição da mistura de agregados

Todas as composições de agregados foram realizadas por meio do método Simplex, utilizando-se de sua forma primal ou dual, conforme necessidade, utilizando a ferramenta computacional *Xpress Optimization*. Todas as análises do PPL desdobraram-se sobre: 1) variáveis de decisão (representam o cerne do problema e seus valores podem ser decididos livremente pelo tomador de decisões), restrições (relações matemáticas que garantem que as soluções para as variáveis de decisão estejam de acordo com as limitações técnicas impostas pelo sistema), função objetivo (função matemática que mede o desempenho do sistema modelado, ou seja, mede a qualidade da solução em função das variáveis de decisão – maximização ou minimização) e variáveis de folga (medem o afastamento dos limites impostos pelas respectivas restrições).

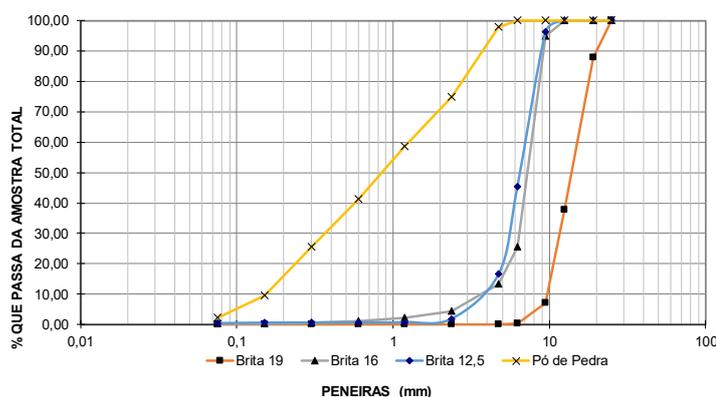


Figura 1: Composição granulométrica dos agregados dessa pesquisa

Na primeira abordagem, utilizou-se os limites superiores e inferiores da norma DIRENG 04.05.610 – Concreto Betuminoso Usinado à Quente, para aplicação em pistas aeroportuárias, de acordo com o tamanho máximo nominal correspondente às Faixas 1, 2, 3 ou 4. As restrições utilizadas pelo método Simplex foram os percentuais limitantes observados em norma. A função objetivo (FO) seguiu a análise de igualdade, maximização ou minimização dos percentuais obtidos na abertura da peneira de controle primário segundo o tamanho máximo nominal, conforme determinado na norma AASHTO M 323-13.

Em seguida, as composições continuaram sendo realizadas pelo método Simplex, porém com a substituição das restrições impostas pela norma AASHTO M 323-13 (*Superpave*) e pelo método Bailey, conferindo uma preocupação maior com a resistência ao afundamento de trilha de roda da mistura final. Portanto, as restrições foram definidas pelos pontos de controle do método *Superpave* e pelas proporções: de agregado graúdo (AG), de graúdo do agregado fino (GAF) e de fino do agregado fino (FAF). A função objetivo foi caracterizada pelo afastamento dos resultados aos limites inferior e superior do método Bailey.

De posse dos resultados, procedeu-se uma análise comparativa entre as metodologias adotadas, mostrando as limitações encontradas. Todas as misturas foram avaliadas segundo os parâmetros Bailey para posteriores conclusões. Desenvolveu-se, ainda, uma dosagem da mistura escolhida e o ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*) dessa mistura asfáltica resultante, segundo a norma ABNT NBR 16505:2016 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.

3. RESULTADOS

A seguir, algumas programações lineares serão apresentadas pelo método Simplex, seguindo as restrições da norma DIRENG 04.05.610 (1ª fase) e da norma AASHTO M 323-13 combinadas ao método Bailey (2ª fase). Os resultados obtidos em ambas as fases foram analisados e comparados para fim de proposição prática (construtiva).

3.1. Problema de programação linear delimitado por limite de faixa

Considerando os limites propostos pela norma DIRENG 04.05.610 e as características do material pétreo em pesquisa, foi obtida uma composição dos agregados que satisfizes as proposições enunciadas na Tabela 4. Para a obtenção de uma composição de tamanho máximo nominal de 19mm, foram utilizados os limites superior e inferior da Faixa 2, resultando em 17 restrições. Foram almeçadas três granulometrias, que pudessem fornecer características mecânicas diferentes à futura mistura asfáltica. Elas foram classificadas de acordo com a norma AASHTO M 323-13 para refletir o comportamento miúdo ou graúdo, conforme o valor a ser encontrado na peneira de controle primário “PCS” (4,75mm) para o tamanho máximo nominal de 19mm.

Tabela 4: Variáveis, função objetivo e restrições aplicadas na 1ª fase

PREMISSAS		DESCRIÇÃO	TIPO
Variáveis	x1	Percentual utilizado de Brita 19mm na composição	-
	x2	Percentual utilizado de Brita 16mm na composição	-
	x3	Percentual utilizado de Brita 12,5mm na composição	-
	x4	Percentual utilizado de Pó de pedra na composição	-
	x5	Percentual utilizado de Filer na composição	-
Função objetivo Peneira 4,75mm	FO	$0,09/100*x1 + 13,29/100*x2 + 16,62/100*x3 + 97,99/100*x4 + 100/100*x5$	Max, Min e Igual
Restrições	R1	Somatório na peneira 25mm	=
	R2 a R16 (pares)	Limite superior das peneiras 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 4,75mm, 2,0mm, 0,42mm, 0,18mm e 0,075mm	<=
	R3 a R17 (ímpares)	Limite inferior das peneiras 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 4,75mm, 2,0mm, 0,42mm, 0,18mm e 0,075mm	>=

A primeira granulometria, considerada miúda, foi obtida a partir da maximização da função objetivo. O resultado da composição granulométrica miúda está ilustrado na Figura 2. As variáveis de saída e o resultado da função objetivo estão na Tabela 5. Verifica-se que a grande maioria dos valores nas peneiras são atingidos muito próximos de seus valores limites superiores, conforme almejado inicialmente. Portanto, as variáveis de folga das restrições do tipo “<=” são próximas ou iguais à nulidade, com exceção aos valores das peneiras abaixo de 0,42mm. Quase todos os valores situam-se acima da linha de máxima densidade, característica marcante das misturas miúdas. Nos valores das variáveis de decisão, nota-se que essa granulometria miúda é formada em sua maior parte pelos agregados mais finos (filer e pó de pedra).

A segunda granulometria, considerada graúda, foi obtida a partir da minimização da função objetivo. Os resultados para a composição granulométrica graúda estão na Figura 3 e na Tabela 6. Sua curva aproxima-se do formato de “S”, ou seja, parte da fração graúda fica acima da linha de densidade máxima, enquanto a fração fina fica situada abaixo dessa referência. Apenas os valores nas peneiras de abertura 9,5mm e 4,75mm atingiram os valores limites inferiores. Os valores das peneiras abaixo da abertura de 2,36mm, pelas características dos

materiais empregados, não permitiram a aproximação dos limites inferiores. Essa grande quantidade de pontos em cima da linha de máxima densidade pode acarretar baixos valores de vazios do agregado mineral, o que poderá dificultar a posterior incorporação apropriada de ligante asfáltico na mistura. Mais da metade dessa granulometria é formada por agregados graúdos (brita 19mm e brita 16mm).

A granulometria intermediária foi obtida a partir da condição de igualdade da restrição R8 (Limite superior da peneira 4,75mm), independente da função objetivo. Os resultados para a composição granulométrica graúda estão na Figura 4 e na Tabela 7. O formato da curva favorece a formação de vazios do agregado mineral, já que se afasta da linha de densidade máxima. Por esse motivo, as variáveis de folga possuem vários valores diferentes de zero. O balanceamento entre agregados miúdos e graúdos se reflete nos valores das variáveis de decisão, onde aproximadamente 53% da composição é formada por brita 19mm e brita 16mm.

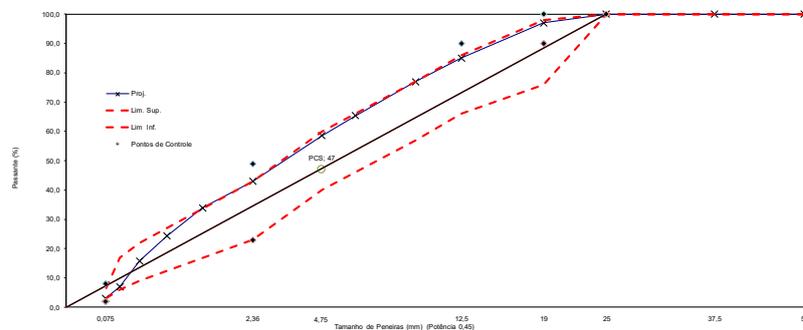


Figura 2: Curva granulométrica para a mistura miúda

Tabela 5: Valores de saída do PPL para granulometria miúda

Algoritmo		Simplex Dual		
FO		58,63		
Iterações		4,00		
Variáveis de Folga	x1'	0,00	x10'	0,00
	x2'	0,94	x11'	-20,00
	x3'	-21,06	x12'	6,18
	x4'	0,91	x13'	-6,82
	x5'	-19,09	x14'	9,97
	x6'	0,00	x15'	-1,03
	x7'	-20,00	x16'	3,00
	x8'	1,37	x17'	0,00
	x9'	-18,63		
Variáveis de Decisão	x1 (Brita 19mm)	23,99%		
	x2 (Brita 16mm)	0,00%		
	x3 (Brita 12,5mm)	19,54%		
	x4 (Pó de pedra)	54,80%		
	x5 (Fíler)	1,67%		

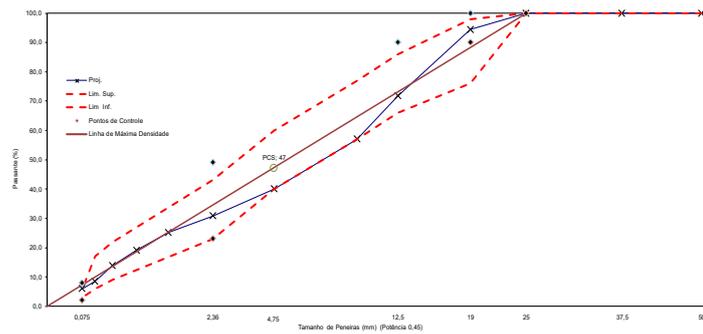


Figura 3: Curva granulométrica para a mistura graúda

Tabela 6: Valores de saída do PPL para granulometria graúda

	Algoritmo		Simplex Dual	
	FO		40,00	
	Iterações		4,00	
Variáveis de Folga	x1'	0,00	x10'	12,19
	x2'	3,56	x11'	-7,81
	x3'	-18,44	x12'	8,15
	x4'	14,21	x13'	-4,85
	x5'	-5,79	x14'	8,53
	x6'	20,00	x15'	-2,47
	x7'	0,00	x16'	0,00
	x8'	20,00	x17'	-3,00
	x9'	0,00		
Variáveis de Decisão	x1 (Brita 19mm)		45,39%	
	x2 (Brita 16mm)		16,12%	
	x3 (Brita 12,5mm)		0,00%	
	x4 (Pó de pedra)		33,30%	
	x5 (Filer)		5,19%	

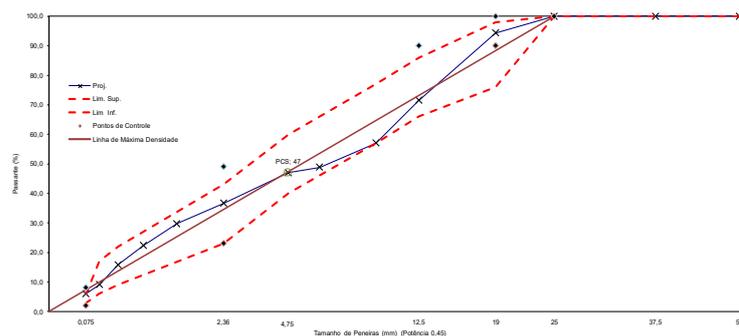


Figura 4: Curva granulométrica para a mistura intermediária

3.2. Problema de programação linear delimitado por parâmetros Bailey e pontos de controle

De acordo com critérios estabelecidos pela norma AASHTO M 323-13 (*Superpave*), a composição granulométrica de tamanho máximo nominal de 19mm deve ser controlada nas peneiras de abertura 19mm, 12,5mm, 2,36mm e 0,075mm. Essa margem, conjugada aos

parâmetros Bailey de Proporções AG, GAF e FAF, tendem a fornecer uma resistência ao afundamento de trilha de roda à futura mistura asfáltica. Nesse caso, o problema foi modelado pela minimização do somatório dos desvios positivos em relação aos limites inferiores e superiores dos parâmetros Bailey. Eles também formam o conjunto de restrições de acordo com o método, além dos pontos de controle *Superpave*. A Tabela 8 ordena de maneira mais clara a modelagem dessa 2ª fase.

Tabela 7: Valores de saída do PPL para granulometria intermediária

Algoritmo		Simplex Dual		
FO		47,00		
Iterações		4,00		
Variáveis de Folga	x1'	0,00	x10'	6,38
	x2'	3,62	x11'	-13,62
	x3'	-18,38	x12'	6,21
	x4'	14,51	x13'	-6,79
	x5'	-5,49	x14'	7,93
	x6'	20,00	x15'	-3,07
	x7'	0,00	x16'	0,00
	x8'	-	x17'	-3,00
	x9'	0,00		
Variáveis de Decisão	x1 (Brita 19mm)	45,88%		
	x2 (Brita 16mm)	7,29%		
	x3 (Brita 12,5mm)	0,00%		
	x4 (Pó de pedra)	41,82%		
	x5 (Filer)	5,01%		

Tabela 8: Variáveis, função objetivo e restrições aplicadas na 2ª fase

PREMISSAS	DESCRIÇÃO	TIPO	
Variáveis	x1	Percentual utilizado de Brita 19mm na composição	-
	x2	Percentual utilizado de Brita 16mm na composição	-
	x3	Percentual utilizado de Brita 12,5mm na composição	-
	x4	Percentual utilizado de Pó de pedra na composição	-
	x5	Percentual utilizado de Filer na composição	-
Função objetivo	PM	$7.09/100*x1 + 94.89/100*x2 + 96.37/100*x3 + 100/100*x4 + 100/100*x5$	-
	PCP	$0.09/100*x1 + 13.29/100*x2 + 16.62/100*x3 + 97.99/100*x4 + 100/100*x5$	-
	PCS	$0.06/100*x1 + 2.33/100*x2 + 0.67/100*x3 + 58.67/100*x4 + 100/100*x5$	-
	PCT	$0.06/100*x1 + 0.65/100*x2 + 0.55/100*x3 + 25.61/100*x4 + 100/100*x5$	-
	Desvios_Inf	$(PM-PCP-0.6*(100-PM))+(PCS-0.35*PCP)+(PCT-0.35*PCS)$	-
Desvios_Sup	$(0.75*(100-PM)-(PM-PCP))+(0.5*PCP-PCS)+(0.5*PCS-PCT)$	-	
FO	Desvios_Sup + Desvios_Inf	Minimização	
Restrições	R1 a R11 (ímpares)	Limites inferiores das proporções AG, GAF e FAF e das peneiras 19mm, 12,5mm, 2,36mm e 0,075mm	\geq
	R2 a R12 (pares)	Limites superiores das proporções AG, GAF e FAF e das peneiras 19mm, 12,5mm, 2,36mm e 0,075mm	\leq
	R13	Somatório das variáveis de decisão = 100%	=

Devido às características únicas dos agregados em pesquisa, não foi possível estabelecer qualquer solução viável com a totalidade dessas restrições. Conforme já antecipado na caracterização granulométrica, apenas um único agregado – Pó de pedra – estabelece maior influência sobre os valores finais nas peneiras de abertura inferior a 2,36mm. Portanto, sem um segundo agregado influente nessas aberturas, as restrições da PCS e da PCT só serão respeitadas se a característica do pó de pedra for favorável, o que não ocorre no caso em tela.

Para efeito de pesquisa, resolveu-se abolir a restrição R4 (Limite superior da proporção GAF), a qual foi identificada como crítica para as modelagens, pois conflitava com as restrições R9 a R12 (pontos de controle miúdos). Em análise futura, será verificado o quanto a proporção GAF ultrapassa o limite imposto pelo método, as consequências para os vazios do agregado mineral (VAM) e o comportamento mecânico da futura mistura asfáltica quanto à resistência ao afundamento de trilha de roda.

Assim, a composição final granulométrica pode ser visualizada na Figura 5, cujos resultados estão na Tabela 9. Verifica-se o formato desejável da curva “S”, com a vantagem do afastamento da linha de máxima densidade, que tende a fornecer um valor de vazios do agregado mineral adaptável a misturas asfálticas. A visualização da figura corrobora com os valores das variáveis de folga nulas nos pontos (restrições) dos limites inferiores nas peneiras de abertura 2,36mm e 0,075mm. A eliminação da restrição R4 possibilitou a inclusão dos agregados graúdos em detrimento ao pó de pedra. Assim, a composição foi formada por aproximadamente 72% de brita 19mm e brita 16mm.

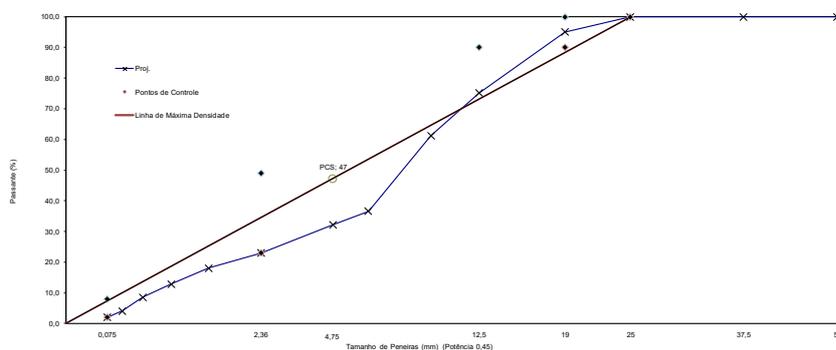


Figura 5: Curva granulométrica para a mistura *Superpave* e Bailey

3.3. Dosagem e ensaio uniaxial de carga repetida

Após as duas primeiras fases, comparou-se os resultados obtidos das quatro granulometrias. Apesar do desrespeito em 0,06 pontos ao limite superior da proporção GAF, a mistura obtida pela solução ao PPL da 2ª fase mostrou-se mais estável que as da 1ª fase devido aos seguintes motivos: curva em formato “S” sem a aproximação da linha de máxima densidade; e proporção de agregados graúdos superior e dentro do limite, com balanço mais adequado da proporção FAF e GAF, conforme Figura 6.

Então, a mistura de agregados resultante do problema de programação linear delimitado por parâmetros Bailey e pontos de controle foi submetida ao processo de dosagem de mistura asfáltica, seguindo os preceitos da norma AASHTO M 323-13 (*Superpave*). Os requisitos da mistura, em função da aplicação em pista aeroportuária, foram delimitados por Cooley Jr. *et al.* (2010), utilizando a pressão de pneus superior a 200 psi (1,4 MPa). Após todos os

procedimentos, determinou-se o teor ótimo de ligante (CAP 55/75-E, PG 76-22) em 4,1%. Estabelecido esse critério, verificam-se, na Tabela 10, as propriedades volumétricas dessa mistura. Observa-se, também, que a proporção GAF acima de 0,50 não comprometeu a obtenção do percentual mínimo de VAM da mistura.

Tabela 9: Valores de saída do PPL para granulometria *Superpave* e Bailey

Algoritmo		Simplex Dual		
FO		13,34		
Iterações		5,00		
Variáveis de Folga	x1'	-5,82	x8'	14,86
	x2'	0,00	x9'	0,00
	x3'	-6,75	x10'	26,00
	x4'	-	x11'	0,00
	x5'	-2,19	x12'	6,00
	x6'	0,51	x13'	0,00
	x7'	-5,10		
Variáveis de Decisão	x1 (Brita 19mm)	39,99%		
	x2 (Brita 16mm)	31,53%		
	x3 (Brita 12,5mm)	0,00%		
	x4 (Pó de pedra)	27,18%		
	x5 (Filer)	1,30%		
Proporções	AG	0,75		
	GAF	0,56		
	FAF	0,47		

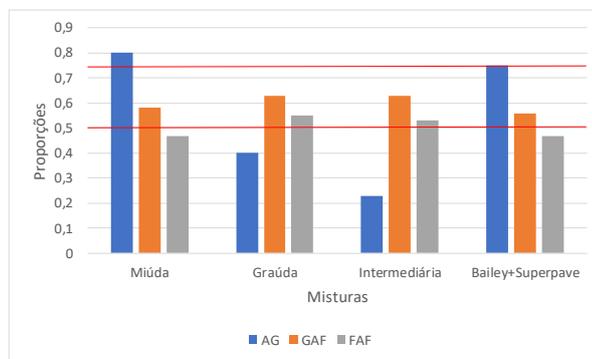


Figura 6: Proporções das misturas analisadas nessa pesquisa

Tabela 10: Propriedades da mistura

PROPRIEDADES	RESULTADOS	CRITÉRIOS
TMN(mm)	19,0	19,0
%G _{mm} @ N _{ini} = 7	86,4	≤ 89
%G _{mm} @ N _{proj} = 80	96,6	96
V _v (%)	3,4	4,0 ± 1,0
RBV (%)	67,8	65 a 78
VAM (%)	14,1	> 14
Proporção pó/betume	1,6	0,8 a 1,6

O ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*) foi conduzido conforme determina a norma ABNT NBR 16505:2016. Na Figura 7 e na Figura 8, foram modeladas as curvas com os valores de Deformação Plástica Acumulada *versus* Número de Ciclos e Taxa de Deformação *versus* Número de Ciclos coletadas nos ensaios.

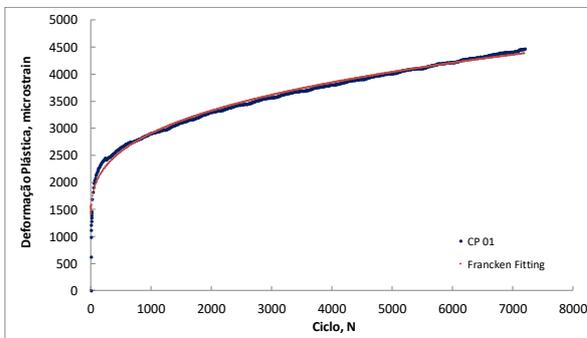


Figura 7: Resultados de deformação plástica da mistura asfáltica

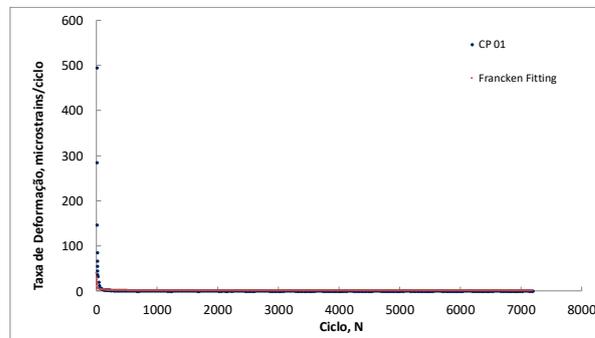


Figura 8: Resultados de taxa de deformação plástica da mistura asfáltica

Vale ressaltar que o ensaio foi finalizado sem que o corpo de prova atingisse a Zona Terciária, pois o mesmo já estava com N (número de ciclos) acima de 7200 e ainda não havia alcançado o valor de deformação limite para a sua interrupção. O valor absoluto de deformação plástica, após 7200 ciclos de carregamento, foi de 4470 microstrains, que é considerado baixo em comparação com a literatura (Nascimento, 2008; Almeida Junior, 2016), denotando uma boa resistência à deformação permanente da mistura.

Além disso, observa-se que a taxa de deformação tendeu a um valor constante mínimo (taxa média de 2,1 microstrains/ciclo), não ocorrendo um crescimento da mesma até o momento da parada do ensaio. Esse comportamento indica que a mistura possui *Flow Number* muito acima de 750 ciclos, que caracteriza uma indicação para Rodovias de Tráfego Pesado, segundo Nascimento (2008).

4. CONCLUSÕES

De acordo com os dados relatados, foi apresentada uma sugestão de abordagem à composição granulométrica de misturas asfálticas, com ênfase no problema de programação linear solucionado por algoritmo Simplex. Um estudo de caso foi aplicado na obra de restauração do Aeroporto Internacional da Grande Natal, objetivando exemplificar a aplicação dessa abordagem. Os resultados foram satisfatórios quando aplicados com foco na deformação permanente de misturas asfálticas e mostraram um caráter mais racional em comparação com o método das tentativas, comumente aplicado em situações semelhantes. Tal conclusão ampara-se no alto valor de *Flow Number* encontrado nos ensaios em laboratório.

Na caracterização dos agregados, foi identificado que os agregados mais graúdos (brita 19mm, brita 16mm e brita 12,5mm) não se distribuem granulometricamente de maneira a influenciar os valores de mistura nas peneiras de granulometria mais miúda. Portanto, todas as consequências nas aberturas inferiores a 4,75mm ficam quase que exclusivamente a cargo do pó de pedra. Essa exclusividade potencialmente limita as análises e simulações, o que foi confirmado na 2ª fase de resultados. A pesquisa propôs a otimização linear pautada, na 1ª fase, pelos limites de faixa da norma da Diretoria de Engenharia Aeronáutica (DIRENG) e, em 2ª fase, pelos limites das proporções Bailey conjugados pelos pontos de controle

Superpave. A 1ª fase mostrou que é possível ao projetista compor granulometrias graúdas, miúdas e intermediárias por meio, respectivamente, da minimização, maximização e igualdade com a abertura de peneira que delimita a classificação da composição granulométrica *Superpave*. No estudo de caso, foi verificado que a mistura miúda se comportou de maneira mais propícia à estabilidade, já que sua curva se afasta da linha de máxima densidade em relação às demais. Na 2ª fase, comprovou-se que as restrições formuladas pelo método Bailey conjugadas com as da especificação *Superpave* não forneceram soluções viáveis ao problema aplicado em caso concreto. Foi necessária a identificação das restrições conflitantes para o prosseguimento das análises. Tanto no aspecto do VAM, obtido durante a dosagem da mistura asfáltica, quanto no aspecto do comportamento da mistura quanto à sua resistência ao afundamento de trilha de roda, não foi possível identificar consequências negativas da pequena extrapolação do limite superior da proporção GAF. A mistura asfáltica obtida com a simulação da 2ª fase (limites das proporções Bailey conjugados pelos pontos de controle *Superpave*) apresentou bom comportamento mecânico caracterizado pelo seu alto *Flow Number* (acima de 7200).

Portanto, foi possível o estabelecimento plausível de misturas granulométricas por problema de programação linear. O método mostrou-se mais racional que o método das tentativas comumente aplicado para misturas asfálticas. A mistura asfáltica decorrente da simulação mais estável (2ª fase) apresentou resultados satisfatórios de resistência ao acúmulo de deformação permanente no ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Júnior, P.O.B. (2016) *Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
- Bernucci, L.L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2010) *Pavimentação Asfáltica*. Formação Básica para Engenheiros. Petrobras. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ.
- Budny, J. (2012) *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
- Cooley Jr., L. A.; Ahlrich, R. C.; James, R. S. (2010) Design of hot mix asphalt for airfield pavements using the superpave gyratory compactor. *2010 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ.
- Ferreira, J.L.S; Soares, J.B.; Bastos, J.B.S. (2016) Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. *Transportes*, v. 24, n. 2, p. 46–52.
- Fontes, L. P. T. L.; Trichês, G.; Pais, J. C.; Pereira, P. A. A. (2009) Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1193-1200.
- Fred, N. Finn. (1967) *Factors involved in the design of asphaltic pavement surfaces*. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, Report 39, National Academy Press, Washington.
- Momm, L. (1998) *Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
- Kim, Y.-R.; Aragão, F. T. S.; Lutif, J. E. S. (2006) *Restricted-zone requirements for Superpave mixes made with local aggregate sources*. Research Report Number 556, Lincoln, NE.
- Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D. Y.; Kennedy, T. W. (1996) *Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction*. 2 ed. Lanham, Maryland, Napa Education Foundation, 1996.
- Soliz, V.V.P. (2007) *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
- Stakston, A. D. (2002) *The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot-mix asphalt performance in a laboratory study*. Dissertação (Master of Engineering) - University of Wisconsin.
- Vavrik, W. R.; Huber, G.; Pine, W.; Carpenter, S. H.; Bailey, R. (2002) Bailey method for gradation selection in HMA mixture design. *Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044*. Washington.

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento (filipeacn@pet.coppe.ufjf.br); Laura Bahiense da Silva Leite (laura@cos.ufjf.br); Glaydston Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufjf.br); Marcelino Aurelio Vieira da Silva (marcelino@pet.coppe.ufjf.br)

Programa de Engenharia de Transportes, COPPE/UF RJ

Av. Horácio Macedo, 2030 – Bloco H Sala 106 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450