

# Efeito de diferentes granulometrias normativas na resistência mecânica de concretos compactados com rolo para pavimentação

ANDRÉIA POSSER CARGNIN - DOUTORANDA (ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1568-2756>) (andreiacargnin@usp.br);

JOSÉ TADEU BALBO - PROF. TITULAR (ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9235>);

LIÉDI L. B. BERNUCCI - PROF. TITULAR (ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4768-0993>) - EPUSP

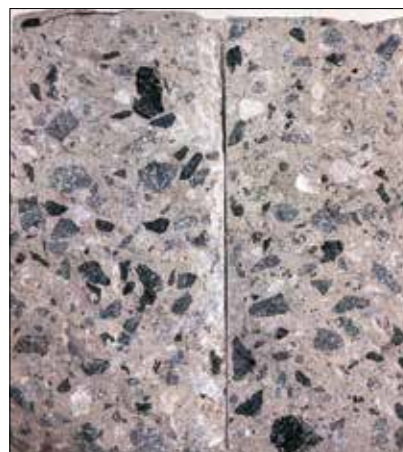
## RESUMO

**C**ONCRETOS COMPACTADOS COM ROLO, DIFERENTEMENTE DOS TRADICIONAIS CONCRETOS PLÁSTICOS, TEM SUA RESISTÊNCIA MECÂNICA DEFINIDA PELO EFEITO COMBINADO DA MATRIZ PÉTREA E CIMENTÍCIA, SENDO QUE UM ADEQUADO EMPACOTAMENTO É GARANTIDO PELO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO. NO PRESENTE ESTUDO AVALIAM-SE OS IMPACTOS DE TRÊS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS, DO *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE*, DO *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION* E DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (USUÁRIO MAIS COMUM DE BASES CIMENTADAS EM PAVIMENTAÇÃO) NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MISTURAS DE BRITA GRADUADA COM CIMENTO, PRODUZIDAS COM TEOR DE CIMENTO DE 4% EM PESO (CONSUMO DE APROXIMADAMENTE 95 kg/m<sup>3</sup>). AS MISTURAS PRODUZIDAS COM A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EN 14227-1 DO *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION* APRESENTARAM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA APROXIMADAMENTE 20% SUPERIOR À MISTURA TÍPICA BRASILEIRA, BEM COMO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA FOI SUPERIOR EM 10%, APONTANDO PARA A NECESSIDADE DE REVISÃO DOS CRITÉRIOS NORMATIVOS NACIONAIS PARA MAIOR EFICIÊNCIA DO MATERIAL ESTRUTURAL.

**PALAVRAS-CHAVE:** CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO, GRANULOMETRIA, DOSAGEM, RESISTÊNCIA MECÂNICA.

## 1. INTRODUÇÃO

As origens do concreto compactado com rolo (CCR) como material de pavimentação remontam à estabilização de solos e materiais granulares. Os franceses, por



A



B

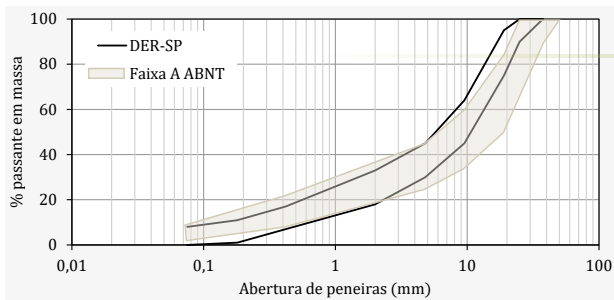
## FIGURA 1

COMPARAÇÃO EM TERMOS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE CONCRETOS: (A) CONCRETO PLÁSTICO; (B) CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

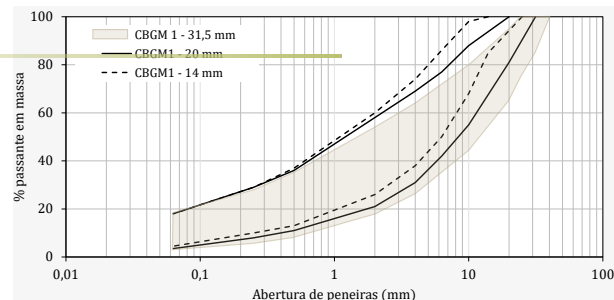
exemplo, começaram a utilizar a partir da segunda metade do século XX, misturas de pedra britada com pequenas quantidades de cimento para aplicação como base de pavimentos. Adicionavam outrora pequenos consumos de ligante (3 a 5% em peso, correspondendo a um consumo de 70 a 110 kg/m<sup>3</sup>) à mistura de brita graduada buscando um maior empacotamento das partículas, observando mais tardiamente que tais adições, ainda que em pequenas quantidades, alteravam as propriedades do material, conferindo-lhe resistência e rigidez, alterando, por conseguinte, seu comportamento mecânico [1]. Àquela mistura deu-

-se o nome de *grave-ciment*, que, no Brasil, recebeu a nomenclatura de brita graduada tratada com cimento (BGTC). Recomendavam ainda que as propriedades mecânicas da BGTC fossem avaliadas após um ano da aplicação em campo - prática que persiste até hoje - podendo ser estimadas para idades de 28, 60 e 90 dias, em função na natureza do ligante hidráulico[2].

Já a escola inglesa registrou, por volta da década de 1930 a 1940, mesma época dos primeiros registros nos EUA, as primeiras aplicações dessa mistura, porém empregando percentuais maiores de cimento, partindo de 8% em peso (que corresponde a



**FIGURA 2**  
FAIXA DER-SP



**FIGURA 3**  
FAIXA CBGM 1 – EN 14227-1

um consumo de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>, podendo chegar até 13% [3], [4], sendo a mistura designada inicialmente por *lean concrete*, atualmente reconhecido por concreto compactado com rolo (CCR). Apesar de o CCR ter se popularizado na construção de barragens, suas aplicações enquanto material de pavimentação naquela época foram bem pontuais, disseminando-se para tal fim fortemente na década de 1970 no Canadá [5].

Cabe destacar que tanto a BGTC quanto o CCR são produzidos de maneira similar (exceto procedimento de mistura), considerando seu método de dosagem e construção (compactação com rolo liso vibratório na energia especificada), apresentando uma consistência seca (abatimento zero). Comparados aos tradicionais concretos plásticos, possuem menor consumo de agregados graúdos (em torno de 55% comparado a cerca de 85%, caso de concretos plásticos), ao passo que o percentual da fração miúda tende a ser maior, de tal sorte que preencham os vazios entre as partículas maiores, aumentando seu empacotamento [6], conforme evidencia-se na Figura 1.

Dessa forma, a resistência mecânica de tal material pouco argamassado é garantida pelo processo de compactação e efeito combinado do esqueleto pétreo – responsável pela estabilidade mecânica da estrutura através do intertravamento dos grãos e matriz cimentícia – responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica e rigidez por meio de pontes descontínuas de pasta e argamassa (ligações pontuais) entre as partículas granulares.

Sherwood [2] destaca que a resistência à compressão de um material estabilizado aumenta exponencialmente à medida que sua massa específica aparente seca aumenta e que o aumento de 1% neste último parâmetro representa incremento, em média, de até 10% na medida. Por essa razão, tais materiais deveriam ser compactados

na energia modificada, em detrimento da normal ou intermediária, prática atualmente adotada na grande maioria dos países que empregam o material na construção viária. Xuan *et al.* [3] destacam ainda que os efeitos do baixo grau de compactação poderiam ser compensados, em caso de compactação em energia inferior à modificada, aumentando o teor de cimento, em decorrência da maior disponibilidade de argamassa para recobrimento dos grãos (caso do CCR compactado na energia normal).

Isso pode ser observado em CCRs produzidos com consumos de cimento mais elevados (acima de 150 kg/m<sup>3</sup>), quando a maior disponibilidade de argamassa permite sua compactação na energia normal. Todavia, no caso de misturas produzidas com teores de cimento mais baixos (da ordem de 100 a 120 kg/m<sup>3</sup>), recomenda-se a compactação do material na energia modificada para garantir o entrosamento desejável entre as partículas, de tal sorte que a resistência mecânica desejada seja alcançada.

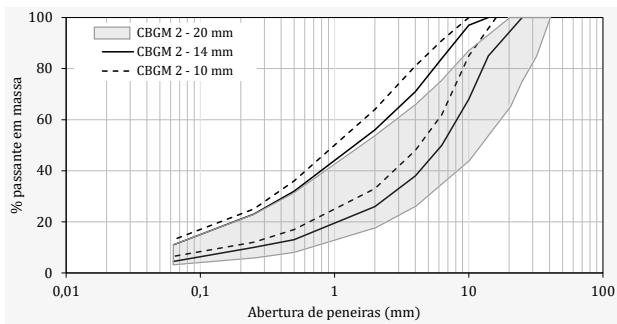
Em termos de distribuição granulométrica dos agregados, cabe destacar que um balanço adequado entre as frações de agregado graúdo e miúdo, com este último preenchendo os vazios existentes entre as partículas maiores é essencial para se garantir um bom empacotamento dos grãos e atendimento dos parâmetros de projeto.

### 1.1 Faixas granulométricas

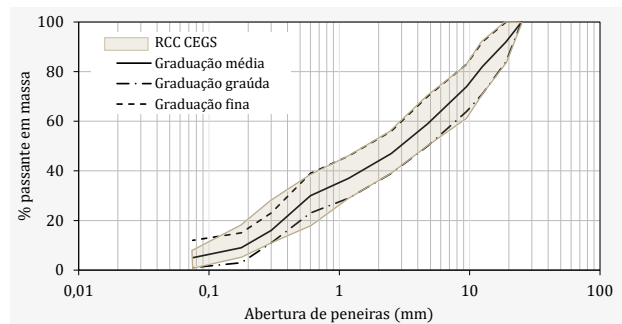
No desenvolvimento do presente estudo, trabalhou-se com faixas granulométricas para misturas estabilizadas com cimento, estabelecidas pela norma europeia EN 14227-1 [4], que abarca tanto misturas que variam do tradicional solo-cimento ao CCR, com a faixa recomendada para CCR pelo *American Concrete Institute (ACI)* por Pittman e Ragan [5], bem como a faixa estabelecida na norma do Departamento de

Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) [11] para BGTC, podendo-se delas inferir os seguintes comentários de natureza pragmática:

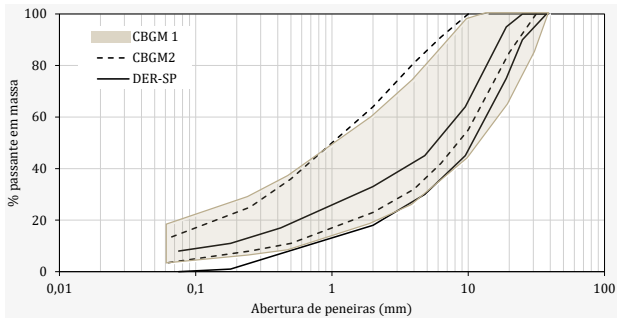
- ▶ A faixa granulométrica para BGTC do DER-SP [11] (Figura 2), idêntica à faixa A da ABNT NBR 11803 [6], deriva, tal como outras especificações brasileiras para o material, de faixas de especificação para brita graduada simples (BGS). O mesmo órgão possui também uma especificação para CCR, sem, todavia, estabelecer uma faixa granulométrica a ser seguida para a dosagem da mistura;
- ▶ A norma europeia EN 14227-1 [4] abrange cinco faixas granulométricas para materiais granulares estabilizados para pavimentação: CBGM 1 (*cement bound granular mixture 1*), CBGM 2, CBGM 3, CBGM 4 e CBGM 5. As misturas CBGM 1 (Figura 3) são divididas em três categorias em função da dimensão máxima dos agregados (31,5 mm, 20 mm e 14 mm), ao passo que as CBGM 2 (Figura 4), igualmente dividida em três categorias (diâmetro máximo de 20 mm, 14 mm ou 10 mm), devem apresentar uma compactidade mínima de 0,80 da máxima massa específica aparente seca obtida na energia modificada. As misturas CBGM 3, 4 e 5, por sua vez, são misturas associadas à estabilização de solos granulares com cimento;
- ▶ Pittman e Ragan [5] estudaram distribuições granulométricas para CCR com graduação graúda, média e fina (Figura 5), para avaliação da magnitude de retração por secagem no material. As misturas foram desenvolvidas de modo que apresentassem uma consistência adequada para compactação em pista e atendessem ao guia de especificações do *United States Army Corps of Engineers – USACE (Corps of Engineers guide specification – CEGS)*.



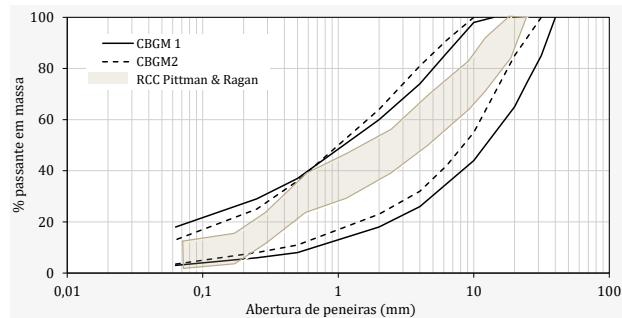
**FIGURA 4**  
FAIXA CBGM 2 - EN 14227-1



**FIGURA 5**  
FAIXA PARA CCR (USACE)



**FIGURA 6**  
FAIXAS DER-SP x CBGM 1 E 2 DA EN 14227-1



**FIGURA 7**  
FAIXAS CCR (USACE-ACI) x CBGM 1 E 2 DA EN 14227-1

Dessa forma, a curva média de Pittman e Ragan, normalmente empregada nas dosagens de CCR, não necessariamente corresponde àquela de maior resistência, mas sim àquela cuja retração por secagem foi a menor verificada pelos autores em seu estudo;

- ▶ A faixa granulométrica do DER-SP enquadra-se na especificação europeia, com exceção das frações finas abaixo da #40 (0,42 mm). Observa-se também que o limite máximo de material passante na peneira 4,8 mm permitido pelo DER-SP é de 45%, enquanto a norma europeia, em seus limites mais finos, permite percentuais da ordem de 80% de agregado miúdo (passante na #4,8 mm). Além disso, o percentual passante na peneira 0,075 mm tolerado pela faixa do DER-SP é de 8%, ao passo que na EN-14227-1 são tolerados percentuais da ordem de 18% (Figura 6). Já, a faixa de CCR do USACE (mesma adotada pelo ACI) enquadra-se completamente dentro dos limites europeus, sendo mais restritiva no percentual máximo de finos (Figura 7). Enquanto a faixa de CCR permite um percentual de finos (passante na 0,075

mm) de 12%, a norma europeia permite até 18% de finos no limite inferior da faixa CBGM1 e 13% na graduação fina da faixa CBGM 2.

- ▶ Por fim, observa-se que a faixa granulométrica de BGTC do DER-SP difere bastante da faixa granulométrica de CCR do USACE (e do ACI). O limite inferior (graduação mais fina) da faixa brasileira encontra-se mais próximo do limite superior da faixa (graduação mais graúda) de CCR (frações entre 9,5 e 2,4 mm), evidenciando a graduação mais grossa da BGTC (Figura 8).

Em última análise, o tecnologista responsável pelo projeto de mistura, assim como o empreiteiro, devem ter em mente que o controle da granulometria consiste em um dos parâmetros cruciais para o desempenho da mistura, de modo que o empacotamento das partículas, a densidade do material e sua estabilidade sejam favorecidos. A escassez da fração miúda dificulta a compactação do material, que apresentará estabilidade apenas se confinado; por outro lado, o excesso da fração miúda acarretará perda de contato entre os grãos, afetando também sua estabilidade e resistência.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

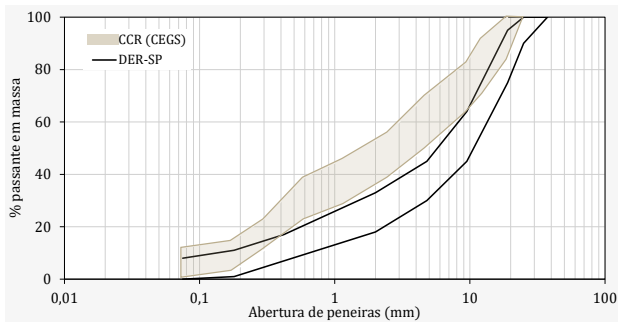
Para a definição das curvas granulométricas de interesse para a dosagem das misturas considerando as três faixas granulométricas selecionadas, realizou-se uma análise quanto aos coeficientes de Talbot (n) de seus limites superiores e inferiores. Tal procedimento foi adotado considerando-se que o desenvolvimento de misturas densas e bem graduadas são norteadas pelos estudos clássicos de Fuller e Thompson [7] e de Talbot e Richart [8], que desenvolveram faixas granulométricas bem graduadas para o proporcionamento de misturas de concreto, conforme a equação (1).

$$[1] \quad p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Sendo:

- p – o percentual passante na peneira de diâmetro d;
- d – o diâmetro de uma dada peneira;
- D – o diâmetro máximo dos grãos que compõem a mistura; n o expoente da função.

As Figuras 9 a 12 ilustram as três faixas de interesse do estudo, bem como os valores do coeficiente de Talbot (n) calculados para os limites das faixas granulométricas estudadas.



**FIGURA 8**  
FAIXAS DE BGTC (DER-SP) x CCR (USACE-ACI)

Sabendo que as máximas densidades para misturas bem graduadas são obtidas para curvas com coeficiente de Talbot entre 0,40 e 0,60, as curvas selecionadas para o desenvolvimento do estudo laboratorial foram: (i) limite inferior do DER-SP; (ii) curva média para as misturas CBGM 2 da EN 14227-1, desconsiderando o limite máximo permitido pela norma, que permite um percentual mais elevado de fração fina, desde que não haja finos nocivos da rocha britada; (iii) curva média do USACE, representadas nas Figuras 13, 14 e 15, respectivamente.

álcali-agregado (RAA). Ensaios para determinação da massa específica real e aparente dos grãos e absorção foram realizados seguindo os procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6458 [9] e DNER-ME 195/97 [10], cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

## 2.2 Cimento Portland

O cimento Portland empregado na produção das misturas de CCR foi CP III 40 RS, cuja resistência mecânica aos 28 dias é de 46,7 MPa e superfície Blaine de 4.812 cm<sup>2</sup>/g.

## 2.1 Agregados

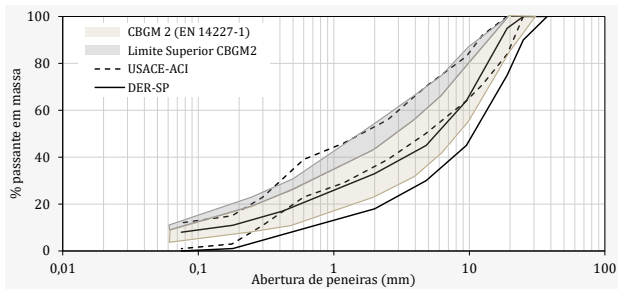
A análise petrográfica do agregado empregado indicou ser originário de rocha metamórfica classificada como gnaiss, sendo potencialmente inócuo para reação

O teor de ligante empregado foi de 4% em relação à massa de agregado, correspondendo a um consumo de aproximadamente 95 kg/m<sup>3</sup>.

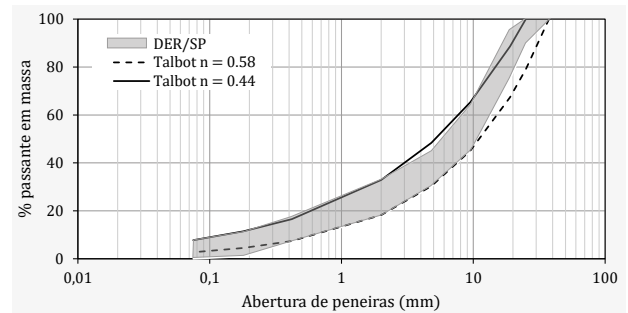
## 2.3 Dosagem das misturas

A dosagem das misturas de CCR foi pautada na determinação da umidade ótima de compactação para as três curvas granulométricas estudadas, seguindo os procedimentos balizados pela ABNT NBR 7182 [1] para misturas sem adição de cimento. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), compactados na energia modificada (soquete de Proctor grande com massa de 4,5 kg e altura de queda de 45,7 cm). Para tal energia, os CPs foram compactados em 8 camadas, aplicando-se 26 golpes por camada. Nas Figuras 16, 17 e 18 são apresentadas as curvas de compactação obtidas para as três graduações estudadas.

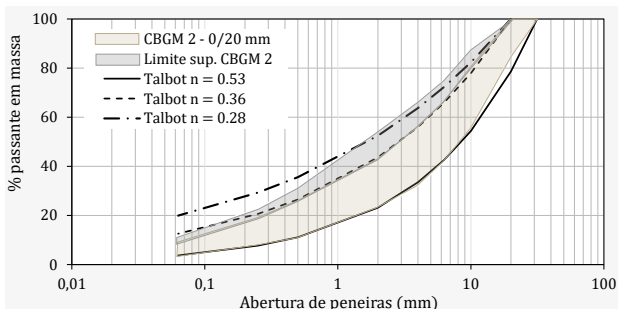
De posse das curvas de compactação para as misturas, a umidade de compactação foi definida com base nas recomendações



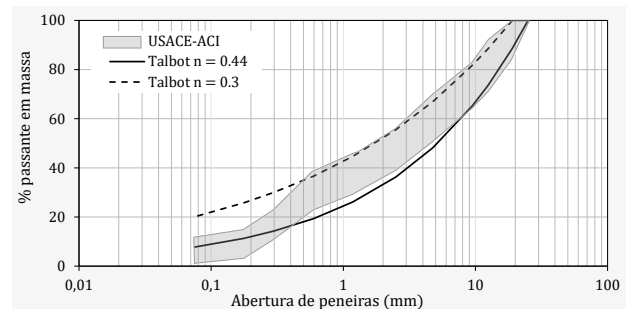
**FIGURA 9**  
FAIXAS GRANULOMÉTRICAS ESTUDADAS



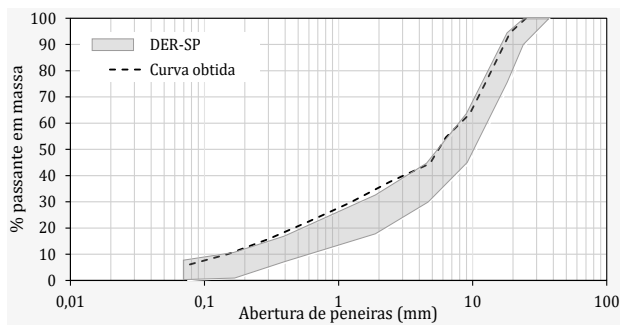
**FIGURA 10**  
COEFICIENTES DE TALBOT PARA LIMITES DA FAIXA DER-SP



**FIGURA 11**  
COEFICIENTES DE TALBOT PARA LIMITES DA FAIXA EN 14227-1

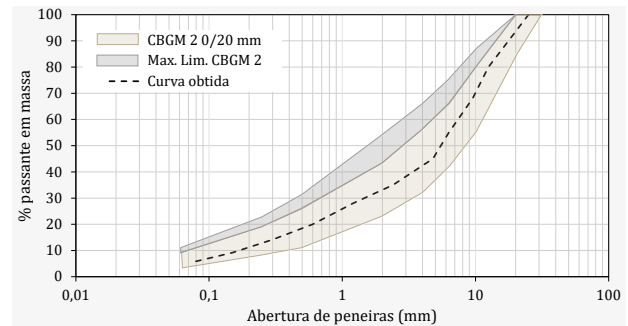


**FIGURA 12**  
COEFICIENTES DE TALBOT PARA LIMITES DA FAIXA (USACE-ACI)



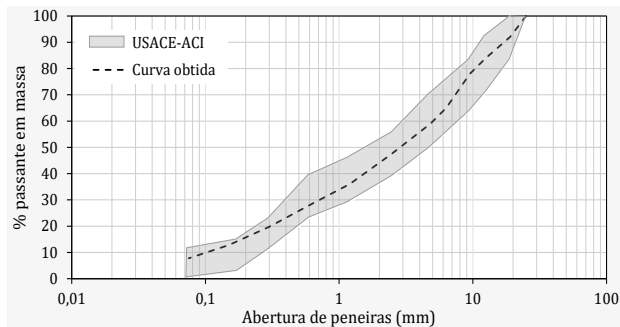
**FIGURA 13**

CURVA GRANULOMÉTRICA LIMITE SUPERIOR DER-SP



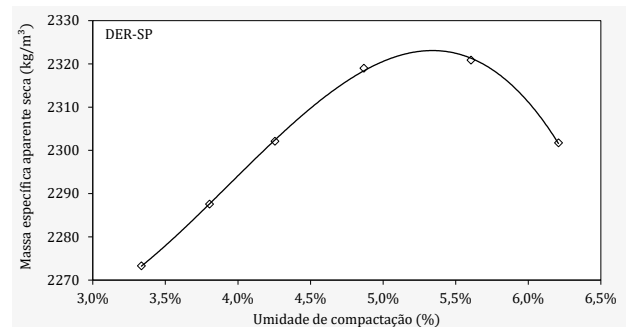
**FIGURA 14**

CURVA GRANULOMÉTRICA MÉDIA PARA EN 14227-1



**FIGURA 15**

CURVA GRANULOMÉTRICA MÉDIA PARA CCR (USACE-ACI)



**FIGURA 16**

CURVA DE COMPACTAÇÃO DER-SP

de Balbo [1] para o preparo das amostras com cimento; considerando que a resistência do material é potencializada para compactações realizadas no ramo seco (umidade de compactação ligeiramente abaixo da ótima para favorecimento do encastelamento dos cristais de hidratação) e na energia modificada, as amostras ensaiadas foram compactadas na umidade correspondente a 1,5% abaixo da ótima. Assim, as umidades de compactação para as amostras produzidas com as curvas do DER-SP, EN 14227-1 e USACE-ACI foram de 3,9%, 4,7% e 4,0%, respectivamente.

Os CPs compactados foram extraídos dos moldes e armazenados em tubos de PVC com 100 mm de diâmetros, lacrados em sacos plásticos até as idades de ensaio

(28 dias), sendo acondicionados em uma câmara com condições de umidade e temperatura controladas (22°C e umidade de aproximadamente 80%).

#### 2.4 Ensaios mecânicos

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e tração indireta das amostras conforme os procedimentos preconizados pelas normas ABNT NBR 5739 [12] e ABNT NBR 7222 [13], respectivamente. Para esta finalidade, foram moldados seis CPs por mistura para avaliação de cada uma das resistências. Os ensaios de compressão uniaxial empregaram velocidade de aplicação de carga de 0,3 MPa/s (2,36 kN/s), ao passo que os ensaios em compressão diametral mantiveram taxa de aplicação de carga de 0,01 MPa/s (0,314 kN/s), seguindo os arranjos experimentais ilustrado pelas Figuras 19 e 20, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração indireta foram confrontados, consideradas

as três granulometrias estudadas, sendo apresentados na Figura 21.

Observa-se da Figura 21 que foram obtidos padrões de resistência (relação resistência à tração indireta x compressão simples) que diferem entre si, considerando cada uma das curvas granulométricas estudadas. Análises de variância de fator único (ANOVA) para confirmação das diferenças foram realizadas para um nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), tanto para resistência à compressão como para resistência à tração indireta, sendo os resultados apresentados na Tabela 2.

A análise de variância foi conduzida assumindo como hipótese nula ( $H_0$ ) que as médias de resistência (à compressão e tração indireta) para as três curvas seriam iguais e como hipótese alternativa ( $H_1$ ) que ao menos uma delas difere das demais. Para ambos os casos, observa-se que as médias não podem ser consideradas iguais, uma vez que o valor de  $F_{\text{calculado}}$  resultou maior do que  $F_{\text{crítico}}$ , devendo-se, portanto, rejeitar a hipótese nula e aceitar a hipótese alternativa.

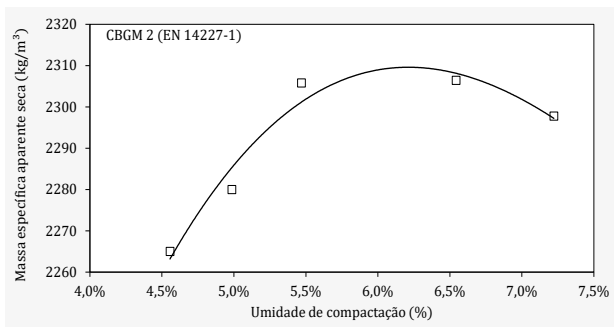
Para fins de comparação entre as médias de resistência, os resultados foram,

**TABELA 1**

PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO

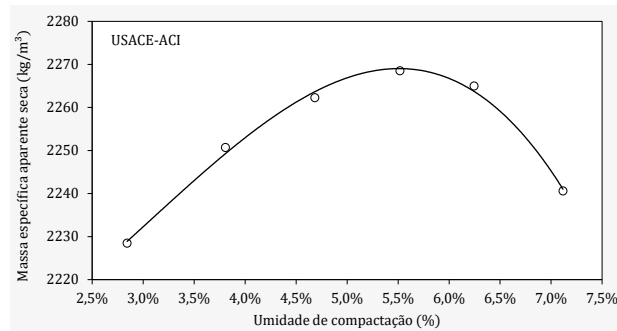
Massa específica real (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Absorção (%)
2,675	2,652	0,33





**FIGURA 17**

CURVA DE COMPACTAÇÃO EN 14227-1



**FIGURA 18**

CURVA DE COMPACTAÇÃO CCR USACE-ACI

então, confrontados entre si em pares, tanto para resistência à compressão como em tração indireta por meio de testes de hipótese t-Student para médias, para um nível de confiança de 95%, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Para a resistência à compressão simples, os testes de hipótese revelaram, para os três cenários, que as médias são estatisticamente diferentes; a resistência à compressão simples aos 28 dias, para um consumo de cimento de 95 kg/m<sup>3</sup> para a mistura elaborada com a curva média da faixa EN 14227-1 foi cerca de 20% maior do que a resistência obtida para a faixa coincidente com o limite superior da faixa do DER-SP. Já, em relação à curva média da faixa do ACI, a resistência à compressão para a curva EN 14227-1 foi em torno de 10% maior; comparando-se as curvas do ACI e do DER-SP, os testes de hipótese confirmaram que a média para a

curva média de Pittman e Ragan resultou cerca de 10% maior do que o limite inferior da curva DER-SP.

Considerando a resistência à tração indireta, os testes de hipótese revelaram que as médias entre as curvas DER-SP e EN 14227-1 e USACE-ACI e EN 14227-1 são estatisticamente diferentes para um nível de significância de 5%, ao passo que as médias entre as curvas DER-SP e USACE-ACI são estatisticamente iguais.

Tal comportamento é associado às diferenças observadas nas distribuições granulométricas estudadas; o primeiro indício de que as curvas possuem distinções importantes entre si está na umidade de compactação: enquanto as distribuições correspondentes ao limite superior da faixa DER-SP e CCR resultaram em umidade similares (5,4% e 5,5%, respectivamente), a curva média para a faixa CBGM 2 resultou em uma umidade ótima de 6,2%; mantido o teor de cimento em peso, a relação a/c naturalmente aumentou.

Mesmo com as misturas sendo compactadas no ramo seco (1,5% abaixo da umidade ótima), do ponto de vista da tecnologia de concreto tal aspecto seria prejudicial ao material em termos de desenvolvimento de resistência, uma vez que, para um mesmo consumo de cimento, uma maior umidade de compactação implica em maior relação água/cimento.

Contudo, vale ressaltar que em se tratando de um concreto seco, com baixo consumo de cimento, a resistência é baseada no efeito combinado da pasta de cimento (responsável por ligações pontuais entre as partículas de agregado) e principalmente pela compacidade e pelo empacotamento do esqueleto pétreo. Para verificação analisaram-se os valores do coeficiente de Talbot (n) obtidos para as três curvas, obtendo-se valores de n de

0,42 (Figura 22), 0,45 (Figura 23) e 0,33 (Figura 24) para as curvas DER-SP, CBGM 2 e ACI, respectivamente, confirmando que de fato, a curva média para a distribuição da norma europeia apresenta uma melhor distribuição em termos de empacotamento das partículas.

Fato comum às três curvas estudadas, todavia, é a limitação do diâmetro máximo dos agregados em 20 mm (caso na norma europeia) ou 19 mm (caso das curvas DER-SP e CCR), o que favorece o empacotamento das misturas. Destaca-se ainda a necessidade de revisão em critérios de distribuição granulométrica para misturas do tipo BGTC e CCR no Brasil, reorientando-se ao emprego de faixas mais bem graduadas. Além disso, o controle granulométrico na produção em usina de tais misturas revela-se essencial para fins de atendimento da resistência de projeto.



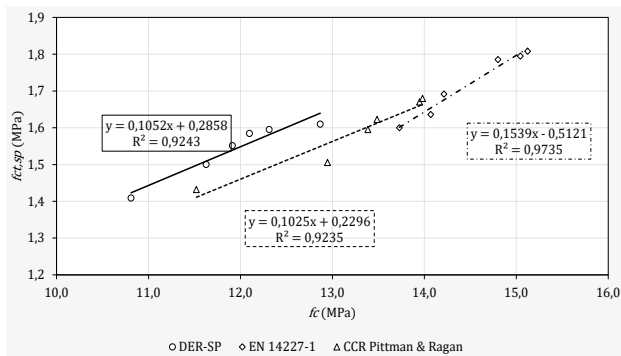
**FIGURA 19**

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES



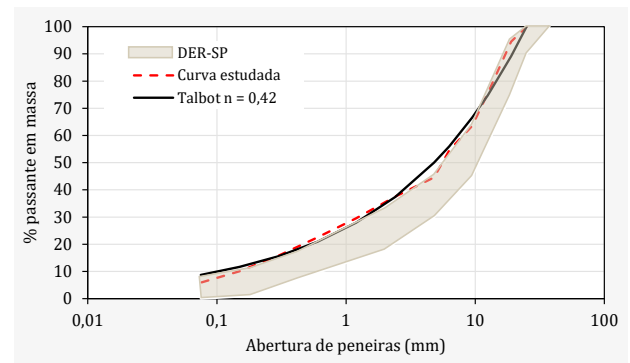
**FIGURA 20**

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA



**FIGURA 21**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA PARA DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS



**FIGURA 22**

AJUSTE DO COEFICIENTE DE TALBOT PARA LIMITE SUPERIOR DER-SP

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo avaliar os impactos de diferentes distribuições granulométricas na resistência de misturas de CCR (ou BGTC) produzidas com teor de cimento de 4% em peso (consumo de 95 kg/m<sup>3</sup>), ensejando as constatações e os comentários que se seguem:

- ▶ Apesar de receberem uma nomenclatura diferenciada, em função da escola que lhes deu origem, a BGTC (nomenclatura advinda da escola francesa) e o CCR (escola inglesa) são materiais similares, cujo procedimentos de dosagem e execução se assemelham; mesmo na escola francesa, uma das pioneiras na produção de misturas de britas estabilizadas com cimento, atualmente são empregadas misturas de BGTC com consumo de cimento entre 5 e 8%, aproximando-se definitivamente de CCRs;
- ▶ Considerando as curvas estudadas, as análises de variância e testes de hipóteses confirmaram para um nível de confiança de 95% que as distribuições granulométricas impactaram de forma significativa, tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração indireta (parâmetro de maior interesse no projeto estrutural de pavimentos); a curva média para a faixa de distribuição CBGM 2 (EN 14227-1) resultou em resistências de cerca de 20% e 10% maiores em compressão e tração indireta, respectivamente, em comparação às curvas DER-SP e CCR;
- ▶ A análise do coeficiente de Talbot (n) para as distribuições granulométricas estudadas confirmou que, de fato, a curva média para a faixa CBGM 2 da EN 14227-1 apresenta um melhor empacotamento (n = 0,45) em relação

às curvas do DER-SP (n = 0,42) e ACI (n = 0,33), corriqueiramente empregadas, lançando luzes sobre a necessidade de revisão das especificações granulométricas brasileiras

para misturas do tipo BGTC e CCR;

- ▶ Em última análise, destaca-se ainda a importância de se limitar a dimensão máxima dos agregados, de modo a facilitar o empacotamento das partículas

**TABELA 2**

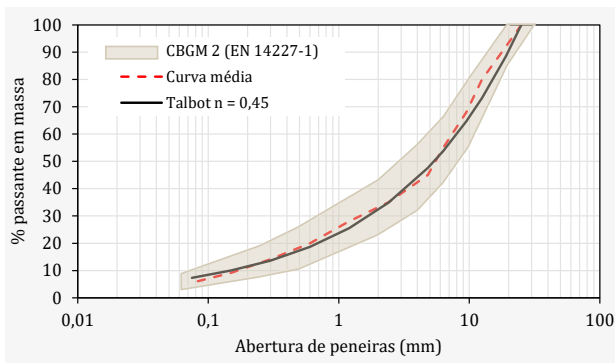
RESULTADO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Parâmetro estatístico	Compressão simples			Tração indireta		
	DER-SP	EN14227-1	USACE	DER-SP	EN14227-1	USACE
Número de CPs	6	6	6	6	6	6
Média (MPa)	11,94	14,50	13,21	1,54	1,72	1,58
Desvio padrão (MPa)	0,693	0,572	0,913	0,076	0,089	0,097
Variância	0,480	0,328	0,833	0,0057	0,0079	0,0094
F <sub>calculado</sub>	17,962			6,668		
F <sub>crítico</sub>	3,682			3,682		
Valor-P	1,04E-04			0,0084		

**TABELA 3**

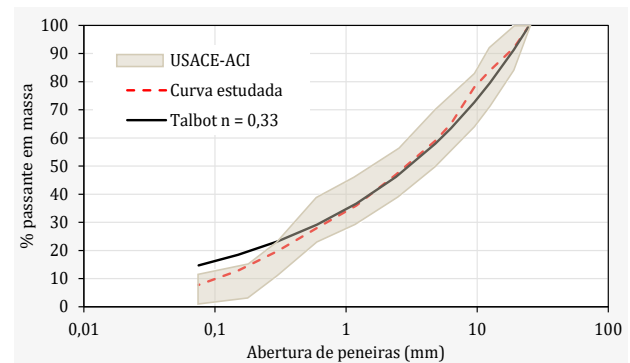
TESTES DE HIPÓTESE T-STUDENT PARA MÉDIAS DE DUAS AMOSTRAS

Parâmetro	DER-SP	EN14227-1	USACE	DER-SP	EN14227-1	USACE
<b>Compressão simples</b>						
Média	11,94	14,50	13,21	11,94	14,50	13,21
Variância	0,480	0,328	0,833	0,480	0,328	0,833
Stat t	6,976		2,723		2,922	
Valor-P	3,826E-05		0,0234		0,0192	
t <sub>crítico</sub>	2,228		2,262		2,306	
Resultado	Rejeita H0. Médias diferentes		Rejeita H0. Médias diferentes		Rejeita H0. Médias diferentes	
<b>Tração indireta</b>						
Média	1,54	1,72	1,58	1,54	1,72	1,58
Variância	0,00574	0,00797	0,00949	0,00574	0,00797	0,00949
Stat t	3,715		0,846		2,502	
Valor-P	0,00401		0,419		0,0313	
t <sub>crítico</sub>	2,228		2,621		2,228	
Resultado	Rejeita H0. Médias diferentes		Aceita H0. Médias iguais		Rejeita H0. Médias diferentes	



**FIGURA 23**

AJUSTE DO COEFICIENTE DE TALBOT PARA CURVA MÉDIA (CBGM2)



**FIGURA 24**

AJUSTE DO COEFICIENTE DE TALBOT PARA CURVA MÉDIA (USACE-ACI)

bem como o espalhamento e compactação do material em campo. No caso das misturas estudadas, a dimensão máxima foi limitada a 19 mm.

Como conclusão inevitável, tem-se que as faixas granulométricas apresentadas em especificações nacionais, como aquelas do DER-SP e da ABNT, necessitam revisão por não potencializar o ganho de resistência estática, que implica também em ganho de resistência à fadiga, dos materiais granulares

cimentados corriqueiramente empregados em rodovias e pistas de aeroportos nacionais. Ademais, as conclusões acima são válidas apenas considerando-se a energia de compactação modificada, que consiste no padrão adotado no exterior para materiais com consumo de cimento da ordem de 120 kg/m<sup>3</sup>, denotando a necessidade de revisão das normas brasileiras que recomendam a compactação de BGTC na energia intermediária.

Análises futuras sobre demais parâme-

tros relacionados à dosagem, propriedades mecânicas medidas em laboratório, bem como desempenho em campo, contribuirão para um melhor esclarecimento acerca do desempenho do material, ensejando recomendações práticas que contribuam para o desenvolvimento de projetos de bases cimentadas de pavimentos com um desempenho superior àquele que se tem registrado ao longo das últimas décadas em relação à BGTC no Brasil. ☹

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BALBO, J. T. Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos. Doutorado (Tese). Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [2] SETRA, Guide d'application des normes pour le reseau routier national. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1998.
- [3] ADASKA, W. S. Roller compacted concrete. PCA Research & Development Information, 2005. doi: 10.1201/9781420007657-25.
- [4] BRITPAVE, Guidelines for Design, Materials and Construction. BRITPAVE: The British Cementitious Paving Association, 2013.
- [5] ABOUABID, M.; CASEY, D.; JONES, M. Roller Compacted Concrete - Background to the Development of Highways England's Design Guidance and Specification. Highways England Specialist Professional and Technical Services, 2017.
- [6] HARRINGTON, D.; ABDO, F.; ADASKA, W.; HAZAREE, C. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, 2010. [Online]. Available: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1082276>
- [7] SHERWOOD, P. Soil stabilization with cement and lime: state of the art review. London: Transportation Research Laboratory (TRL), 1993.
- [8] XUAN, D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical properties of cement-treated aggregate material - A review. Materials and Design, vol. 33, no. 1, pp. 496-502, 2011. doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.055.
- [9] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, EN 14227-1: Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 1: Cement bound granular mixtures. Brussels, 2013.
- [10] PITTMAN D. W.; RAGAN, S. A. Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications, ACI Materials Journal, no. 95, pp. 19-26, 1998.
- [11] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER-SP, ET-DE-P00/009: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC, São Paulo, 2005.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- [13] FULLER W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers, pp. 67-143, 1907.
- [14] TALBOT, A. N.; RICHART, F. E. The strength of concrete its relation to the cement aggregates and water, Bulletin no. 137. Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1923.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- [16] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-ME 195/97: Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1997.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7222 - compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.