

FABRICAÇÃO DE SUB BASE DE PAVIMENTAÇÃO USANDO RESÍDUOS DA ARGILA CAULIM PROVINIENTE DO SEMIÁRIDO ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO

Sabrina Maia Sousa (1); Ana Cristina Silva Muniz (1); **Co-autor (2); Co-autor (3);** André Luiz Fiquene de Brito (4)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, maia.sabrina17@gmail.com

RESUMO

A busca por novas alternativas para o desenvolvimento das cidades com danos mínimos ao meio ambiente é de enorme interesse na sociedade atual e a construção civil pode ser muito útil como nicho para o descarte de resíduos sólidos através da incorporação desses em seus produtos. O presente trabalho teve o objetivo de minimizar os danos causados ao meio ambiente decorrente dos resíduos gerados da extração da argila caulim do semiárido da Paraíba, Nordeste do Brasil, a partir da fabricação de sub base para pavimentação usando os resíduos estabilizados por solidificação. O resíduo caulim foi classificado/caracterizado de acordo com o Método de Standard e o Protocolo de avaliação de materiais estabilizados por solidificação como classe I (perigoso) por conter concentrações consideráveis dos metais Alumínio (Al) e Chumbo (Pb). Realizou-se o planejamento fatorial 2x3 com 2 repetições, com os fatores tempo (7, 14 e 28 dias) e percentagem do resíduo (0% e 10%). Em seguida foi fabricado a sub base para pavimentação com cimento, brita, areia, água e a percentagem em massa do resíduo correspondente à massa do cimento. Finalmente, foram realizadas as avaliações de integridade e imobilização dos contaminantes. A incorporação do resíduo em massa cimentícia resultou na conversão do resíduo para classe II B (não perigosos e inerte). Conclui-se que a tecnologia de E/S para produção de sub base para pavimentação é uma alternativa de reciclagem do resíduo da argila caulim, sendo possível a sua incorporação em até 10%.

Palavras-chaves: Caulim, resíduo, estabilização por solidificação, pavimentação, semiárido.

INTRODUÇÃO

Nos estados do Rio Grande do Norte (RN) e da Paraíba (PB), em especial na região semiárida, ocorre a formação de uma grande variedade de substâncias minerais que a partir do seu aproveitamento constitui uma atividade importante na economia de vários municípios da região. Dentre os minerais explorados economicamente destaca-se o caulim que é uma argila constituída

por caulinita e silicato hidratado de alumínio, resultante da alteração do feldspato, e que geralmente apresenta uma coloração esbranquiçada.

O mineral pode ser utilizado na indústria cerâmica, na indústria de papel, na indústria de borracha, na fabricação de plásticos e tintas, abrasivos e tecidos, pesticidas e inseticidas e em sua forma secundária em produtos farmacêuticos e medicinais, alimentos, argamassas, fertilizantes, auxiliares de filtração, cosméticos, lápis colorido e esmaltes cerâmicos. (INSA, 2013)

Seja no setor produtivo, no de serviços ou no de consumo, a geração de resíduos acontece em todos os setores da sociedade e ainda não pode ser eliminada completamente. A indústria de caulim é uma das que mais se destacam na produção de resíduos sólidos industriais em virtude do elevado volume do não aproveitamento da sua matéria-prima, como também apresenta-se como gerador de resíduo de excelente alternativa para a reciclagem a partir de sua incorporação em até 50% de massa nas formulações cimentícias de materiais destinados à construção civil.

Nas últimas décadas, as restrições quanto ao uso do solo para disposição final de resíduos, principalmente aqueles considerados perigosos ou contaminantes com altas concentrações de metais, tem se tornado cada vez mais severa, requerendo que as empresas destinem aos resíduos tratamentos seguros e eficazes, como é o caso do resíduo de caulim que possui em sua composição alta concentração do metal alumínio que ultrapassa o limite máximo permissível. (NÓBREGA *et al.*, 2004)

Analisando a composição química do resíduo de caulim, Mota *et al.* (2006) e Rezende *et al.* (2008) encontraram concentrações de Silício (Si), Alumínio (Al) e Ferro (Fe) acima dos limites máximos permissíveis, que são provenientes da composição de sua argila bruta que possui um teor considerável de alumina (16,46%) e óxido de ferro (6,68%), caracterizando o resíduo como perigoso (Classe I), conforme a NBR 10004.

Assim, a tecnologia de Estabilização por Solidificação (E/S), segundo EPA (2000) e Spence & Shi (2005), empregada há aproximadamente 60 anos, é impulsionada pela necessidade de melhorar o manuseio do resíduo, reduzir a área superficial e a mobilidade do contaminante no solo por lixiviação e solubilização, transformando o material em um bloco monolítico de alta resistência e durabilidade com resíduos não perigosos ou inertes. (BRITO *et al.* 2002).

Materiais cimentícios para sub base de pavimentação pode ser fabricado utilizando a tecnologia de estabilização por solidificação (E/S), desde que tenha características físicas e ambientais consideradas seguras, como homogeneidade, compacticidade, ausência de defeitos que

possam prejudicar o seu assentamento, durabilidade, resistência à compressão, lixiviação e a não emissão dos poluentes presentes nos resíduos. (MALVIYA & CHAUDHARY, 2006).

Reflexos econômicos e sociais positivos para a indústria geradora de resíduos e para a indústria de pavimentos podem ser destacados por apresentar uma nova alternativa de disposição final de resíduos. O setor da construção civil se apresenta como um promissor consumidor e agregador de valor a resíduos indesejáveis gerados não apenas pela própria indústria de construção, mas também por outros setores produtivos.

O presente trabalho tem como objetivo a fabricação de sub base cimentícia para pavimentação a partir da tecnologia de Estabilização por Solidificação (E/S) para o tratamento do resíduo de caulim, classificados como Classe I conforme a NBR 10004, por possuir metais de Alumínio (Al) e Chumbo (Pb) com concentrações acima do limite máximo permissível. Analisa-se então, a viabilidade do uso de sub base cimentícia a partir da análise de características ambientais e físicas.

METODOLOGIA

Etapa 1: Caracterização e Classificação dos Materiais e Blocos:

A Tabela 1 mostra resumidamente os ensaios realizados nesta pesquisa.

TABELA 1 – Ensaio e Descrição das Análises

Ensaio	Descrição	Referencia
Umidade	Método gravimétrico: Avaliar Umidade das amostras	Standard Methods (1998)
Sólidos Totais	Método gravimétrico: Avaliar a matéria seca das amostras	Standard Methods (1998)
pH	Método eletro métrico: Avaliar acidez do material E/S	Standard Methods (1998)
Absorção de Água (CAA)	Método gravimétrico: Avaliar a durabilidade dos Materiais E/S	ABNT NBR 9.778 (1998).
Umificação/Secagem (U/S)	Método gravimétrico: Avaliar a durabilidade	WTC (1991).
Resistência à Compressão	Método da compressão: Avaliar a integridade dos Materiais E/S	ABNT NBR 7215 (1997)
Lixiviação	Método de Extração – Avaliar a estabilidade química dos resíduos E/S	ABNT NBR 10.004(2004 _a); ABNT NBR 10.005(2004 _b)
Solubilização	Método de Extração – Avaliar a solubilidade em água dos resíduos E/S	ABNT NBR 10.006(2004 _c)

Fonte: BRITO (2007); BRITO e SOARES(2009).

Etapa 2: Planejamento Experimental: Fatorial 2x3 e 2 réplicas:

Adotou-se o planejamento fatorial 2x3 com 2 repetições. Usou-se os fatores: Percentagem de resíduo (%) e tempo de cura (dias). Com objetivo de verificar se os fatores exercem influência na resistência à compressão, na imobilização dos contaminantes e se há interação entre eles.

O número total de ensaios para os blocos para pavimentação com o resíduo sólido do caulim e granito foram: $F_1 \times F_2 \times 2$ réplicas ou $2 \times 3 \times 2$, totalizando 12 ensaios, conforme mostra a Equação 1:

$$n = F_1 \times F_2 \times 2 \text{ rep.} \quad (1)$$

Em que: n : Número de ensaios; F_1 : Fator percentagem; F_2 : Fator tempo de cura; rep: Réplicas.

Análise Estatística (ANOVA):

Para verificar a validação do modelo, checar as respostas e verificar se existem efeitos significativos entre os fatores, foi realizada a Análise de Variância (Analysis of Variance: ANOVA).

A Tabela 2 mostra a saída do software (MINITAB® 17, 2014).

Fonte de Variação	g.l	Soma Quadrática	Quadrado Médio	Valor $p^{1 e 2}$
Modelo Regressão	p-1	SQ reg	SQreg/p-1	$p \leq 0,05^1$ ou $p > 0,05^2$
Fatores	n-m	SQr	SQr/n-m	$p \leq 0,05^1$ ou $p > 0,05^2$
Interação	m-p	SQfaj	SQfaj/m-p	$p \leq 0,05^1$ ou $p > 0,05^2$
Erro Puro	n-m	SQep	SQep/n-m	
Total	n-1	SQt	SQt/n-1	

TABELA 2 - Análise de variância (ANOVA) do Fatorial $F_1 \times F_2$ e 2 réplicas

Legenda: n: Número de experimentos; p: Número de coeficientes; m: Número de experimentos distintos; g.l : Graus de Liberdade; SQ : Soma Quadrática; Valor p^1 : Significativamente diferente ($p \leq 0,05$); Valor p^2 : Não significativo ($p > 0,05$). Fonte: MYERS & MONTGOMERY (1995); MONTGOMERY & RUNGER(2009) e MINITAB® 17.0 2014).

A ANOVA testa se os termos do modelo têm algum efeito na resposta. Será aplicado o valor de P , para comparar as médias dos fatores: percentagem (%) e tempo de cura (dias). O nível de significância adotado para validar o teste P foi $\alpha = 0,05$.

1. Se o valor de P for $\leq 0,05$, as médias dos fatores ou interação são diferentes (há efeito das variáveis controláveis na variável resposta).
2. Se o valor de $P > 0,05$, as médias dos fatores ou interação não são diferentes (não há efeito das variáveis controláveis na variável resposta).

Modelos: Planejamento Fatorial e Ponto Ótimo (Estacionário):

Se a resposta for modelada por uma função linear das variáveis independentes, a função de aproximação será de 1ª ordem (Equação 2):

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2)$$

O ponto ótimo será calculado quando for encontrado os níveis de x_1, x_2, \dots, x_k , que maximizam ou minimizam a resposta estimada (predita). Este ponto, se existir, será um conjunto de x_1, x_2, \dots, x_k para o qual as derivadas parciais são iguais a zero (Equação 3):

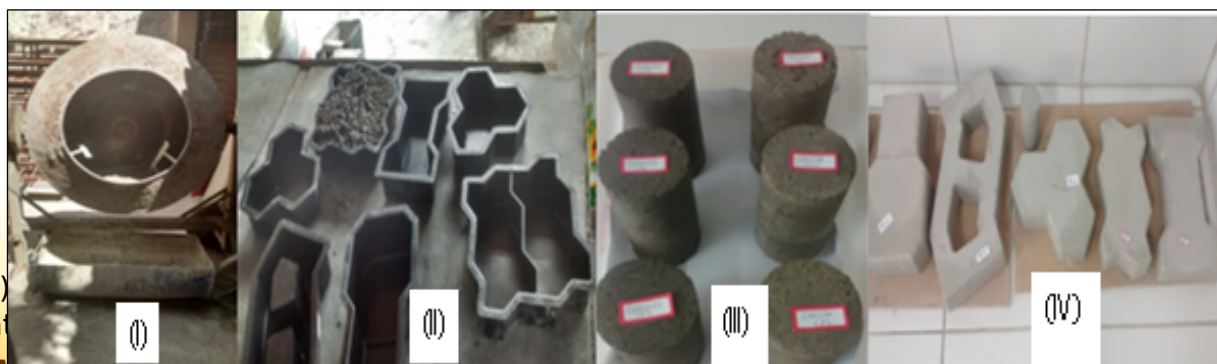
$$\partial \hat{y} / \partial x_1 = \partial \hat{y} / \partial x_2 = \dots = \partial \hat{y} / \partial x_k = 0 \quad (3)$$

Etapa 3: Confeção dos Materiais a serem Estabilizados por Solidificação (BRITO e SOARES, 2009; BRITO, 2007):

Inicialmente foram confeccionados corpos de prova com massa igual a 450 g (caulim e cimento+brita+areia) com diferentes percentagens de RSI e tempos de cura. O objetivo foi escolher os melhores resultados para fabricação dos blocos para pavimentação. Definiu-se o traço de 1:5 e pesaram-se os aglomerantes (cimento Portland, areia e pedra britada) separadamente em uma balança com precisão de 0,01g. A Figura 1 mostra resumidamente a confecção dos materiais.

- i) O resíduo sólido industrial (caulim) e os aglomerantes foram colocados numa betoneira, visando obter uma massa homogênea. Iniciou-se a contagem do tempo de preparação dos materiais a partir do momento em que a água foi adicionada à mistura (Fig. 1 I);
- ii) Colocaram-se as composições no interior dos moldes sobre uma mesa de vibro prensagem para comprimir a mistura e evitar a formação de vazios (Fig. 1 II);
- iii) Deixou-se em repouso por 24 horas para endurecimento da pasta (Fig. 1 III);
- iv) Os materiais foram condicionados ao ar livre por um tempo de 28 dias de cura (Fig. 1 IV).

IMAGEM 1 - Fabricação dos Blocos Para Pavimentação



Etapa 4: Avaliação dos Materiais Estabilizados Por solidificação

Os materiais estabilizados por solidificação foram avaliados aplicando o Protocolo de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação (BRITO, 2007) e as análises foram executadas conforme: ABNT NBR 9.778 (1998); ABNT NBR 9.778 (1998); WTC (1991); ABNT NBR 7215 (1997); ABNT NBR 10.004(2004_a); ABNT NBR 10.005(2004_b) e ABNT NBR 10.006(2004_c).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização e Classificação dos Materiais:

As Tabelas 3 mostra os resultados obtidos do ensaio de lixiviação e solubilização do resíduo sólido industrial caulim.

TABELA 3 - Classificação: Lixiviação e Solubilização do Resíduo Sólido Industrial: Caulim

Elemento	Lixiviação (mg.L ⁻¹)	L.M.P (mg.L ⁻¹)	Solubilização (mg.L ⁻¹)	L.M.P (mg.L ⁻¹)
Cádmio	0,011	0,5	< 0,01	0,005
Manganês	0,250	10	< 0,01	0,1
Chumbo¹	0,460	1,0	0,02	0,01
Alumínio¹	0,390	n. e ²	0,67	0,2
		0,2 ³		
Cromo	0,014	0,5	<0,01	0,05
Ferro	0,110	30	0,086	0,3

Legenda:¹: Elemento Avaliado no Ensaio de Classificação; LMP: Limite Máximo Permissível; n.e:² Não especificado pela ABNT NBR 10.004(2004_a); ³: Portaria do Ministério da Saúde (MS) N°. 2914/2011. Fonte: Dados da pesquisa.

Para ser classificado como perigoso, o resíduo deve apresentar no mínimo um dos seus constituintes acima do LMP. Na Tabela 3 e em relação ao metal chumbo (Pb), o ensaio de lixiviação mostrou um valor de chumbo (0,460 mg.L⁻¹) abaixo do valor recomendado (1,0mg.L⁻¹). Mota *et.al.* (2013), dizem que as altas concentrações do metal Chumbo (Pb) são devidas às características de solo ou contaminantes da localidade onde a argila foi produzida. Por outro lado, o resíduo de caulim utilizado foi classificado como classe I (perigoso), devido à presença do elemento alumínio (Al). Vale destacar que a norma da ABNT NBR 10.004(2004) não estipula valor para o alumínio para o ensaio de lixiviação. Neste caso, recorre-se à Portaria do Ministério da Saúde (MS) N°. 2914/2011 que recomenda 0,2 mg.L⁻¹. Neste trabalho foi adotado 0,2 mg.L⁻¹ como o limite máximo permissível

para classificar em mg.L^{-1} o resíduo perigoso contendo Alumínio, logo o resíduo sólido industrial a base de caulim foi classificado como classe I, perigoso.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos na determinação dos seguintes parâmetros: teor de umidade, as frações de sólidos e o pH. Os ensaios foram realizados em triplicata. Os resultados mostrados a seguir correspondem às médias.

TABELA 4 - Caracterização dos resíduos de Caulim aritméticas

Parâmetros	Teor de umidade (%)	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (%)	Sólidos fixos (%)	pH
Resíduo de Caulim	9,43	90,57	7,011	92,991	6,26

1: Valor em Relação ao teor de Sólidos Totais. Fonte: Dados da pesquisa

Verifica-se na Tabela 4 que o resíduo de caulim tem um teor pequeno de umidade o que favorece o seu uso em matrizes cimentíceas e aplicações em geral dentro da construção civil, quanto ao quesito de integridade do material ou aplicação na qual se pretende sua incorporação.

Ensaio de Umidificação/Secagem e Capacidade de Absorção de Água: Caulim

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados do ensaio de umidificação/ secagem e capacidade de absorção de água dos materiais E/S contendo caulim.

TABELA 5 – Resultados: U/S e CAA: Caulim

(%)	0	10	40	0	10	40	0	10	40	0	10	40
Caulim												
Tempo (dias)	7	7	7	28	28	28	7	7	7	28	28	28
U/S - Caulim(%)	0,68	1,3	1,62	1,46	1,4	1,66	0,7	1,33	1,65	1,44	1,35	1,62
CAA -Caulim(%)	10,76	12,18	19,4	10,48	12,82	19,49	10,58	12,25	19,34	10,61	12,65	19,47

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 5 verificou-se que os materiais produzidos com caulim que adquiriram menor absorção de água foram as amostras que continham 10% do RSI e 7 dias de cura. Os materiais confeccionados que adquiriram menor teor de umidificação e secagem foram os que continham 10% do RSI e que possuíam 7 dias de cura (0,68%).

Avaliação dos Contaminantes: Alumínio, Chumbo

A Tabela 6 apresenta os resultados da concentração de metais de Alumínio (Al) e Chumbo (Pb) no resíduo contendo caulim.

Foram usados 0% em massa de RSI em relação ao cimento, 10% RSI de caulim em diferentes tempos de cura (7,14 e 28 dias).

TABELA 6 - Teor de Contaminantes: Blocos de Pavimentação

Tempo de Cura (dias)	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
(%)	0	0	0	10	10	10	0	0	0	10	10	10
Caulim												
[Al] ¹ (mg.L ⁻¹)	0,25	1,38	1,07	0,78	0,99	1,43	0,58	0,62	1,04	0,9	0,92	0,01
[Pb] ² (mg.L ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,028	0,032	0,01	0,01	0,01	0,12

Legenda: ¹: LMP = 0,2 mg.L⁻¹ para Alumínio; ²: 0,01 mg.L⁻¹ para Chumbo; ³: 0,1 mg.L⁻¹ para Manganês; RSI: Resíduo Sólido Industrial.

Os limites máximos permissíveis para os elementos são 0,2 mg.L⁻¹ para Alumínio (Al); 0,01 mg.L⁻¹ para Chumbo (Pb). Em se tratando do resíduo de caulim, se o valor obtido for maior que o LMP, o material E/S será classificado como Classe II A. Na Tabela 6, pode se constatar que os materiais estabilizados por solidificação foram convertidos de classe I (perigoso) para não perigoso Classe II A (perigoso e não inerte).

TABELA 7 - Análise de Variância (ANOVA): Contaminantes: Caulim

Fonte de Variação	Valor de P - [Al] RSI Caulim	Valor de P - [Pb] RSI Caulim
Fator Percentual	0,958 > 0,05 ^{NS}	0,560 > 0,05 ^{NS}
Fator Tempo de Cura	0,587 > 0,05 ^{NS}	0,565 > 0,05 ^{NS}
Interação dos fatores	0,556 > 0,05 ^{NS}	0,337 > 0,05 ^{NS}

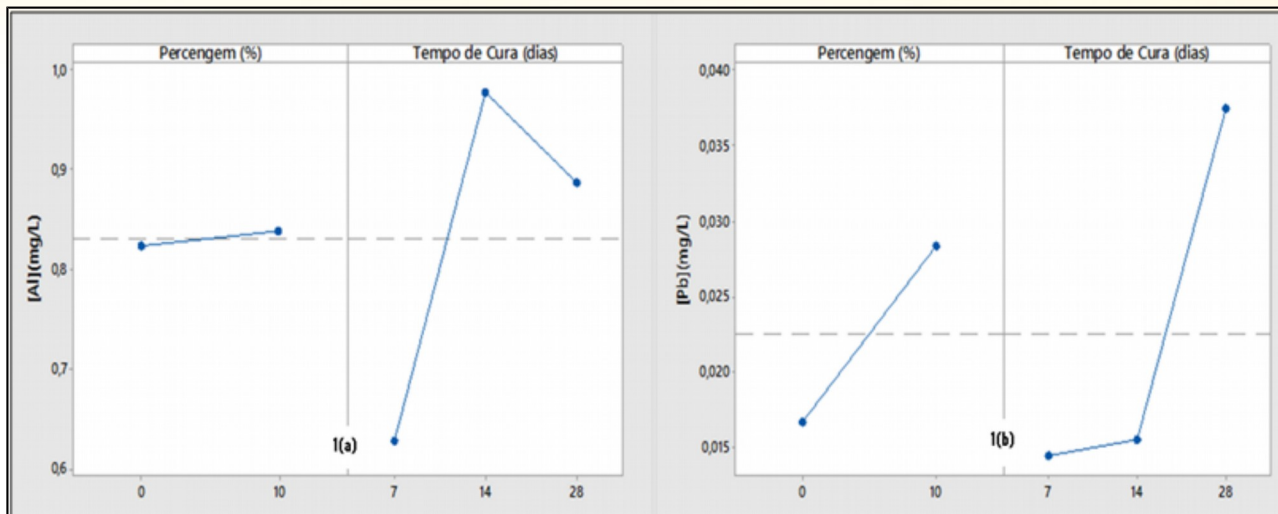
Legenda: ^{NS}: Não Significativo; ND: Não detectado pelo AAS (valor menor que o limite de detecção para o Mn: 0,01)

Fonte: Autor, 2016

Na Tabela 7 o resultado da ANOVA mostra que os fatores percentuais de resíduo e o fator tempo de cura, além da interação dos fatores não são significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro (valores de p > 0,05 NS). Isso significa que a presença de resíduo na composição dos blocos para pavimentação não influenciara na resposta: alumínio, chumbo.

O Gráfico 1 mostra os valores dos metais analisados. As menores concentrações dos metais são obtidas quando não há presença do RSI caulim (0%) e com o menor tempo de cura (7 dias).

GRÁFICO 1 - Comportamento do teor de metais nos RSI Caulim: Alumínio e Chumbo



Fonte: Autor, 2016.

No Gráfico 1_(a) quando o percentual de caulim foi 0%, o teor de alumínio foi menor quando comparado com 10%. Com relação ao alumínio (Gráfico 1_(a)) e avaliando o tempo de cura observa-se que com 7 dias a concentração foi menor em comparação com 14 e 28 dias. Para o alumínio com 28 dias o valor deste contaminante foi menor quando comparado com 14 dias. Para o chumbo presente no material E/S com caulim (Gráfico 1_(b)) o comportamento foi o mesmo para o alumínio quando se avalia o percentual de caulim (menor teor para 0%).

Por outro lado, quando se avalia o tempo de cura, o comportamento do teor para 7 dias foi similar ao do alumínio, porém, quando se compara com 14 e 28 dias, observa-se que com 14 dias, o teor de chumbo para 14 dias foi menor em comparação com 28 dias.

Resistência à Compressão dos Blocos para Pavimentação

O ensaio de resistência à compressão avalia a integridade do material. O material fabricado nesta pesquisa tem o seu uso no setor da construção civil na área de pavimentos.

Neste caso, os valores mínimos permissíveis (MPa) para o uso de materiais como sub base para pavimentos são os seguintes: a) Base de solo melhorado com cimento: 7 dias: < 2,1 MPa; b) Base de solo-cimento: 7 dias: Entre 1,4 a 2,1 MPa; c) Brita tratada com Cimento: Entre 3,5 a 5 MPa e e) Base pobre em concreto: Entre 3,0 a 7 MPa.

A sub base para pavimentos é uma camada delgada com as seguintes funções: i) uniformizar e tornar razoavelmente constante o suporte disponível ao longo na faixa de disponível; ii) evitar efeitos das mudanças excessivas de volume dos solos e subleito e iii) eliminar fenômeno de

ocorrência de bombeamento de finos plásticos presentes no solo de fundação quando de água em excesso e cargas pesadas.

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises de resistência à compressão dos blocos para pavimentação confeccionados com 0% em massa de RSI em relação ao cimento, 10% de massa do RSI de caulim com diferentes tempos de cura, variando entre 7, 14 e 28 dias.

TABELA 8 - Resistência à Compressão: Blocos de Pavimentação (MPa)

Exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tempo de Cura	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
(%)Caulim RSI	0	0	0	10	10	10	0	0	0	10	10	10
RC (MPa)	13,9	13,71	20,85	10,75	10,02	15,13	14,27	12,53	17,22	12,48	10,19	15,81

Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 9 que melhor resultado de resistência à compressão foi obtido quando não há presença do RSI caulim (0%) e com o tempo de cura de 28 dias, com 20,85 MPa. Para 10% de caulim, foi obtida uma resistência à compressão aproximadamente 12,5 MPa.

A partir dos resultados de resistência à compressão dos blocos de pavimentação podemos verificar se há interação entre os fatores de percentagem e tempo de cura, se são significativos na análise e, com a modelagem, poder encontrar o ponto ótimo da resposta estudada (percentagem em massa do RSI caulim e o melhor tempo de cura). A Tabela 9 mostra a ANOVA para o resultado de resistência à compressão dos blocos para pavimentação com resíduo de caulim.

TABELA 9 - Análise de Variância (ANOVA): RC - Blocos E/S – Caulim

Fonte de Variação	g.l	Soma Quadrática	Quadrado Médio	Valor de F	Valor de P
Percentual de Lodo	1	27,323	27,323	18,08	0,005<0,05 ^{SIG}
Tempo de Cura	2	70,399	35,199	23,29	0,002<0,05 ^{SIG}
Interação dos fatores	2	0,604	0,302	0,20	0,826>0,05 ^{NS}
Erro	6	9,070	1,5116	-	-
Total	11	-	-	-	-
$R^2 = 84,52\%$		$R^2_{max} = 91,55\%$			

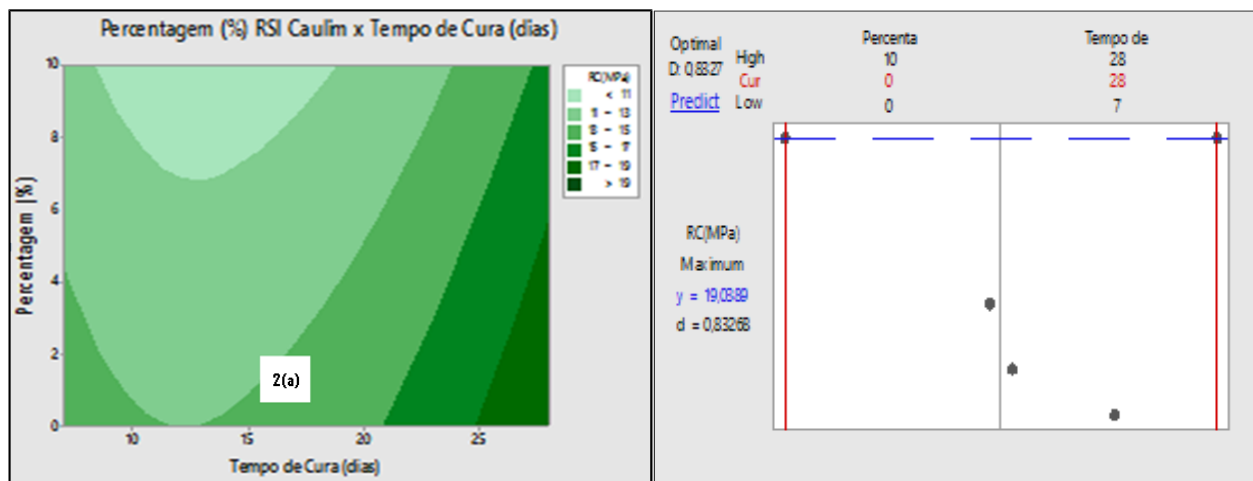
Legenda: R^2 : Coeficiente de determinação; R^2_{max} : Explicação do Modelo; g.l: Graus de liberdade; ^{SIG}: Significativo; ^{NS}: Não significativa. Fonte: Autor, (2016)

Na Tabela 9, o resultado mostra que o fator percentual (*valor de $p=0,005$*) e o fator tempo de cura (*valor de $p=0,002$*) são significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Significa que a presença de caulim na composição dos blocos para pavimentação e o tempo de cura influenciaram na resposta, mas não houve influência na interação entre os fatores (*valor de $p=0,826$*). O modelo obtido para RC (MPa) apresenta-se na Equação 4 conforme a ANOVA, apenas a interação não foi significativa.

$$RC_{\text{caulim}} \text{ (MPa)} = 13,905 - 1,509 \text{ Percentagem (\%)} - 2,295 \text{ Tempo de Cura (dias)} \quad (4)$$

O Gráfico 2 mostra os efeitos significativos para a resistência à compressão dos blocos para pavimentação com RSI caulim. Com a Equação 4, pode-se avaliar o gráfico 2_a. Para otimizar a resposta da resistência à compressão nos blocos para pavimentação analisa-se o Gráfico 2_b.

Gráfico 2. Gráfico de contorno e Otimização para RC: Percentagem (%) e Tempo de Cura (dias)



Fonte: Autor, 2016.

No Gráfico 2_a foi encontrado as curvas de contorno para os blocos com RSI Caulim que mostram que o melhor resultado encontra-se na região inferior do lado direito. O valor é obtido quando sua composição varia entre 0% e 5% em massa em relação à massa do cimento e com um tempo de cura além de 25 dias. Com a modelagem pode-se afirmar que a região está nos valores maiores que 19 MPa de resistência a compressão.

Embora os melhores resultados de resistência à compressão sejam os dos blocos com baixa percentagem de RSI em sua composição, há a observância de que para todos os blocos fabricados e analisados, apresentaram resistência maior do que 11 MPa.

No gráfico 2_b analisa-se e confirma-se que o ponto ótimo é obtido quando a RC é 19,04 MPa (0% de RSI e o tempo de cura de 28 dias).

CONCLUSÃO

1. Os resíduos sólidos contendo caulim foram classificados como Classe I, perigoso. Após a incorporação de caulim em massa cimentícia, os materiais obtidos para sub base para pavimentação foram convertidos num material não perigoso classe II B e inerte.
2. Os blocos estabilizados por solidificação apresentaram boa integridade e os metais foram imobilizados tornando-os menos agressivo ao meio ambiente;
3. Conclui-se também que a E/S do resíduo para sub-base de pavimentos e pavimentos é uma excelente alternativa para a reciclagem do resíduo de caulim, sendo possível a incorporação de até 10% de caulim em formulações cimentícias para a produção de tais blocos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004 – Norma Brasileira Classificação de Resíduos Sólidos – Classificação*. CENWin, 2004.
- BRITO, ALF de; MUNIZ, A. C. S.; LOPES, W. L.; LEITE, V. D. PRASSAD. S. **Processo de Codisposição de Resíduos Sólidos de Curtume**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol. 7 – n. 3 e 4, p.144-150, 2002
- MALVIYA R, CHAUDHARY R. **Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: a review**. J Hazard Mater, 2006
- MINITAB INC. STATISTICAL SOFTWARE–Data **Analysis Software**. Version 17, 2014.
- MONTGOMERY, Douglas C. e RUNGER, George C., **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros** 4ª Edição LTC Editora São Paulo 2009.
- MOTA J. D., et al., **Aproveitamento dos resíduos de granito e caulim como materiais aditivos na produção de tijolos ecológicos**, Universidade Federal de Campina Grande, 2013
- NÓBREGA, L. M; ROSA, N. M. G. S; CAMPOS, L. E.P; SOARES, J. B; **Avaliação Ambiental de Escória de Ferro liga Aplicada em Revestimentos de Pavimentos**. 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba, Brasil, 2005
- REZENDE, M. L. *et al.*, **Utilização do Resíduo de Caulim em Blocos de Vedação**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 2008.
- SPENCE, R. D.; SHI, C. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes**. Boca Raton, Florida. Ed. CRC Press. 378p. 2005
- WASTEWATER TECHNOLOGY CENTER – WTC-EC-EPS-3/HÁ/9. **Proposed evaluation protocol for cement based stabilization/solidification wastes**. Canadá: Environment Canada, 1991.

