

## ARTICULO DE INVESTIGACION

# Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira

## Use the residue of *Pinus* spp, high reactivity metakaolin and residue of ceramic calcined in wood-cement composites

Adauto José Miranda de Lima<sup>1</sup>, Setsuo Iwakiri<sup>2</sup>  
y María Guadalupe Lomelí-Ramírez<sup>3</sup>

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada, em compósitos cimento-madeira. As características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão e a tração) dos compósitos, foram determinadas conforme normas da ABNT. Foram testadas substituições do cimento Portland por teores de 5% a 40% de metacaulim de alta reatividade e 5% a 40% de resíduo de cerâmica calcinada. Em ambos casos foram utilizados, aditivos químicos ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para acelerar a pega do cimento e superplastificante, a fim de manter inalteradas as características reológicas do compósito. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da utilização do resíduo de *Pinus* spp. e das substituições parciais do cimento Portland dos compósitos. Os valores otimizados destas substituições foram determinados através de análise multivariada, sendo de 10% para o metacaulim de alta reatividade e de 5% para o resíduo de cerâmica calcinada.

### PALAVRAS-CHAVE:

Compósito cimento-madeira, *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade, resíduo de cerâmica calcinada.

### ABSTRACT

This research was developed with the objective of evaluating the potential use of residues of the production of sown *Pinus* spp wood and partial substitutions of Portland cement for high performance metakaolin and residue of calcined ceramic in cement-wood composites. The evaluation of the physical characteristics (specific mass, porosity and water absorption) and mechanics characteristics (compression and traction resistances) of the composites were determined in agreement with the ABNT standards. The levels of substitution to the Portland cement for 5% to 40% of high performance metakaolin and 5% to 40% of residue of calcined ceramic. In both cases additive chemicals ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) to speed up the cure of the cement were used and super-plasticizer to maintain without altering the rheological characteristics

1 Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR, Curitiba, PR, Brasil – adautojm@utfpr.edu.br

2 Depto. de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR, Curitiba, PR, Brasil – setsuo@ufpr.br

3 Depto. de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR, Curitiba, PR, Brasil – glomeli12@hotmail.com

of the composite. The results demonstrated the technical viability to the use of the residue of *Pinus spp* and the for substitutions of the cement Portland in composites, and the optimized levels, obtained through multivariate statistical analysis, were 10% of high performance metakaolin and 5% of residue of calcined ceramic.

**KEYWORDS:**

Cement-wood composites, *Pinus spp.*, high performance metakaolin, residue of calcined ceramic.

**RESUMEN**

Utilización de residuos de *Pinus spp*, metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada en compuestos madera-cemento. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el uso potencial del residuo de aserrío de trozas de *Pinus spp.* y de sustituciones parciales de cemento Portland por metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada, en compósitos cemento-madera. Las características físicas (densidad, índice de poros y la absorción de agua) y mecánicas (resistencia a la compresión y a tracción) de los compuestos se determinaron con base en las normas ABNT. Fueron evaluadas sustituciones de cemento Portland por niveles de 5% a 40% de metacaolín de alta reactividad y 5% a 40% de residuo de cerámica calcinada. En ambos casos se utilizaron aditivos químicos ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para acelerar la cura del cemento y superplastificante para mantener inalteradas las características reológicas del compuesto. Los resultados demostraron viabilidad técnica de la utilización del residuo de *Pinus spp.* y de las sustituciones del cemento Portland en el compósito. Los valores optimizados fueron determinados a través de análisis multivariado, siendo de 10% de metacaolín de alta reactividad y 5% de residuo de cerámica calcinada.

**PALABRAS CLAVE:**

Compuestos cemento-madera, *Pinus spp.*, metacaolín de alta reactividad, residuo de cerámica calcinada.

**INTRODUÇÃO**

A viabilidade da produção de compósitos produzidos com fibras e/ou partículas naturais vem sendo pesquisada há décadas, possuindo uma longa história de aceitação e aplicação na construção civil, especialmente na Europa e Ásia.

De acordo com Semple e Evans (2004) e Moslemi (1989), os materiais produzidos com compósitos cimento-madeira apresentam uma série de vantagens, entre as quais podem ser citadas: disponibilidade de matéria prima em grandes quantidades, baixa massa específica, o que permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas, elementos de vedação e de alvenaria. Além destes atributos, os materiais podem ser serrados, furados, receber parafusos e tintas.

Além dessas vantagens, os materiais produzidos com compósitos cimento-madeira não emitem resíduos tóxicos durante a sua manufatura (Van Elten, 2000 apud Semple e Evans, 2004), não necessitam de tratamentos preservativos, apresentam menor dispêndio de energia no processo de produção (Moslemi, 1989), inclusive se tornando uma alternativa viável aos fibrocimentos que utilizam asbesto (amianto), principalmente na Europa, Japão e América do Norte (Moslemi, 1989).

O gênero *Pinus spp.*, da família *Pinaceae* é composto por plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura variável, sendo que algumas espécies de *Pinus* se incluem entre as árvores mais utilizadas no mundo (Lima *et al.*, 1988; Morais *et al.*, 2005).

As madeiras pertencentes ao gênero *Pinus spp.* fornecem material de boa qualidade para a produção de celulose,

além de apresentar características tecnológicas adequadas para seu aproveitamento em serraria. Durante as etapas do processamento mecânico da madeira se produz grande quantidade de resíduos que, de acordo com Nahuz (2004), até o momento, não têm recebido a devida valorização.

O incremento na produção de madeira de *Pinus* spp. pode ser constatado na base de dados da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009), onde se verifica uma produção de toras de *Pinus* spp., em 2007, de 50,6 milhões de metros cúbicos, contra 42 milhões de metros cúbicos em 1997. Portanto, um acréscimo de produção de 20,48% no período de dez anos.

Sob esta ótica, a geração de resíduos florestais no Brasil também atinge valores expressivos, pois segundo a ABIMCI (2009) só a produção de madeira serrada em 2008 alcançou o montante de 22,886 milhões de metros cúbicos. Inferindo sobre este valor, o potencial de perdas, que conforme Freitas (2000) pode atingir até 60%, deduz-se que um valor significativo de resíduos florestais foi produzido naquele ano.

Dentre os resíduos de outras atividades industriais, alguns como a cinza volante e a escória de alto-forno, apresentam propriedades que permitem o uso como substituintes ao cimento Portland, cuja produção, conforme Oliveira (2008) é responsável por 7% das emissões de CO<sub>2</sub> no planeta.

A capacidade dos materiais cimentícios alternativos em reagir com o Ca(OH)<sub>2</sub>, também conhecida como atividade pozolânica, é propriedade fundamental para a sua utilização. Esta reação resulta na formação de compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os

silicatos e os aluminatos de cálcio hidratado, que são os principais elementos responsáveis pela resistência das pastas hidratadas de cimento (Carmo, 2006). Esta reação, por se dar a temperatura ambiente, é geralmente lenta e pode levar meses para ser completada, entretanto, quanto mais vítrea e mais fina for a pozolana, mais rápida será a reação com o Ca(OH)<sub>2</sub> do cimento.

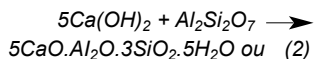
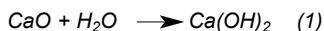
John e Agopyan (1993) afirmam que o emprego de materiais cimentícios alternativos pode colaborar para um aumento da durabilidade de compósitos com fibras ou partículas vegetais. Com o consumo de parte do Ca(OH)<sub>2</sub> que está concentrado na zona de transição, ocorre a melhora da aderência entre fibra e matriz. De acordo com Lange *et al.* (1989), a redução do pH da solução em função desta combinação dos íons Ca<sup>2+</sup>, torna a matriz menos sensível aos efeitos inibitórios da madeira.

O metacaulim, também denominado metacaulim de alta reatividade, é originado da calcinação da caulinita de alta pureza - Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - que é essencialmente um silicato de alumínio hidratado, que após sua calcinação perde a maioria dos radicais OH<sup>-</sup> e passa a ser um silicato de alumínio desidratado, no estado amorfo, passando em seguida por um processo de moagem altamente eficiente, conferindo elevada área superficial às partículas (Rocha e Vasconcelos, 2006).

Segundo Zampieri (1989), as reações pozolânicas entre o metacaulim e o Ca(OH)<sub>2</sub> são, em essência, reações de dissolução e formação de novas fases. O metacaulim, principalmente devido ao grande desordenamento atômico oriundo do tratamento térmico, ao entrar em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland, provoca a dissolução do silício e do alumínio na superfície de suas partí-

culas, que, posteriormente, reagem com o excesso de cálcio existente, cristalizando em aluminatos, silicatos e alumino-silicatos de cálcio hidratado.

As reações químicas iniciam normalmente após o fim de pega do cimento e só cessam quando todo o metacaulim da mistura reagir com o CaO livre da matriz, de acordo com a seguinte expressão:



CASH (cristais de *genelita*)  
+ CSH (*portlandita*)

O Brasil respondeu em 2007 por 6,8% da produção mundial de caulim, com 2,52 milhões de toneladas, sendo a região norte do país, responsável por 80% da produção nacional (DNPM, 2009).

A utilização de argilas ativadas termicamente (argilas calcinadas) em argamassas e concretos tem recebido considerável atenção nos últimos anos, devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que esses materiais podem promover.

Uma possibilidade de obtenção de argila calcinada é a partir de resíduos de indústrias que utilizam argila como matéria-prima, como ocorre na indústria cerâmica, que normalmente utilizam argilas ílticas ou montmorilomífticas, que passam por um processo de queima e sinterização que pode chegar a uma temperatura de 950 °C (Gonçalves *et al.*, 2006).

A indústria da cerâmica vermelha compreende os materiais empregados na construção civil, tais como tijolos, blocos, telhas, tubos cerâmicos, manilhas e argila expandida. O setor de cerâmica vermelha

conta com aproximadamente 11 mil empresas no Brasil, em sua maioria de pequeno porte. Ruy (2004) e Gonçalves *et al.* (2006) determinaram que o índice médio de perdas nesse setor é de 10%.

Ao inferir este percentual de perdas, de 10% sobre a produção nacional de cerâmica vermelha, que de acordo com os últimos dados da Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2008), que são de 65 milhões de toneladas, obter-se-á uma produção de resíduo de cerâmica calcinada de 6,5 milhões de toneladas, volume significativo e que ocasiona problemas ambientais em função da deposição irregular.

Outra fonte importante de resíduo de cerâmica calcinada são os resíduos sólidos urbanos. Estima-se que 40% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos têm origem no processo construtivo, dos quais 50% são dispostos irregularmente sem qualquer critério de seleção. Em massa, o montante de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados no Brasil é de aproximadamente  $68,5 \times 10^6$  toneladas/ano (Ângulo *et al.*, 2001). A participação de materiais cerâmicos na composição do RCD atinge até 30% do total de resíduos (Pinto, 1997; Ângulo *et al.*, 2001), o que resulta em mais de 20,5 milhões de toneladas/ano.

Em função da grande finura, a utilização tanto do metacaulim de alta reatividade quanto do resíduo de cerâmica calcinada, em substituição de parte do cimento, resulta em um aumento na demanda de água para manter a mesma trabalhabilidade de uma pasta produzida com cimento puro. Para evitar-se a adição de mais água na mistura, o que prejudicaria as características dos compósitos no estado endurecido, é imprescindível o uso de aditivos superplastificantes, que são aditivos redutores de água de alta eficiência e atuam disper-

sando as partículas de cimento e dos materiais alternativos, diminuindo o atrito interno existente entre elas (Khayat e Aïtcin, 1993 apud Mendes, 2002; Mehta e Monteiro, 2008; Neville, 1997).

Os aditivos aceleradores são úteis para modificar as propriedades do concreto de cimento Portland, propiciando redução do tempo de cura, aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material, entre outras (Mehta e Monteiro, 2008).

Os aditivos aceleradores de pega são úteis também para modificar as propriedades do concreto de cimento Portland, propiciando redução do tempo de cura e aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material. Dentre os compostos inorgânicos utilizados como aceleradores de pega, encontram-se os hidróxidos de sódio, potássio ou amônio e, entre os compostos orgânicos, destaca-se a trietanolamina (Isaia, 2005). Para Mehta e Monteiro (2008) o aditivo acelerador de pega mais conhecido e amplamente utilizado é o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

## OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobra de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada, em compósitos cimento-madeira.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de madeira de *Pinus* spp., utilizado neste estudo foi proveniente de uma madeireira localizada no município de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil). Após a coleta, o resíduo foi seco ao ar e

peneirado em uma peneira ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) n° 4, de forma a garantir ao resíduo de *Pinus* spp, uma granulometria contínua com dimensão máxima característica ( $D_{\text{máx}}$ ) de 4,8 mm.

Na produção dos compósitos de referência o resíduo de *Pinus* foi utilizado *in natura*, ou seja, sem qualquer pré-tratamento ou uso de aditivos químicos (Referência 1), *in natura* e com 4,5% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Referência 2) e com pré-tratamento tipo extração em água fria por 48 horas (AF-48H) e com 4,5% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Referência 3).

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland, tipo CPV ARI RS – cimento Portland de Alta Resistência Inicial – Resistente a Sulfatos, especificado pela norma ABNT NBR 5.733 (1991).

Nesta pesquisa utilizou-se o material *Metacaulim HP*® produzido e comercializado pela empresa *Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda*. O resíduo de cerâmica utilizado foi fornecido por uma indústria que produz cerâmica vermelha para construção civil, localizada na cidade de Curitiba (Paraná, Brasil).

O aditivo acelerador de pega utilizado foi o cloreto de cálcio bi-hidratado -  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , produzido pela *IPC do Nordeste Ltda*. O aditivo superplastificante utilizado tem como base uma mistura de lignosulfonatos, naftalenos e melaminas e foi produzido e fornecido pela empresa *MC – Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda*, com o nome comercial *Muraplast FK 49B*.

A confecção dos corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50mm baseou-se na Norma Brasileira NBR 7215 (1996). Foi utilizado o traço sugerido por Simatupang (1979) e apresentada por Moslemi Pfister (1987) apud Iwakiri

(2005), fixando-se uma relação madeira/cimento igual a 13,3:1 e uma relação água/cimento igual a 0,35. O teor de água da mistura foi controlado e corrigido em função do teor de umidade do resíduo de *Pinus*, de forma a manter sempre a madeira no Ponto e Saturação das Fibras (PSF), adotado neste estudo como 30%.

A amostra mínima a ser ensaiada, a fim de garantir estatisticamente a distribuição e confiabilidade dos resultados, foi determinada pela equação:

$$n = z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{Er^2} \quad (3)$$

Onde:  $n$  = número de repetições;

$Er$  = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

$CV$  = coeficiente de variação da amostra;

$z_{\alpha/2}$  = valor tabelado, para um nível  $\alpha = 5\%$  de significância, de 1,96.

A cura inicial dos corpos-de-prova, com duração de 24 horas, deu-se em câmara úmida, conforme NBR 9.479 (2006), com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa mínima de 95%, onde permaneceram com os moldes e cobertos com uma placa de acrílico, para proteção, conforme NBR 7.215 (1996). Após o período de cura inicial, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e mantidos em câmara úmida, imersos em água, até a data de ensaio.

As características mecânicas, compreendendo os ensaios para determinação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias foram efetuados conforme NBR 7.215 (1997). Para não haver influências

de irregularidades nos topos dos corpos-de-prova, e garantir a ruptura por compressão simples, foram utilizados discos de neoprene com dureza 60 a 70 shore dispostas em garniões de aço.

As características físicas dos compósitos produzidos nesta pesquisa foram determinadas em máquina universal de ensaio marca *Emic*, modelo *DL 30000*, com tomada de dados por computador. Os ensaios foram realizados no Labmat - Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Os teores de substituições parciais do cimento Portland dos compósitos cimento-madeira (resíduo de *Pinus*), foram tomadas com base na massa de cimento do traço nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%, tanto para o metacaulim quanto para o resíduo de cerâmica.

Quanto ao aditivo acelerador de pega, para cada teor de substituição do cimento Portland, foram testados teores de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , variando de 0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%. O teor limite de 4,5% foi adotado por ter apresentado o melhor desempenho nos compósitos com o resíduo de *Pinus in natura*.

O aditivo superplastificante foi utilizado em teores calculados sobre a massa do cimento e dos materiais cimentícios alternativos, de modo a manter a consistência da mistura fresca, medida na mesa cadente, conforme NBR 7.215 (1996), constante e com valor que represente a média da consistência dos compósitos de Referência, estabelecida em  $(250 \pm 10)$  mm.

Com base nos resultados de resistência à compressão na idade de 7 dias (RC 7d) e 91 dias (RC 91d) dos compósitos produzidos com as substituições parciais do cimento Portland, efetuaram-

se análises multivariadas através de regressões múltiplas, considerando-se como variáveis dependentes as resistências dos compósitos à compressão aos 91 dias de idade (RC 91d) e como variáveis independentes os teores de substituição ao cimento Portland e os teores de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e de aditivo superplastificante. Estas composições otimizadas foram produzidas e testadas em laboratório para determinação das características físicas e mecânicas dos compósitos.

As características físicas dos compósitos otimizados aos 28 dias de idade, compreendendo os ensaios para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água, foram determinadas conforme a norma NBR 9.778 (2005). As características mecânicas, compreendendo os ensaios para determinação da resistência à compressão aos 7 dias (RC 7d), 28 dias (RC 28d) e 91 dias (RC 91d), foram determinadas conforme NBR 7.215 (1997). A determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade (RT 28d), foi efetuada conforme NBR 7.222 (1994).

A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios foi feita através da análise variância (ANOVA) e, todas as vezes que a hipótese da nulidade foi rejeitada, efetuou-se a comparação das médias através do teste de Tukey-Kramer.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland pelo Metacaulim de Alta Reatividade

Na tabela 1 estão apresentados os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias de cura (RC 7d e RC 91d), para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito

por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de metacaulim (MC) de alta reatividade.

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição do resíduo de cerâmica, houve a necessidade, para manter inalterada a consistência do compósito fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,60% a 7,80%, com base na massa do cimento mais MC;

Nos compósitos produzidos com teores acima de 4,0% de aditivo superplastificante e acima de 3% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , verificou-se a presença de macro-poros devido à dificuldade de compactação para a produção dos corpos-de-prova, conforme evidenciado na figura 1.

Os maiores valores de RC 7d, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim, se verificaram para os compósitos com MC 5% com adição de 2% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 0,60% de aditivo superplastificante, e MC 15% com adição de 2% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 1,20% de aditivo superplastificante, ambas significativamente superiores às resistências determinadas com os compósitos de referência (PN<sup>1</sup>, PNCC<sup>2</sup>, PNAFCC<sup>3</sup>).

Para os resultados obtidos aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos MC 10% com adição de 1% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 0,70% de aditivo superplastificante, valor significativamente superior aos determinados com os compósitos de referência. Os resultados demonstram que é possível substituir até 30% do cimento Portland do compósito por Metacaulim, sem que haja diferenças estatísticas significantes, à 95% de confiança, dos valores determinados para a maior resistência determinada

Tabela 1. Variação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

TS-MC	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)			CV(%)
				RC-7d	CV (%)	RC-91d	
PN <sup>1</sup> PNCC <sup>2</sup> PNAFCC <sup>3</sup>	0,00	0,00	283,00	20,01 P	4,99	28,97 T	5,68
	4,50	0,00	257,00	32,57 EFG	1,90	39,82 LMN	5,46
	4,50	0,00	248,00	34,73 BC	2,48	43,91 DEF	1,21
5,0	0,00	0,60	250,00	27,87 KL	3,62	39,64 MN	3,29
	1,00	0,60	250,00	34,51 BCD	4,31	41,46 HIJKL	2,44
	2,00	0,60	246,00	37,11 A	4,31	41,74 HIJK	2,42
	3,00	0,60	250,00	34,19 BCDE	3,26	40,93 IJKLM	3,01
	4,50	0,60	251,00	32,79 DEFG	3,64	39,40 MN	2,34
	0,00	0,70	259,00	26,92 LM	4,89	41,78 HIJ	3,12
10,0	1,00	0,70	250,00	30,35 HI	3,56	49,57 A	2,50
	2,00	0,70	248,00	33,18 CDEF	3,48	47,74 B	0,89
	3,00	0,70	250,00	32,19 FG	3,17	46,14 BC	1,64
	4,50	0,70	251,00	30,87 GHI	2,62	43,77 EF	3,86
15,0	0,00	1,20	248,00	31,79 FGH	0,36	41,90 GHUJ	5,18
	1,00	1,20	247,00	32,41 EFG	4,84	43,65 EFG	3,69
	2,00	1,20	245,00	35,64 AB	2,95	42,15 FGHUJ	4,42
	3,00	1,20	245,00	33,18 CDEF	3,02	41,70 GHUJKL	2,73
20,0	4,50	1,20	245,00	33,31 FGHI	3,68	38,79 NO	3,86
	0,00	2,60	250,00	27,86 KL	1,81	40,11 JKLMN	0,78
	1,00	2,60	245,00	29,89 HIJ	4,18	42,14 FGHUJ	1,04
	2,00	2,60	245,00	29,93 HIJ	1,73	45,81 BCD	0,71
	3,00	2,80	250,00	29,86 HIJ	3,94	44,46 CDE	0,74
	4,50	2,80	250,00	28,31 JKL	4,54	43,04 EFGH	2,84
30,0	0,00	4,00	255,00	30,27 HI	4,40	33,05 R	1,41
	1,00	4,00	252,00	29,36 IJK	7,66	39,95 KLMN	5,19
	2,00	4,60	240,00	32,75 DEFG	5,85	42,57 EFGHI	2,39
	3,00	5,40	250,00	30,26 HI	6,77	39,17 MN	2,39
40,0	4,50	5,70	252,00	24,84 NO	2,79	31,22 S	5,72
	0,00	5,80	256,00	23,37 O	7,48	32,72 RS	2,31
	1,00	6,80	250,00	27,10 LM	2,94	33,82 QR	5,83
	2,00	7,20	240,00	27,21 LM	5,38	37,03 OP	0,54
4,50	3,00	7,80	245,00	25,66 MN	5,86	35,56 PQ	3,88
	4,50	7,80	243,00	23,96 NO	7,39	33,31 R	1,91

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-CV: Teor de substituição da metacaulim; T-CC: Teor de  $\text{CaCl}_2$ ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PN<sup>1</sup> Ref.1: Pinus spp in natura; PNCC<sup>2</sup> Ref.2: Pinus spp in natura + 4,5%  $\text{CaCl}_2$ ; PNAFCC<sup>3</sup> Ref.3: Pinus spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5%  $\text{CaCl}_2$ .



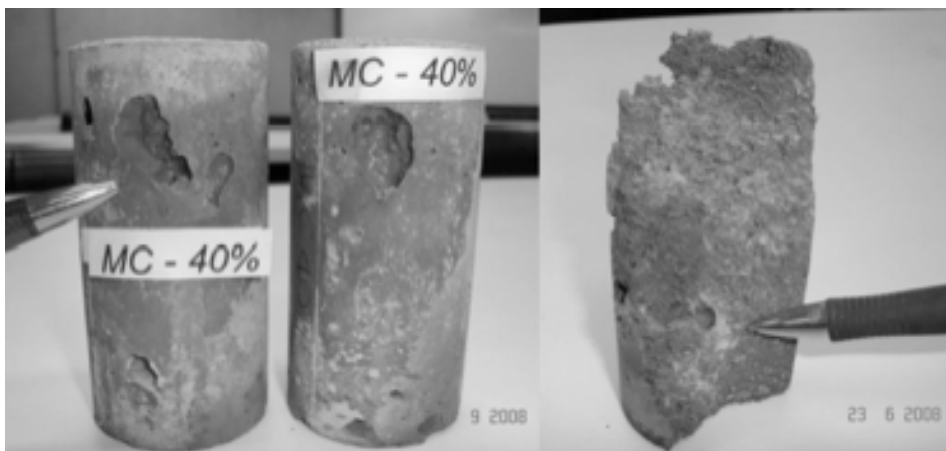


Figura 1. Macroporos nos compósitos com 40% de metacaulim e teores de superplastificante entre 5,8% e 7,8%.

com os compósitos de Referência aos 91 dias de idade (Ref. 3).

Através do uso de técnicas de análise multivariada determinou-se o seguinte modelo para expressar a dependência da RC91d em função dos teores de metacaulim,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e aditivo superplastificante:

$$RC91d \text{ (MPa)} = 1 / ( 1,2481 \times 10^{-5} + 4,9794 \times 10^{-23} \times \text{Exp}([\text{Teor Metacaulim} (\%)]]) + 2,6446 \times 10^{-44} / [\text{Teor CaCl}_2 (\%)]^{1/3} + 1,6530 \times 10^{-7} / \text{Ln}([\text{Teor Superplast} (\%)]])^{1/3} \quad (4)$$

O modelo apresentou forte correlação ( $R=0,8794$ ,  $R^2=0,7734$  e  $R^2_{\text{Ajust}} = 0,7656$ ), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ( $1,1 \times 10^{-17}$ ), é superior a 99,99%.

Na figura 2 está apresentada a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS em função do teor de substituição por metacaulim e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que há pouca variação da RC 91d do compósito para substituição do cimento Portland por teores entre 5% e 35% de metacaulim, sendo que acima desses teores de substituição, verifica-se uma queda acentuada da resistência. Verifica-se, também, que a RC 91d, praticamente independente do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , o que é confirmado pela de análise numérica da equação n° 4.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 90%, metacaulim = 10%,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  = 0% e superplastificante = 1,10%. A expectativa de resistência à compressão para esta

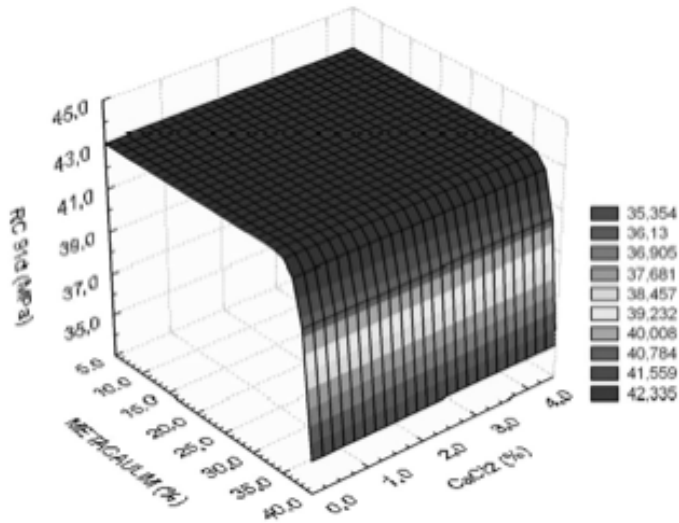


Figura 2. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

composição otimizada, aos 91 dias de idade, determinada pelo modelo é de 45,0848 MPa.

### Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Calcificada (RCC)

Na tabela 2 estão apresentados os valores das RC 7d e RC 91d para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de resíduo de cerâmica calcificada RCC.

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição do resíduo de cerâmica, houve a necessidade, a fim de manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,60% a 2,60%, com base na massa do cimento mais RCC.

A análise dos resultados apresentados indicam que o maior valor de RC 7d, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificou para o compósito com RCC 5% com 3% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 0,70% de aditivo superplastificante, sendo significativamente superior às resistências determinadas com os compósitos de Referência (PN<sup>1</sup>, PNCC<sup>2</sup>, PNAFCC<sup>3</sup>).

Para os ensaios realizados com 91 dias de idade, as maiores resistências à compressão foram verificadas para os compósitos RCC 5% com 2% e 3% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 0,60% e 0,70% de aditivo superplastificante, respectivamente, sendo ambas significativamente superiores às resistências determinadas com os compósitos de Referência. Os resultados indicam que é possível substituir até 20% do cimento Portland do compósito por RCC, sem que haja diferenças estatísticas significantes, à 95% de confiança,

Tabela 2. Variação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica calcinada RCC e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

TS-RCC	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)			CV (%)
				RC-7d	RC-91d	CV (%)	
PN <sup>1</sup> PNCC <sup>2</sup> PNAFCC <sup>3</sup>	0,00	0,00	283,00	20,01 Q	28,97 O	4,99	5,68
	4,50	0,00	257,00	32,57 IJ	39,82 GH	1,90	5,46
	4,50	0,00	248,00	34,73 FGH	43,91 CDE	2,48	1,21
5,0	0,00	0,60	255,00	31,08 JK	39,88 FGH	7,09	3,15
	1,00	0,60	255,00	37,39 BCD	44,57 CD	1,44	1,17
	2,00	0,60	250,00	39,65 B	47,86 A	5,50	1,13
	3,00	0,70	250,00	42,19 A	47,15 AB	3,50	5,31
	4,50	0,80	255,00	37,16 CDE	43,11 CDE	2,86	2,35
10,0	0,00	0,60	255,00	29,57 KL	35,50 JK	5,92	3,58
	1,00	0,60	253,00	33,06 HIJ	43,13 CDE	2,70	2,55
	2,00	0,60	248,00	38,35 BC	44,91 BC	3,08	2,00
	3,00	0,70	255,00	36,44 CDEF	42,59 CDE	4,69	1,21
	4,50	0,70	254,00	33,24 GHIJ	42,89 CDE	7,06	4,02
15,0	0,00	0,60	251,00	32,30 IJ	37,06 IJ	3,33	5,31
	1,00	0,60	250,00	35,04 EFGH	41,61 EFGH	5,78	5,99
	2,00	0,60	255,00	36,41 CDEF	42,44 CDEF	1,57	1,38
	3,00	0,60	251,00	37,25 BCDE	43,64 CDE	4,18	2,92
	4,50	0,60	250,00	35,64 DEFG	42,80 CDE	8,30	4,97
20,0	0,00	0,50	247,00	29,31 KL	37,01 IJ	7,99	3,62
	1,00	0,50	245,00	32,85 HIJ	39,40 HI	7,10	3,39
	2,00	0,60	256,00	35,78 DEF	42,17 DEFG	1,98	5,81
	3,00	0,60	253,00	35,04 EFGH	42,75 CDE	5,11	3,00
	4,50	0,60	252,00	34,42 Fghi	42,44 CDEF	1,20	2,46
30,0	0,00	1,20	254,00	23,19 OP	30,13 NO	6,63	7,84
	1,00	1,20	254,00	27,51 LM	32,26 MN	6,19	5,25
	2,00	1,20	255,00	28,76 L	35,74 JK	7,15	6,45
	3,00	1,20	255,00	27,78 L	36,29 JK	5,51	3,00
	4,50	1,20	256,00	28,11 L	35,01 JKL	1,08	2,46
40,0	0,00	2,60	260,00	23,54 NOP	29,65 O	6,19	5,10
	1,00	2,60	264,00	24,91 NO	32,98 LM	3,74	6,88
	2,00	2,60	260,00	25,52 MN	34,57 KL	2,89	4,02
	3,00	2,60	250,00	24,05 NOP	35,56 JK	4,07	3,78
	4,50	2,60	260,00	22,72 P	34,08 KLM	3,93	2,66

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-RCC: Teor de substituição do resíduo de cerâmica calcinada; T-CC: Teor de  $\text{CaCl}_2$ ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PN<sup>1</sup> Ref.1: Pinus spp in natura; PNCC<sup>2</sup> Ref.2: Pinus spp in natura + 4,5%  $\text{CaCl}_2$ ; PNAFCC<sup>3</sup> Ref.3: Pinus spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5%  $\text{CaCl}_2$ .

dos valores determinados para a maior resistência determinada com os compósitos de Referência aos 91 dias de idade (Ref. 3).

O modelo que expressa a dependência da resistência à compressão do compósito aos 91 dias, em função dos teores de substituição do cimento por RCC, de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e de aditivo superplastificante é apresentada na equação 5.

$$RC\ 91d = 27,425 + 25,092 / [RCC]^{1/3} - 7,0138 \times \text{Exp}(-[\text{CaCl}_2]) + 1,9691 / [\text{Superplast}]^2 \quad (5)$$

O modelo apresentou forte correlação ( $R = 0,9327$ ,  $R^2 = 0,8700$  e  $R^2_{\text{Ajust}} = 0,8660$ ), o que indica que os dados experimentais estão muito bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ( $1,1 \times 10^{-17}$ ), é superior a 99,99%.

Na figura 3 está apresentada a superfície de resposta da RC 91d, do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS, em função do teor de substituição por RCC e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que a RC 91d do compósito decresce significativamente para teores de RCC acima de 5% e aumenta em função do acréscimo dos teores de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e do aditivo superplastificante, conforme análise numérica da equação n° 5.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 95%, RCC = 5%,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  = 4,5% e superplastificante = 0,5%. A expectativa de resistência à compressão para esta

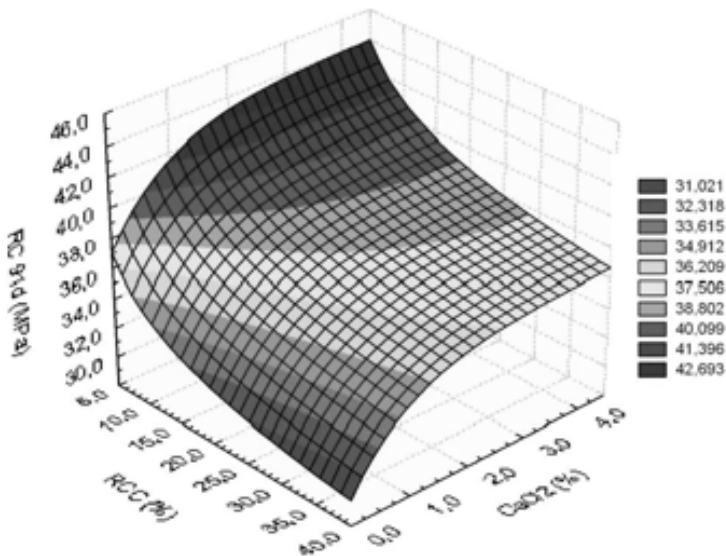


Figura 3. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por RCC e do teor de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

composição otimizada, aos 91 dias de idade, determinada pelo modelo é de 49,8974 MPa.

### **Análise dos Compósitos com Substituições Parciais do Cimento Portland Otimizadas**

Com a finalidade de comprovar as expectativas de RC 91d e de determinar as demais características físicas e mecânicas dos compósitos cimento-madeira, produzidos com o resíduo de *Pinus spp* e com as substituições parciais do cimento Portland, procedeu-se a produção e teste dos compósitos.

Na tabela 3 estão apresentadas as características físicas dos compósitos produzidos com as substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, e dos compósitos de referência.

Os resultados demonstram que tanto a massa específica, quanto o índice de vazios e a absorção de água, apresentaram diferenças significativas entre si, a 95% de confiança. A substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e RCC, apesar da grande finura desses materiais, não contribuiu para alterações importantes das características físicas dos compósitos.

Na tabela 4 estão apresentadas as características mecânicas dos compósitos produzidos com as substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, e dos compósitos de referência.

Foram constatadas diferenças estatísticas significativas entre os resultados obtidos para RC e RT, entre os compósitos com substituições parciais do cimento Portland e os compósitos de Referência, em todas as idades.

A RC 91d determinada para o compósito otimizado com MC (45,34MPa) apresentou valor médio 0,57% superior ao previsto pelo modelo estatístico enquanto, a RC 91d média, determinada com o compósito otimizado com RCC, ficou 11,96% abaixo da previsão.

Observando-se os valores de RC, pode-se notar a evolução das resistências dos compósitos com substituições parciais do cimento por MC e RCC ao longo do tempo, sendo significativa às diferenças aos 91 dias de idade entre estes e os compósitos de Referência 1 e 2, não havendo diferenças significativas em relação a RC da Ref 3. Os menores valores de resistência à compressão, em todas as idades, foram obtidos para o compósito produzido com 100% de cimento Portland e com o resíduo de *Pinus in natura*.

A análise da evolução da RC dos compósitos com a idade (Figura 4), verifica-se uma tendência de crescimento maior das resistências à compressão dos compósitos com substituição parcial do cimento Portland pelo MC e RCC, em comparação aos compósitos de Referência (com 100% de cimento Portland) a partir dos 28 dias de idade.

Quanto à resistência à tração determinada aos 28 dias de idade, cujos valores são, também, apresentados na tabela 4, verifica-se:

Quanto aos resultados de resistência à tração aos 28 dias apresentados na tabela 4, constata-se que houve diferenças estatísticas significativas entre os valores obtidos para os compósitos com substituição parcial do cimento Portland por MC e RCC e os compósitos de Referência.

Tabela 3. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp. e substituições parciais do cimento Portland por metacaulim e RCC – Características físicas.

Composito	ME	CV	IV	CV	ABS	CV
	(kgf/m <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
PN <sup>1</sup>	1.471 C	0,45	38,98 A	0,74	26,49 B	0,79
PNCC <sup>2</sup>	1.594 A	0,62	36,29 BC	1,15	22,77 D	3,04
PNAFCC <sup>3</sup>	1.503 B	0,88	35,77 C	0,81	23,79 C	1,61
MC 10%	1.492 B	0,54	34,47 C	0,71	23,10 BC	1,15
RCC 5%	1.469 C	0,95	39,09 A	1,62	26,60 A	2,38

Tabela 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* e substituições parciais do cimento Portland por metacaulim e RCC – Características mecânicas.

Composito	Resistência à compressão - RC (MPa)						Resistência à tração RT (MPa)	
	RC 7d		RC 28d		RC 91d		RT 28d	
	CV (%)	RC (%)	CV (%)	RC (%)	CV (%)	RC (%)	CV (%)	CV (%)
PN <sup>1</sup>	20,01D	4,99	24,59D	1,29	28,97D	5,68	1,95E	2,33
PNCC <sup>2</sup>	32,57B	1,90	38,64B	3,60	39,82C	5,46	2,57D	2,63
PNAFCC <sup>3</sup>	34,73A	2,48	42,72A	2,69	43,91B	1,21	2,67D	2,13
MC 10%	32,86 B	5,04	39,02 B	4,23	45,34 A	1,80	3,93 A	5,27
RCC 5%	31,52 B	4,66	37,45 B	2,99	43,93 A	2,73	4,06 A	3,86

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; ME: massa específica; CV: coeficiente de variação; IV: índice de vazios; ABS: absorção; PN<sup>1</sup>: *Pinus* spp in natura; PNCC<sup>2</sup>: Ref.2: *Pinus* spp in natura + 4,5% CaCl<sub>2</sub>; PNAFCC<sup>3</sup>: Ref.3: *Pinus* spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl<sub>2</sub>; MC: Metacaulim; RCCF: Resíduo de cerâmica calcinada.

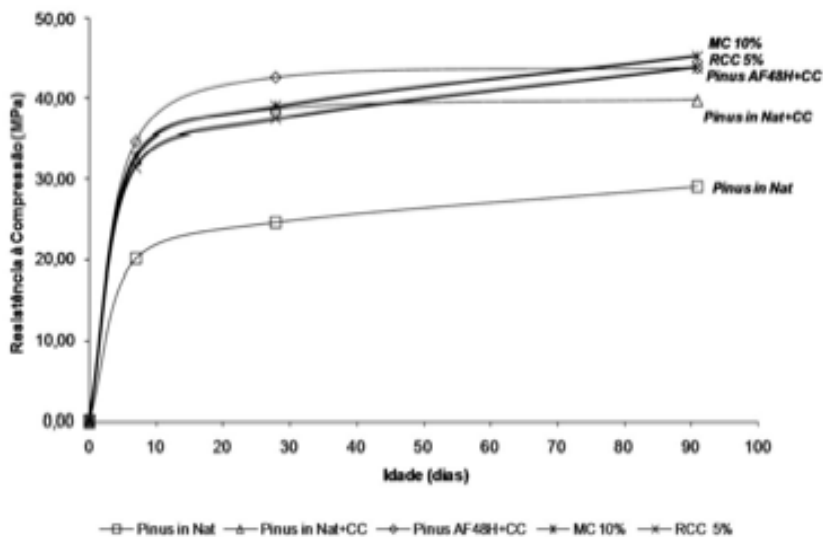


Figura 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp. e substituições parciais do cimento Portland – evolução da resistência à compressão com a idade.

O compósito produzido com substituição parcial do cimento Portland por 10% de MC apresentou valor de resistência à tração aos 28 dias de idade (RT 28d) de 3,93 MPa, sendo este valor 101,54% maior que o valor obtido para a Ref 1,

52,92% maior que a Ref 2 e 52,06% maior que a Ref 3.

Quanto a substituição parcial por 5% de RCC, o valor de resistência à tração aos 28 dias de idade de 4,06 MPa, foi 108,21%

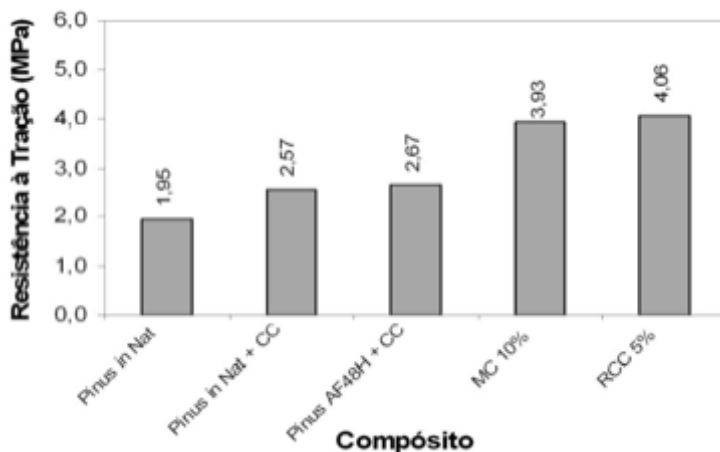


Figura 5. Compósitos com resíduo de *Pinus* e substituições parciais do cimento Portland – resistência à tração.

maior que a obtida para a Ref 1, 57,98% maior que a Ref 2 e 52,06% maior que os valores determinados para a Ref 3; Na figura 5, encontra-se ilustrada a comparação entre os valores determinados para a resistência à tração, obtida através de ensaios de compressão diametral dos corpos-de-prova, na idade de 28 dias.

Nas figuras 4 e 5 pode-se observar que a melhora das características mecânicas dos compósitos se deve a uma sinergia entre os diversos materiais utilizados nas suas composições. A extração de parte dos carboidratos do resíduo de *Pinus spp*, que a princípio não têm característica de material resistente, com um simples pré-tratamento com água fria, proporciona uma melhor interação com o cimento Portland e confere um ganho tanto das resistências à compressão quanto à tração do material.

Este fato também é verificado pela utilização do  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  como aditivo acelerador de pega do cimento e principalmente quanto a substituição parcial do cimento Portland por 10% de MC e 5% de RCC, utilizadas com auxílio de aditivo superplastificante, de forma a manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco sem a necessidade de adicionar mais água para sua produção, o que, sem dúvidas, traria consequências negativas às resistências do material.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

A utilização do resíduo de *Pinus spp.* com  $D_{\text{máx}} = 4,8$  mm é tecnicamente viável;

A utilização de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  como aditivo acelerador de pega propiciou ganhos significativos de resistência dos

compósitos com 100% de cimento Portland;

A utilização de pré-tratamento, tipo extração em água fria por 48 horas (AF-48H), propiciou aumentos significativos da resistência à compressão dos compósitos quando comparados aos compósitos com resíduo de *Pinus spp* sem tratamento;

O teor ótimo de substituição do cimento Portland por MC, determinado através de análise multivariada, foi de 10%, com 0% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 1,10% de aditivo superplastificante;

O teor ótimo de substituição do cimento Portland por RCC, também determinado através de análise multivariada, foi de 5%, com 4,5% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 0,5% de aditivo superplastificante;

Considerando as RC 91d determinadas com os compósitos de Referência, verifica-se a viabilidade de substituição do cimento Portland dos compósitos por até 30% de MC e 20% de RCC;

As características físicas dos compósitos produzidos com substituições parciais de sílica ativa e metacaulim, pouco diferiram das características dos compósitos de Referência;

Os compósitos produzidos com substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, apresentaram resistências à compressão aos 91 dias de idade, e a tração, aos 28 dias de idade, superiores aos compósitos de Referência, produzidos com 100% de cimento Portland;

Fica evidente o ganho de qualidade, em termos das características físicas do compósito, devido à sinergia existente entre os materiais componentes, principalmente no que tange a utilização das



substituições ao cimento Portland, no caso o MC e o RCC, bem como o uso do aditivo superplastificante, essencial para manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco;

Nos compósitos produzidos com MC verificaram-se problemas com o uso concomitante de teores acima de 3% do aditivo acelerador de pega e 4% de aditivo superplastificante, principalmente no que tange ao aparecimento de macroporos nos compósitos, durante as operações de moldagem.

### REFERÊNCIAS

- Ângulo, S.C., Zordan, S.E., John, V.M. 2001. Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclado e suas Aplicações. CT206. IBRACON. Anais. São Paulo. p. 45-56.
- ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica. Cerâmica no Brasil – Números do Setor. Documento disponível em [www.abceram.org.br](http://www.abceram.org.br). Acesso em 15/09/2008.
- ABIMCI - Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Estudo Setorial 2008. Documento disponível em [www.abimci.com.br](http://www.abimci.com.br). Acesso em 25/09/2009.
- ABNT - NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).
- ABNT - NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT - NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT - NBR 9479: Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - NBR 9778: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - NBR 12653: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- Carmo, J.B.M. 2006. Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face a resistência mecânica e a viabilidade econômica. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 136 p.
- DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Relatório sobre a oferta mundial e produção nacional de metacaulim no ano 2007. Documento disponível em [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br). Acesso em 29/06/2008.
- Freitas, L.C. 2000. A baixa produtividade e o desperdício no processo de beneficiamento da madeira: Um estudo de caso. Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 120p.
- Gonçalves, J.P., R.D. Toledo Filho y E.M.R. Fairbairn. 2006. Estudo de hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. Ambiente Construído, 6(4):83-94.

- Isaia, G.C. 2005. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. 2v. IBRACON, São Paulo. 1.600 .
- Iwakiri, S. 2005. Painéis de madeira reconstituída. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná-FUPEF. Curitiba. 247 p.
- John, V.M. y V. Agopyan. 1993. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional de Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil. Anais. EPUSP, São Paulo. p. 29-38.
- Lange, H., M.H. Simatupang y A. Neubauer. 1989. Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood-cement composites. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. USA. Proceedings. p. 48-52.
- Lima, A.F., E.R.P. Jará y V.A. Alfonso. 1988. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: Celulose e Palpel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2ª ed. São Paulo. p. 129-167.
- Mehta, P.K. y P.J.M. Monteiro. 2008. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. Ed. Ibracon. 674 p.
- Mendes, S.E.S. 2002. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. Curitiba, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 146 p.
- Morais, S.A.L., E.A. Nascimento y D.C. Melo. 2005. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* Parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. Revista Árvore, Viçosa, 29(3):461-470.
- Moslemi, A. A. 1989. Wood-cement panel products: coming of age. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. Proceedings, USA. p. 12-18.
- Nahuz, M.A.R. 2004. Atividades industriais com madeiras de Pinus – Atualidades e desafios. Revista da Madeira, 83:10-12.
- Neville, A.M. 1997. Propriedades do concreto. 2ª ed. Ed. PINI, São Paulo. 738 p.
- Oliveira, C.T.A. 2000. Água do poro de pastas de cimento de escória. São Paulo, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 162 p.
- Pinto, T.P. 1997. Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil – Situação atual. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. Anais. EPUSP/ANTAC. São Paulo. p. 156-170.
- Rocha, G.G.N. y W.L. Vasconcelos. 2006. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Concreto e Construções, n. 42. Ed. Ibracon. p. 98-116.
- Ruy, V.A. 2004. Estudo da qualidade dos blocos cerâmicos produzidos pelas olarias da região metropolitana de Curitiba – Avaliação de três empresas selecionadas. Curitiba,

- Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. 78 p.
- Simple, K.E. y P.D. Evans. 2004. Wood-cement composites – Suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas. Rural Industries Research and Development Corporation. Kingston ACT. 64 p.
- Zampieri, V.A. 1989, Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 191 p.

Recibido el: 05 de mayo de 2010  
Aceptado el: 03 de febrero de 2011

Este documento se debe citar como: Miranda de Lima, A.J., S. Iwakiri y M.G. Lomelí-Ramírez. Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. *Madera y Bosques* 17(2):47-65.