

Utilização de resíduos do desdobro de toras de *Pinus* spp, sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeiraUse of wood residues deriving from the production of sawnwood of *Pinus* spp, silica fume and rice husk ash in wood cement compositesAdauto José Miranda de Lima¹, Setsuo Iwakiri²**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 sílica ativa e cinza de casca de arroz, em compósito cimento-madeira. As avaliações das características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão e a tração) dos compósitos, foram realizadas conforme normas da ABNT. Foram testadas substituições do cimento Portland por teores de 5% a 20% de sílica ativa e 5% a 40% de cinza de casca de arroz. Em ambos os casos foram utilizados, também, aditivos químicos para acelerar a pega do cimento ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e superplastificante, a fim de manter inalteradas as características reológicas do compósito no estado fresco. Os resultados das análises multivariadas demonstraram viabilidade técnica da utilização do resíduo de *Pinus* spp e das substituições parciais do cimento Portland no compósito, em proporções de 10% de sílica ativa e de até 30% de cinza de casca de arroz.

Palavras-Chave: Compósito cimento-madeira, *Pinus* spp, sílica-ativa, cinza de casca de arroz.

Abstract

This research was developed with the objective to evaluate the potential use of residues deriving from the production of *Pinus* spp sawnwood and partial substitutions of Portland cement by silica fume and rice husk ash, in wood-cement composites. The evaluations of the physical characteristics (density, porosity and water absorption) and mechanical (compression and tension strength) of the composites, were determined in agreement with the ABNT norms. The levels of substitution of Portland cement by 5% to 20% of silica fume and 5% to 40% of rice husk ash were tested. In both cases chemical additives were used, to accelerate de cement hydration ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and superplasticizer, to maintain unaffected the reologic characteristics of the composite in the fresh state. The results demonstrated the technical viability of the use of the wood residue of *Pinus* spp of the cement Portland in the composite. The results of the multivariate analyses showed the technical partial replacements of Portland cement in the composite, in proportions of 10% of active silica and up to 30% of rice husk ashes.

Keywords: Wood-cement composites, *Pinus* spp, silica fume, rice husk ash

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade proposta para o desenvolvimento econômico moderno fez com que os mais diversos setores passassem a se preocupar, realmente, com os recursos naturais aplicados na produção e aos efeitos ao meio ambiente. A aplicação da série de normas ISO14000 demonstra esta preocupação e o setor industrial madeireiro/florestal, diante da grande quantidade de resíduos que produz, não pode ficar alheia a esta realidade.

O gênero *Pinus* spp, da família das *Pinaceae*, é composto por plantas lenhosas, em geral arbó-

reas, de altura variável, sendo que algumas espécies de *Pinus* se incluem entre as árvores mais utilizadas no mundo (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 serrarias. Durante as etapas do processamento mecânico da madeira produz se 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 com base na análise

¹Professor Doutor do Departamento Acadêmico de Construção Civil da UTFPR – Av. Sete de setembro, 3156, Curitiba, PR – 80210-170- E-mail: adautojm@utfpr.edu.br

²Professor Doutor do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR - Av. Lothário Meissner, 632, Curitiba, PR - 80210-170 - E-mail: setsuo@ufpr.br

dos dados da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABI-MCI, 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 assume valores expressivos, pois segundo a ABIMICI (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 sílica ativa e a cinza de casca de arroz, têm propriedades que permitem o uso como substituintes ao cimento Portland, cuja produção, conforme Oliveira (2000) é responsável por 7% das emissões de CO₂ no planeta.

A capacidade dos materiais cimentícios alternativos em reagir com o Ca(OH)₂, conhecida como atividade pozolânica, é propriedade fundamental para a utilização destes materiais. 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)₂ do cimento.

John e Agopyan (1993) afirmam que o emprego de materiais cimentícios alternativos podem colaborar para um aumento da durabilidade dos compósitos com fibras ou partículas vegetais. O consumo de parte do Ca(OH)₂ que está concentrado na zona de transição promove a melhora da aderência entre fibras ou partículas vegetais e matriz, além do aumento da durabilidade do compósito, devido à redução do pH da matriz cimentícia em função da combinação dos íons Ca²⁺ liberados durante a hidratação do cimento.

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro silício e de outras ligas de silício. O silício e suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão e ferro, durante a produção de ligas ferro silício. Durante a redução da sílica, dentro do arco

elétrico, um sub-óxido de silício ou monóxido de silício gasoso, SiO, é produzido. Como esse gás escapa para a parte superior da carga, ele se resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica ou dióxido de silício (SiO₂), sendo coletadas por um sistema de eliminação de pó (AÏTCIN, 2000).

Este rejeito industrial recebeu inicialmente denominações tais como fumos de sílica ou microssílica, contudo a NBR 13.956 (ABNT 1997) estabeleceu a denominação sílica ativa como padrão (CARMO, 2006), sendo que sua utilização já é prática consolidada na tecnologia do concreto, porém, com uso ainda experimental em compósito cimento-madeira.

Em 2001 a produção mundial de sílica ativa foi de 585,7 milhões de toneladas, tendo como maiores produtores a Noruega e os Estados Unidos. No Brasil, naquele ano, a produção foi de 10,5 milhões de toneladas (IBGE, 2002 apud CARMO, 2006).

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. Quando queimada, como fonte de calor para o processo de secagem e parboilização dos grãos, a lignina e a celulose são removidas, resultando numa estrutura celular porosa. Conforme Pouey (2006), após a queima completa, cerca de 20% da casca de arroz é convertida em cinzas, as quais ainda são consideradas um resíduo agro industrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartadas ou lançadas em aterros, rios, etc., gerando muitos problemas ambientais.

A vantagem do uso da cinza de casca de arroz (CCA) é que a fonte agrícola é farta. Dos 12,1 milhões de toneladas de arroz que o país produz por ano (IBGE, 2009), a casca corresponde a 20% desta massa (2,4 milhões de toneladas). Este resíduo agrícola poderia se converter em 480 mil toneladas de sílica, o suficiente para suprir o mercado de concretos estruturais e outros. Desta forma, uma vez que esta tecnologia fosse aplicada integralmente, poder-se-ia resolver um grave problema ambiental e gerar uma fonte de renda adicional para os produtores de arroz.

O efetivo emprego da CCA na construção civil encontra restrições por motivos tais como sua coloração escura e a falta de uniformidade apresentada em termos de características mineralógicas. A cor escura não é um problema de ordem técnica, mas estética e que pode ser contornada mediante tratamentos químicos, tal como

banho com ácido clorídrico (HCl), que permite o clareamento das cinzas até a cor branca (DAFICO e PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2002).

Em função da grande área específica, a utilização tanto da sílica ativa quanto da cinza de casca de arroz, 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. Isto produz um compósito com relação água/cimento mais elevada. Assim, todo o benefício que se consegue na resistência e durabilidade do compósito pela ação físico-química da sílica ativa e da CCA, pode ser contraposto pela maior quantidade de água necessária para tornar o material trabalhável (ALMEIDA, 1996 apud MENDES, 2002).

Para se evitar a adição de mais água na mistura, é imprescindível o uso de aditivos superplastificantes, aditivos redutores de água de alta eficiência, que dispersam as partículas de cimento e sílica ativa, diminuindo o atrito interno existente entre elas (KHAYAT e AÏTCIN, 1993 apud MENDES, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

Os aceleradores de pega são compostos orgânicos ou inorgânicos solúveis em água e são utilizados para propiciar uma redução do tempo de cura, aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Conforme Isaia (2005) dentre os compostos inorgânicos encontram-se os sais de elementos alcalinos ou alcalino-terrosos à base de cloretos, fluoretos, carbonatos, silicatos, fluorsilicatos, aluminatos, boratos, nitratos, nitritos, tiosulfatos, etc. Para Metha e Monteiro (2008) o aditivo acelerador de pega mais conhecido e amplamente utilizado é o cloreto de cálcio (CaCl_2).

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 sílica ativa e cinza de casca de arroz, em compósito cimento-madeira.

MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de madeira de *Pinus* spp, utilizada neste estudo foi proveniente da empresa Madeireira Juruqui, localizada no município de Almirante Tamandaré (PR). Após a coleta, o resíduo do desdobro das toras foi seco ao ar e peneirado em uma peneira ABNT n° 4, de forma a garantir ao resíduo de *Pinus* spp, uma granulometria contínua com dimensão máxima característica ($D_{\text{máx}}$) de 4,8mm.

Na produção dos compósitos de referência o resíduo de *Pinus* spp 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 (Alta Resistência Inicial – Resistente a Sulfatos), especificada pela norma ABNT NBR 5.733 (ABNT, 1991).

A sílica ativa utilizada é produzida pela Camargo Corrêa S.A., com nome comercial de *Sil-mix*®. A cinza de casca de arroz foi fornecida por uma empresa beneficiadora da região de Jaraguá do Sul (SC).

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 foi uma mistura de lignosulfonatos, naftalenos e melaminas, produzido e fornecido pela empresa MC – Bau-chemie Brasil Indústria e Comércio Ltda, com o nome comercial Muraplast FK 49B.

Os corpos-de-prova cilíndricos, com diâmetro de 50 mm, foram moldados em 4 camadas dos compósitos, adensadas manualmente por meio de um soquete padronizado, conforme a norma NBR 7.215 (ABNT, 1997). Foi utilizado o traço sugerido por Simatupang, 1979 citado por IWAKIRI, 2005, fixando-se uma relação madeira/cimento igual a 13,3:1, em massa, 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 da madeira de *Pinus* spp, de forma a manter sempre a madeira no Ponto de 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:

$$n = z_{\alpha/2}^2 (CV^2 / Er^2) \quad (1)$$

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 que, para um nível $\alpha = 5\%$ de significância, possui o valor de 1,96.

A cura inicial dos corpos-de-prova, com duração de 24 horas, deu-se em câmara úmida, confor-

me NBR 9.479 (ABNT, 2006), com temperatura de 23 ± 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 (ABNT, 1997). 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 (ABNT, 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 guarnições de aço.

Os teores de substituições parciais do cimento Portland dos compósitos cimento-madeira (resíduos da madeira de *Pinus* spp), foram tomados com base na massa de cimento do traço e variaram em função do tipo da substituição, sendo 5%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa e 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de cinza de casca de arroz.

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* spp 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 (ABNT, 1997), constante e com valor que represente a média da consistência dos compósitos de Referência, estabelecida em 250 ± 10 mm.

Com base nos resultados de resistência à compressão com 7 dias de cura (RC 7d) e 91 dias de cura (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 aos 91 dias de cura (RC 91d) e como variáveis independentes os teores de substituição ao cimento Portland, os teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e os teores de aditivo superplastificante utilizados na produção das misturas. 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 cura, compreendendo os ensaios para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água, foram efetuados conforme a norma NBR 9.778 (ABNT, 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 efetuados conforme NBR 7.215 (ABNT, 1997). A determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura (RT 28d), efetuada conforme NBR 7.222 (ABNT, 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 por Sílica Ativa

Na Tabela 1 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% e 20% de sílica ativa (SA).

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição da sílica ativa, houve a necessidade, para manter inalterada a consistência do compósito fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,20% a 4,40%, com base na massa do cimento mais SA.

Os maiores valores de RC 7d, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificaram para os compósitos com SA 5% com adição de 3% e 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,40% de aditivo superplastificante, e SA 10% com adição de 1% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,80% de aditivo superplastificante. Os maiores valores de RC 7d determinados para os compósitos com substituições parciais do cimento por SA não diferiram estatisticamente da resistência RC 7d determinada para a Ref. 3, sendo, porém, significativamente superiores às determinadas com as Ref. 1 e 2.

Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos SA 5%, com adição de 1%, 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,20%, 0,30% e 0,40% de aditivo superplastificante, respectivamente, e SA 10% com adições de 1%, 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e teores de

0,80%, 1,00% e 1,20% de aditivo superplastificante, respectivamente, sendo que todas são estatisticamente superiores às determinadas com os três compósitos de Referência.

Os resultados indicam que é possível substituir até 15% do cimento Portland do compósito por SA, sem que haja diferenças estatísticas significantes, a 95% de confiança, dos valores determinados para a maior resistência determinada com os compósitos de Referência aos 91 dias de cura (Ref. 3).

Através de técnicas de análise multivariada determinou-se o seguinte modelo para expressar a dependência da RC 91d em função dos teores de sílica ativa, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante:

$$RC\ 91d\ (MPa) = 1 / (3,1534 \times 10^{-4} + 1,7021 \times 10^{-2} \times \text{Exp}(-[\text{Teor Sílica} (\%)]) + 1,7640 \times 10^{-42} / [\text{Teor CaCl}_2 (\%)]^{1/3} + 1,1209 \times 10^{-4} \times [\text{Teor Superplast} (\%)]^{1/2}) \quad (2)$$

O modelo apresentou fortíssima correlação ($R = 0,9163$, $R^2 = 0,8397$ e $R^2_{\text{ajust}} = 0,8324$), o

que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ($1,10 \times 10^{-11}$), é superior a 99,99%.

Na Figura 1 apresenta-se 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 sílica ativa e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

Analisando a superfície de resposta, verifica-se haver pouca variação da RC 91d do compósito para teores de sílica entre 5% e 20%, e que a resistência à compressão praticamente independe do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o que é confirmado pela análise numérica da equação n° 2.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 90%, sílica ativa = 10%, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 0% e superplastificante = 0,60%. A expectativa de resistência à compressão para esta composição otimizada, aos 91 dias de cura, determinada pelo modelo é de 49,6432 MPa.

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

Table 1. Variation of compression strength at ages of 7 and 91 days related to the partial substitution of Portland cement by silica fume and an amount of $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TS-SA	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
				RC-7d	CV (%)	RC-91d	CV(%)
PN1	0,00	0,00	283,00	20,01 L	4,99	28,97 J	5,68
PNCC2	4,50	0,00	257,00	32,57 BC	1,90	39,82 EFG	5,46
PNAFCC3	4,50	0,00	248,00	34,73 A	2,48	43,91 CD	1,21
	0,00	0,20	254,00	26,37 J	0,41	38,59 FGH	5,81
	1,00	0,20	253,00	29,12 FGH	2,77	47,83 A	5,27
	2,00	0,30	251,00	30,64 DEF	5,89	48,06 A	5,60
	3,00	0,40	247,00	34,64 A	3,98	47,99 A	2,87
5,0	4,50	0,40	245,00	33,43 AB	3,49	44,54 CD	4,33
	0,00	0,60	245,00	31,23 CDE	2,88	43,60 CD	2,40
	1,00	0,80	257,00	34,10 A	3,45	48,83 A	5,08
	2,00	1,00	252,00	32,04 BCD	2,04	47,43 AB	1,41
10,0	3,00	1,20	252,00	31,22 CDE	3,84	46,87 AB	3,04
	4,50	1,60	250,00	30,10 EF	4,39	44,26 CD	1,83
	0,00	1,60	250,00	29,26 FGH	4,75	38,98 FGH	5,07
15,0	1,00	1,80	245,00	30,21 EF	2,81	45,17 BC	1,17
	2,00	2,00	249,00	30,76 DEF	0,55	44,17 CD	2,25
	3,00	2,40	252,00	29,64 FG	4,34	42,28 DE	1,98
	4,50	3,00	245,00	27,21 I J	4,53	40,53 EF	3,00
20,0	0,00	3,00	245,00	27,72 H I J	4,90	38,09 FGH	3,06
	1,00	3,00	257,00	28,27 GHI	2,74	38,55 FGH	1,08
	2,00	3,20	252,00	26,32 J	1,77	37,67 GHI	3,53
	3,00	3,80	252,00	23,59 K	2,90	36,81 HI	3,90
	4,50	4,40	250,00	22,97 K	2,96	35,39 I	3,46

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-AS: Teor de substituição da sílica ativa; T-CC: Teor de CaCl_2 ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PNI Ref.1: *Pinus spp in natura*; PNCC2 Ref.2: *Pinus spp in natura* + 4,5% CaCl_2 ; PNAFCC3 Ref.3: *Pinus spp in natura* com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl_2 .

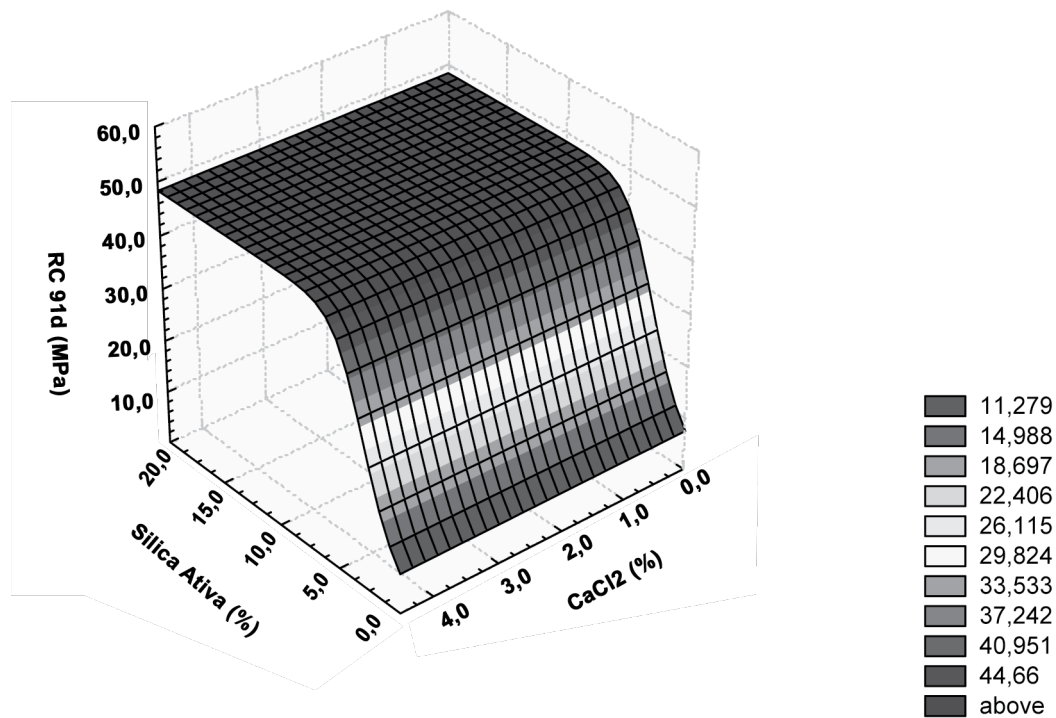


Figura 1. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento portland por sílica ativa e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Figure 1. Variation of compression strength to age of 91 days related to the partial substitution of Portland cement by sílica fume and an amount of $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza de Casca de Arroz

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 CCA.

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela substituição parcial do cimento do compósito por CCA, houve a necessidade, para manter inalterada a consistência do compósito fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,60% a 4,20%, com base na massa do cimento mais CCA.

O maior valor de resistência à compressão aos 7 dias, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, verificaram-se para os compósitos com CCA 5% com adição de 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6%, sendo que estes compósitos apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação às resistências determinadas, na mesma idade, com os compósitos de Referência.

Aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos CCA 5% com 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de superplastificante, CCA 15% com 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,6% de superplastificante (ambos), CCA 20%

com 1% e 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 2,4% de superplastificante e CCA 30%, com 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 3% de superplastificante. Os valores de RC 91d determinados com estes compósitos foram significativamente superiores aos valores determinados pelos três compósitos de Referência.

Os resultados indicam que é possível substituir até 40% do cimento Portland do compósito por CCA, sem que haja diferenças estatísticas significantes, à 95% de confiança, dos valores determinados para a maior resistência determinada com os compósitos de Referência aos 91 dias de idade (Ref. 3).

Adotando 91 dias de cura como idade padrão para comparação de resistências à compressão, verifica-se que o teor ótimo de substituição do cimento Portland CPV ARI RS, do compósito, fica na faixa entre 5% a 30%.

O modelo que expressa a dependência da resistência à compressão do compósito aos 91 dias, em função dos teores de substituição do cimento por CCA, de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante é apresentada na equação 3.

$$RC\ 91d\ (MPa) = 83,084 - 10,540 \times \ln([Teor\ CCA\ (\%)] - 0,06525 \times \text{Exp}([Teor\ CaCl_2\ (\%)] - 17,084 / [Teor\ Superplast\ (\%)] \quad (3)$$

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

Table 2. Variation of compression strength at ages of 7 and 91 days related to the partial substitution of Portland cement by CCA and an amount of $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TS-SA	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
				RC-7d	CV (%)	RC-91d	CV (%)
PN ¹	0,00	0,00	283,00	20,01 O	4,99	28,97 O	5,68
PNCC ²	4,50	0,00	257,00	32,57 EFG	1,90	39,82 JK	5,46
PNAFCC ³	4,50	0,00	248,00	34,73 BCD	2,48	43,91 DEFG	1,21
5,0	0,00	0,60	270,00	26,54 LMN	5,22	37,40 LM	4,26
	1,00	0,60	265,00	33,41 CDEF	2,56	43,36 EFGH	4,47
	2,00	0,60	255,00	36,48 AB	4,50	43,47 DEFGH	1,69
	3,00	0,60	250,00	38,75 A	1,44	46,25 ABCD	2,40
	4,50	1,00	259,00	36,28 B	5,20	42,64 EFGH	1,10
10,0	0,00	1,40	258,00	31,15 FGHI	5,72	43,84 CDEFG	0,99
	1,00	1,40	257,00	34,18 BCDE	2,77	44,01 CDEFG	2,78
	2,00	1,40	256,00	35,28 BCD	3,00	44,88 BCDEF	2,45
	3,00	1,40	256,00	33,60 CDE	0,53	44,34BCDEFG	2,61
	4,50	1,40	252,00	33,06 DEFG	1,96	41,16 HIJ	5,67
15,0	0,00	1,60	254,00	26,97 LMN	7,34	44,66BCDEFG	2,26
	1,00	1,60	253,00	30,16 HIJ	6,76	47,83 A	1,15
	2,00	1,60	251,00	35,27 BCD	3,35	46,59 AB	2,36
	3,00	1,80	252,00	35,67 BC	4,13	45,18 BCDE	2,59
	4,50	2,00	258,00	28,86 IJKL	5,88	36,25 M	3,91
20,0	0,00	2,20	255,00	31,05 GHI	3,63	42,22 GHI	3,06
	1,00	2,40	253,00	35,64 BC	4,65	46,30 ABC	1,54
	2,00	2,40	250,00	32,30 EFGH	3,28	46,20 ABCD	0,90
	3,00	2,40	260,00	30,13 HIJ	6,94	42,63 FGH	4,98
	4,50	2,60	252,00	25,66 N	8,33	38,96 JKL	1,49
30,0	0,00	2,80	240,00	26,56 MN	8,57	39,38 JKL	2,82
	1,00	2,80	242,00	29,36 IJK	3,46	44,04 CDEFG	5,52
	2,00	3,00	265,00	30,24 HIJ	7,85	47,57 A	3,83
	3,00	3,20	258,00	28,35 JKLM	4,26	44,07 CDEFG	1,76
	4,50	3,20	253,00	27,15 LMN	1,99	32,41 N	3,46
40,0	0,00	3,40	245,00	25,84 N	5,11	39,33 JKL	2,16
	1,00	3,60	251,00	26,22 N	6,38	40,03 IJK	7,78
	2,00	4,00	256,00	27,55 KLMN	4,64	41,21 HIJ	5,08
	3,00	4,20	240,00	27,49 KLMN	3,66	43,10 EFGH	3,52
	4,50	4,20	240,00	26,09 N	6,37	37,91 KLM	6,69

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-AS: Teor de substituição da sílica ativa; T-CC: Teor de CaCl_2 ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PN¹ Ref. 1: *Pinus spp in natura*; PNCC² Ref.2: *Pinus spp in natura* + 4,5% CaCl_2 ; PNAFCC³ Ref.3: *Pinus spp in natura* com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl_2 .

O modelo apresentou forte correlação ($R = 0,8533$, $R^2 = 0,7281$ e $R^2_{\text{ajust}} = 0,7132$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ($1,4 \times 10^{-13}$), é superior a 99,99%.

Na Figura 2 apresenta-se 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 CCA 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 CCA acima de 5% e, também, para teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ acima de 3%. A resistência do compósito aumenta significativa-

mente com o aumento do teor de aditivo superplastificante, como pode ser verificado mediante análise numérica da equação n° 3.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 95%, CCA = 5%, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 0% e superplastificante = 1,00% e uma expectativa de RC 91d de 48,9713 MPa.

Reforçando o enfoque ecológico da pesquisa, resolveu-se adotar, além da composição determinada pela otimização do modelo, uma composição com 30% de substituição do cimento por CCA, que de acordo com o modelo matemático desenvolvido, deve conter 0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 3,2% de aditivo superplastificante e apresentar uma expectativa de RC 91d = 41,8314 MPa.

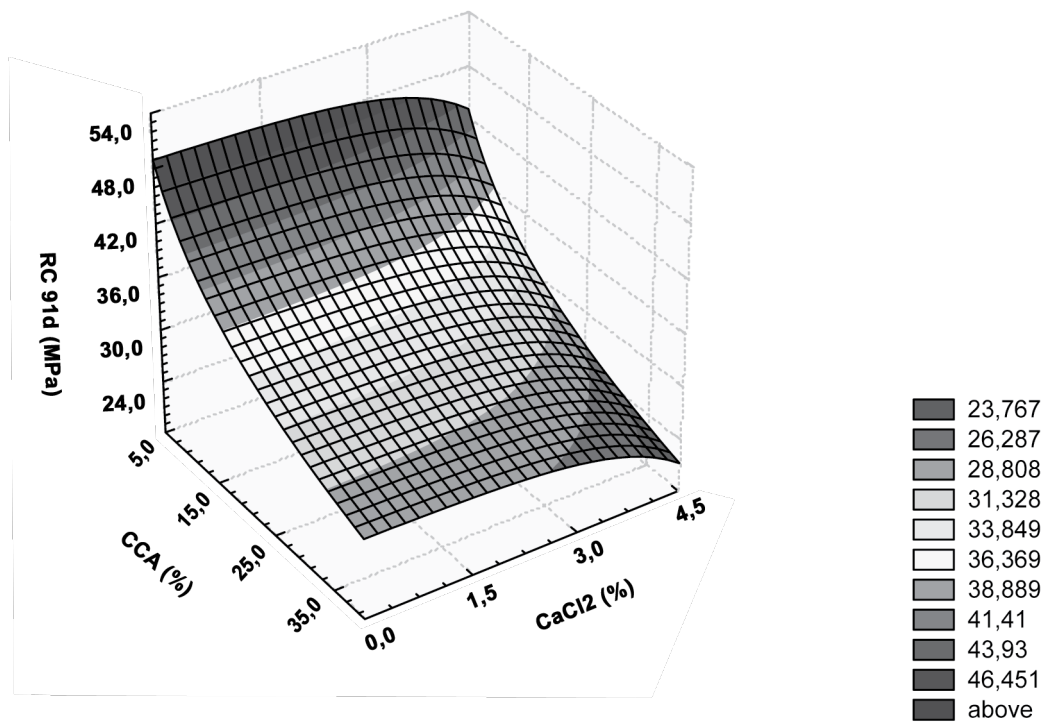


Figura 2. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento portland por CCA e do teor de CaCl₂·2H₂O.
Figure 2. Variation of compression strength to age of 91 days related to the partial substitution of Portland cement by CCA and an amount of CaCl₂·2H₂O.

Análise dos Compósitos com Substituições Parciais do Cimento Portland Otimizadas

A fim 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 do cimento Portland e dos compósitos de referência.

Os resultados obtidos indicam que tanto a massa específica, quanto o índice de vazios e a absorção de água, apresentaram diferenças significativas entre si, a 95% de confiança. Pode-se

constatar também que a substituição parcial do cimento Portland pela SA e pela CCA, apesar da grande finura desses materiais, não produziram em alterações importantes das características físicas dos compósitos.

Na Figura 3, apresentam-se os gráficos relativos às características físicas dos compósitos de referência e dos otimizados, em relação à substituição parcial do cimento Portland pelos materiais cimentícios alternativos.

As características mecânicas dos compósitos produzidos com o resíduo de *Pinus* spp e com as substituições parciais do cimento Portland, estão apresentadas na Tabela 4.

Os resultados da análise estatística indicam que há diferenças significativas entre os resultados de RC e RT entre os compósitos, para todos os tempos de cura.

Tabela 3. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp e substituições parciais do cimento portland – Características físicas.
Table 3. Composites with partial substitution by residues of *Pinus* spp of Portland cement – physical characteristics.

Compósito	ME (kgf/m ³)	CV (%)	IV (%)	CV (%)	ABS (%)	CV (%)
PN ¹	1.471 C	0,45	38,98 A	0,74	26,49 B	0,79
PNCC ²	1.594 A	0,62	36,29 BC	1,15	22,77 D	3,04
PNAFCC ³	1.503 B	0,88	35,77 C	0,81	23,79 C	1,61
SA 10%	1.437 D	0,78	37,10 B	2,96	25,82 B	3,64
CCA 5%	1.466 C	0,86	34,55 D	1,09	23,56 CD	1,61
CCA 30%	1.343 E	2,60	38,64 A	2,19	28,80 A	2,21

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; PN¹ Ref.1: *Pinus* spp in natura; PNCC² Ref.2: *Pinus* spp in natura + 4,5% CaCl₂; PNAFCC³ Ref.3: *Pinus* spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl₂; SA: Sílica ativa; CCA: cinza de casca de arroz.

Tabela 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp e substituições parciais do cimento portland – Características mecânicas.
Table 4. Composites with residues of *Pinus* spp partial substitution of Portland cement – mechanical characteristics.

Compósito	Resistência à compressão (MPa)						Resistência à tração (MPa)	
	RC 7d	CV (%)	RC 28d	CV (%)	RC 91d	CV (%)	RT 28d	CV (%)
PN ¹	20,01D	4,99	24,59D	1,29	28,97D	5,68	1,95E	2,33
PNCC ²	32,57B	1,90	38,64B	3,60	39,82C	5,46	2,57D	2,63
PNAFCC ³	34,73A	2,48	42,72A	2,69	43,91B	1,21	2,67D	2,13
SA 10%	34,82A	2,27	42,75A	5,09	46,30A	1,56	4,21A	4,49
CCA 5%	29,18C	5,39	38,35B	4,74	45,30AB	4,53	3,39C	4,60
CCA 30%	29,25C	2,13	36,28C	1,71	44,03B	3,73	3,74B	4,72

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; PN¹ Ref. 1: *Pinus* spp *in natura*; PNCC² Ref.2: *Pinus* spp *in natura* + 4,5% CaCl₂; PNAFCC³ Ref.3: *Pinus* spp *in natura* com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl₂; SA: Sílica ativa; CCA: cinza de casca de arroz.

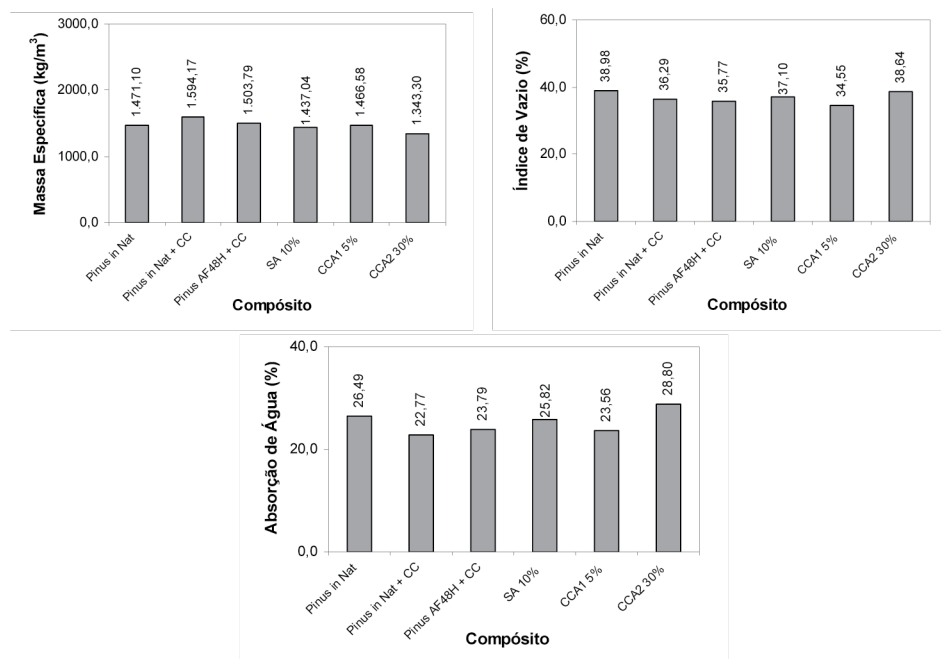


Figura 3. Características físicas dos compósitos com resíduo de *Pinus* spp e substituições parciais do cimento portland.
Figure 3. Physical characteristics of composites with residue of *Pinus* spp and partial substitutions of Portland cement.

O valor médio de RC 91d obtido para o compósito otimizado com SA (49,6432 MPa) foi 6,73% inferior ao previsto pelo modelo estatístico. Por outro lado, para o compósito otimizado com 5% CCA (48,9713 MPa) o valor médio de RC 91d ficou 7,50% abaixo do previsto, enquanto o compósito com 30% de CCA (41,8314 MPa), apresentou RC 91d média, 5,26% acima do determinado com o modelo estatístico.

Observando-se os valores de RC, pode-se notar a evolução das resistências ao longo do tempo, sendo significativas as diferenças aos 91 dias de cura entre o compósito com 10% de SA e os compósitos de Referência. Neste mesmo tempo de cura os compósitos produzidos com 5% e 30% de CCA, não apresentaram diferenças significativas entre si e nem entre o compósito Ref.3, sendo superiores aos demais (Ref. 1 e 2).

Os menores valores de resistência à compressão, em todos os tempos de cura, foram encontrados para o compósito produzido com 100% de cimento Portland e com o resíduo de *Pinus* spp *in natura*.

A evolução das resistências à compressão dos compósitos com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS por SA e CCA em comparação aos valores determinados para os compósitos de Referência, podem ser verificadas na Figura 4.

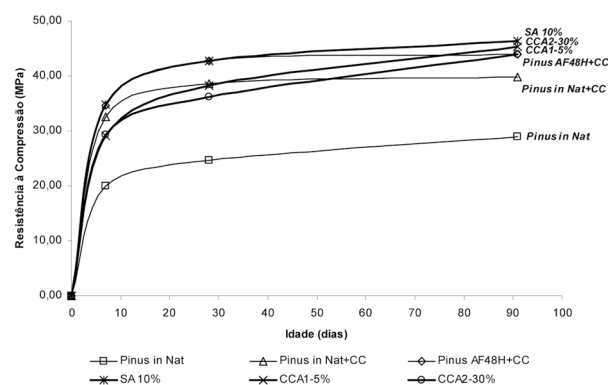


Figura 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp e substituições parciais do cimento portland – evolução da resistência à compressão com a idade.
Figure 4. Composites with residues of *Pinus* spp and partial substitutions of Portland cement – evolution of compression strength by ages.

Com relação aos resultados de resistência à tração dos compósitos, apresentados na Tabela 4, pode-se constatar que há diferenças significativas entre os valores das RT determinadas para os compósitos, a 95% de confiança.

O compósito produzido com substituição parcial do cimento Portland por 10% de SA apresentou RT 28d (4,21 MPa), 115,90% maior que a Ref. 1, 63,81% maior que a Ref. 2 e 57,68% maior que o Ref. 3.

Para o compósito produzido com 5% de CCA, a RT 28d (3,39 MPa), foi 73,85% maior que a obtida para a Ref. 1, 31,91% maior que a Ref. 2 e 26,97% maior que os valores determinados para a Ref. 3. Quanto a substituição por 30% de CCA, a RT 28d (3,74 MPa) é 91,79% superior a Ref.1, 45,53% superior a Ref.2 e 40,07% superior a Ref. 3.

Na Figura 5, encontra se ilustrada a comparação entre os valores determinados para a resistência à tração, determinada por compressão diametral dos corpos-de-prova, no tempo de cura de 28 dias.

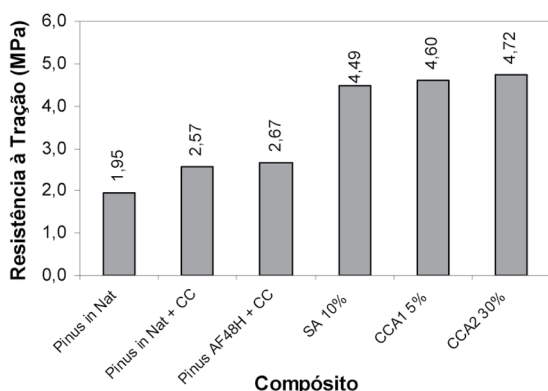


Figura 5. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp e substituições parciais do cimento Portland – resistência à tração.

Figure 5. Composites with residues of *Pinus* spp and partial substitutions of Portland cement – tension strength.

CONCLUSÕES

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

- O teor ótimo de substituição do cimento Portland por sílica ativa, determinado através de análise multivariada, foi de 10%, com 0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,6% de aditivo superplastificante, porém considerando as RC 91d médias determinadas com os compósitos de Referência;
- O teor ótimo de substituição do cimento Portland por CCA, também determinado através de análise multivariada, foi de 5%, com 0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,0% de aditivo superplastifican-

te, porém, os resultados confirmaram, também, os excelentes resultados do compósito produzido com 30% de CCA, 0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 3,2% de aditivo superplastificante;

- As características físicas dos compósitos produzidos com substituições parciais de SA e CCA, pouco diferiram das características dos compósitos de Referência;
- Mediante a análise das equações de regressão, verificam-se a possibilidade de substituição do cimento Portland dos compósitos por até 15% de SA e 40% de CCA;
- Os compósitos produzidos com substituições parciais otimizadas do cimento Portland por SA e CCA, 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;
- Nos compósitos com substituições parciais do cimento Portland pela SA e CCA, verificou-se problemas com o uso concomitante de teores elevados dos aditivos aceleradores de pega e superplastificante, principalmente no que tange ao aparecimento de macro-poros nos compósitos, durante as operações de moldagem.
- Diante dos resultados apresentados pelos compósitos, considera-se que o objetivo do estudo foi plenamente atingido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo Setorial 2008**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br>> Acesso em: 25 set. 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479: Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 2p.

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 4p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 3p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação.** ABNT: Rio de Janeiro, 1997. 3p.
- AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Editora Pini, 2000. 667p.
- CARMO, J.B.M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face a resistência mecânica e a viabilidade econômica.** 2006. 136p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- DAFICO, D.A.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para a produção de pozolana branca. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002. p.1671-1680
- FREITAS, L.C. **A baixa produtividade e o desperdício no processo de beneficiamento da madeira: Um estudo de caso.** 2000. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Mundial de Arroz.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 15 jul. 2009.
- ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. 600 p.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná – FUPEF, 2005. 247p.
- JOHN, V.M., AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA A CONSTRUÇÃO, São Paulo, 1993. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1993. p.29-38.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.
- MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** 2002. 146p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- MORAIS, S.A.L.; NASCIMENTO, E.A.; MELO, D.C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* Parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.3, p.461-470, 2005.
- NAHUZ, M.A.R. Atividades industriais com madeiras de *Pinus* – Atualidades e desafios. **Revista da Madeira**, Curitiba, n.83, p.10-12, 2004.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Editora Pini, 1997. 738 p.
- OLIVEIRA, C.T.A. **Água do poro de pastas de cimento de escória.** 2000. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- POUEY, M.T.F. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. 320p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Recebido em 12/04/2010

Aceito para publicação em 12/07/2010

