

ESTUDO DAS ADIÇÕES E ADITIVOS MINERAIS NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS AUTO-NIVELANTES

Emilly RACHEL FERREIRA DE FREITAS (1); Edilberto VITORINO DE BORJA (2); Marcos ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS (3); Alexandre DA COSTA PEREIRA (4); Joyce SOARES VIANA (5)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal-RN, e-mail: emilly_rachel@yahoo.com.br

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal-RN, e-mail: edilberto.borja@ifrn.edu.br

(3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal-RN, e-mail: marcos.anjos@ifrn.edu.br

(4) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal-RN, e-mail: alexandre.pereira@ifrn.edu.br

(5) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal-RN, e-mail: joyce_viana1@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar as propriedades de argamassas auto-nivelantes com adições minerais de metacaulim e cinza de biomassa da cana-de-açúcar, em substituição a uma parcela do cimento, para verificação da adequação dessas adições como material pozolânico e principalmente na redução da porosidade e permeabilidade da argamassa visando maior durabilidade. As análises das propriedades físicas e mecânicas ocorreram a partir da produção de cinco traços de argamassas, em amostras prismáticas e cilíndricas, através de ensaios no estado fresco e endurecido, além da caracterização dos materiais constituintes. Os traços moldados apresentaram resultados favoráveis no tocante ao comportamento fluído do material. As adições minerais utilizadas demonstraram poder pozolânico, em virtude da presença do teor de sílica com incremento da resistência à compressão, em relação ao de referência. Frente aos resultados satisfatórios, ressalta-se a importância da utilização da cinza de biomassa da cana-de-açúcar na redução dos impactos ambientais causados pela produção do cimento, além de possibilitar um destino nobre a este resíduo.

Palavras-chave: argamassa auto-nivelante, adição mineral, material pozolânico, cinza de biomassa da cana-de-açúcar.

1 INTRODUÇÃO

Na busca pelo aprimoramento nas diversas aplicações das argamassas surgiu a argamassa auto-nivelante, que é utilizada em concretos autoadensáveis e, principalmente, em pavimentações, já que possui a propriedade de adensamento por ação da gravidade de forma coesa e homogênea, ou seja, não necessita de intervenção mecânica ou manual para se acomodar. Isso acontece em virtude do material possuir uma reologia que o torna fluído o bastante a fim de desempenhar tal função, sem que aconteça exsudação e segregação.

Para atender as características acima citadas, vários estudos têm sido desenvolvidos a procura por adições minerais diversificadas, mas que não sejam promissoras de maiores prejuízos ao meio ambiente, ou seja, materiais que façam produzir benefícios as argamassas, de forma sustentável. Segundo Mehta e Monteiro (2008) na construção civil a escolha dos recursos a serem utilizados deve obedecer a quatro regras, são elas: Engenharia, Economia, Energia e por fim, Ecologia.

Segundo o relatório da FIESP/CIESP (2001) a cada tonelada da produção sucroalcooleira, são gerados cerca de, 6,2 Kg de cinza da biomassa, implicando assim em um grande volume de resíduos gerados anualmente e que não possui um devido fim, já que são misturados ao solo sem atribuir nenhuma função fertilizante. Insere-se também neste contexto ambiental a produção do cimento, que se utiliza de alto consumo de recursos naturais. Sendo assim, buscando minimizar os impactos ambientais causados por essas produções é que o presente trabalho foi desenvolvido.

Anjos (2009) em seu estudo comprova a atividade pozolânica da cinza de biomassa da cana-de-açúcar em pastas cimentícias, melhorando a microestrutura através da formação de hidratos mais resistentes.

Dentro desse contexto, o presente trabalho pretende analisar as propriedades de argamassas auto-nivelantes a partir da adição da Cinza de biomassa da Cana-de-açúcar em diferentes proporções, além da utilização do Metacaulim, objetivando, assim, a redução da porosidade e permeabilidade do novo composto, assim como, de verificar a adequação desses compostos como pozolana e aditivos minerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A argamassa auto-nivelante também chamada de auto-adensável, tem como principal propriedade o alto poder de escoamento. Sua utilização, segundo Martins *apud* Ortega (2003), produz benefícios como, por exemplo, a diminuição de possíveis imperfeições em pisos além de maior rapidez durante a execução das atividades. Esse produto foi introduzido há pouco tempo no Brasil, contudo, é uma tecnologia que vem fazendo crescer o mercado da construção civil Européia desde a década de 80, a partir de seu desenvolvimento que foi proveniente da Espanha (MARTINS, 2009). Como descrito anteriormente, a argamassa auto-nivelante deve conter reologia adequada para que assim venha exercer a função de adensamento próprio, no entanto, a determinação dos materiais e da dosagem, incluindo os aditivos, que irão compor o material precisa ser criteriosa, pois sua principal propriedade deve ser apresentada em conjunto com outras a fim de conferir a argamassa, no estado endurecido, propriedades mecânicas adequadas.

As adições minerais, em pastas cimentícias, que contenham materiais pozolânicos são utilizadas com o objetivo de melhorar a microestrutura através da reação pozolânica existente a partir da formação de hidratos mais resistentes (ANJOS, 2009). Para Petrucci (1993), materiais pozolânicos são aqueles de composição silicosa ou silico-aluminosa, que podem ou não ter poder aglomerante e que quando moídos e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento. O que implica em afirmar que juntos ao cimento esses materiais passam a ter o mesmo poder aglomerante. Sendo assim, é possível verificar que há um elevado potencial pozolânico na biomassa da cana-de-açúcar, uma vez que apresenta um alto teor de sílica, o que o torna em um novo recurso para a adição mineral e material pozolânico (ANJOS e MARTINELLI, 2008).

A determinação da classificação da pozolana é normatizada pela NBR 12653 (ABNT, 1992). Nela, define-se que todo e qualquer material pozolânico possui como elementos básicos Alumina, Óxidos de Ferro e Sílica. Dentre os tipos de classificação, na “classe N” (cinzas volantes provenientes da queima do carvão vegetal) se enquadra aqueles cujo percentual mínimo, dos elementos básicos de uma pozolana, seja de 70% e no máximo 4% de SO₃.

Um dos principais produtos da hidratação entre a cinza-metacaulim e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), esse por sua vez também é um dos responsáveis pela determinação das propriedades mecânicas da matriz, pois tem uma elevada capacidade de adesão (MEHTA E MONTEIRO, 2008). As adições, a partir do potencial pozolânico, são as responsáveis pela durabilidade da argamassa, em virtude de contribuírem no calor das reações de hidratação, além de atuarem no preenchimento dos vazios diminuindo consideravelmente, dessa forma, a porosidade, permeabilidade e conseqüentemente fazendo crescer a durabilidade da matriz (METHA E MONTEIRO, 2008).

A composição das argamassas e concretos auto-adensáveis é basicamente a mesma já que ambos têm o mesmo princípio de adensamento por ação da gravidade. Ou seja, tal composição se dá da seguinte forma: cimento, areia, brita (agregado graúdo, para concretos), aditivo superplastificante, que visa modificar a fluidez e adensamento do material, adições de finos ou materiais pozolânicos e por fim, os aditivos plastificantes, que tem como objetivo modificar a viscosidade do concreto, mantendo o material sem exsudação e segregação (ZHU e BARTOS, 2003).

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do presente trabalho, a princípio, buscou-se realizar a caracterização dos materiais para que fossem determinadas as proporções otimizadas para a argamassa, obedecendo aos parâmetros normativos e as características referentes a este tipo de material.

Feito os estudos iniciais para a determinação das dosagens, ficou estabelecido a confecção de cinco traços, sendo um deles o de referência (sem adições minerais) e os demais com de adições de Metacaulim e Cinza

da biomassa da cana-de-açúcar. As quantidades dos materiais constituintes e a nomenclatura adotada para as formulações estão demonstradas na Tabela 1. Tais adições foram utilizadas em substituição parcial à massa do cimento.

TABELA 1 – QUANTIDADE DOS MATERIAIS E NOMENCLATURAS DOS TRAÇOS

Nomenclatura	Descrição (% das adições)	Cimento (g)	Metacaulim (g)	Cinza de biomassa (g)	Areia (g)	Fator a/c
ARG 00M_00C	0% de Metacaulim e 0% de Cinza da biomassa	1200,0	0,0	0,0	1066,0	0,415
ARG 05M_05C	5% de Metacaulim e 5% de Cinza da biomassa	1080,0	60,0	60,0	1066,0	0,415
ARG 10M_00C	10% de Metacaulim e 0% de Cinza da biomassa	1080,0	120,0	0,0	1066,0	0,415
ARG 00M_10C	0% de Metacaulim e 10% de Cinza da biomassa	1080,0	0,0	120,0	1066,0	0,415
ARG 00M_20C	0% de Metacaulim e 20% de Cinza da biomassa	960,0	0,0	240,0	1066,0	0,415

A partir dos traços, buscou-se analisar o comportamento das argamassas quanto ao poder pozolânico e ou adições minerais, analisando desde as propriedades reológicas (estado fresco) até aquelas referentes às do estado endurecido.

3.1 Materiais

Além dos materiais convencionalmente utilizados em argamassas, cimento (aglomerante), areia (agregado miúdo) e água de amassamento, foram utilizados cinza da cana-de-açúcar, gentilmente cedida pela Usina Estivas localizada no município de Arés – RN, Metacaulim e aditivos químicos Mastermix e Glenium, também cedidos pelo fabricante BASF – The Chemical Company. A cinza adicionada foi moída por três horas e meia, contudo, ainda assim, para melhor aplicação do material quanto à finura, houve a necessidade de peneiramento na peneira de malha igual a 200µm para retirada das partículas com dimensões acima desta abertura. As figuras 1 (a) e (b) ilustram as adições minerais utilizadas na pesquisa.



FIGURA 1 – ADIÇÕES MINERAIS UTILIZADAS (A) METACAULIM E (B) CINZA DE BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR.

O cimento utilizado foi do tipo CP II Z 32 RS (Resistentes a Sulfatos) da marca Poty (grupo Votorantim). O agregado miúdo foi proveniente de rio da região metropolitana de Natal-RN.

3.2 Métodos

Antes da confecção dos corpos de provas, procurou-se caracterizar fisicamente os materiais. Para isso, inicialmente foi feita a granulométrica da areia, a partir da NBR 7181 (1984), que seguiu a seqüência de peneiras da série normal. O resultado apresentou uma areia classificada como muito fina e módulo de finura igual a 1,41. Na figura 2 ilustra-se a curva granulométrica da areia.

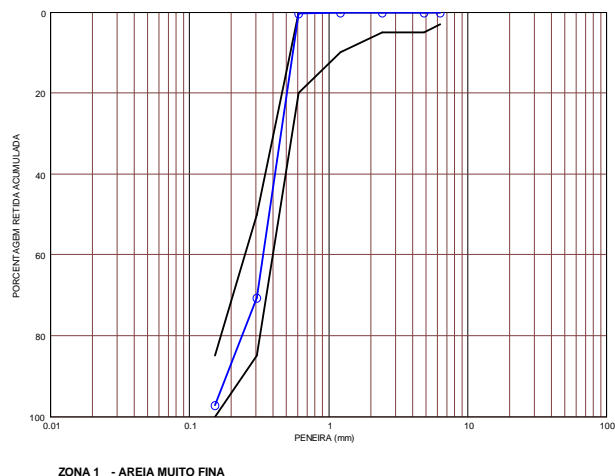


FIGURA 2 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA

As determinações das massas específicas e das massas unitárias aconteceram em acordo com as normas NBR 9776 (1987) e 7251 (1982), conforme apresentação na tabela 2.

TABELA 2 – MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

ENSAIO	AREIA	CIMENTO	METACAULIM	CINZA DE BIOMASSA
MASSA UNITÁRIA (kg/m ³)	1,57	1,10	0,56	0,66
MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	2,62	3,09	2,56	2,49

Na tabela 3 ilustra-se a composição química do cimento, metacaulim e da cinza de biomassa, respectivamente, através de fluorescência de raios-X por energia dispersiva em equipamento Shimadzu modelo EDX-720 no laboratório da Diretoria de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN.

TABELA 3 – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA EM %			
Elementos	Cimento	Cinza da Biomassa	Metacaulim
SiO ₂	18,881	72,694	52,938
Fe ₂ O ₃	3,426	9,609	6,916
Al ₂ O ₃	7,068	6,910	32,825
K ₂ O	2,005	4,708	1,635
SO ₃	5,381	0,915	0,883
TiO ₂	0,286	0,723	3,573
CaO	60,818	2,836	0,260
MgO	1,866	-	-
OUTROS	0,27	1,279	0,97

Após os ensaios de caracterização dos componentes das argamassas, os materiais foram separados e misturados para a confecção dos corpos de prova. Essa confecção aconteceu de acordo às normas NBR 7215 (1996) e NBR 13279 (2005), que descrevem os ensaios de compressão simples e o de tração na flexão e à compressão, assim como, a descrição da forma e dimensões dos corpos de prova.

Para a mistura das argamassas foi utilizado um misturador mecânico de argamassa (argamassadeira) com movimentos planetários em duas velocidades. As etapas para a mistura obedeceram as sequências normativas sendo, portanto, colocada a água de amassamento por etapas e os aditivos químicos misturados a uma quantidade de água ao final do processo. Para cada um dos traços foram confeccionados seis corpos de provas cilíndricos e três prismáticos. Na figura 3 visualiza-se a moldagem de amostras prismáticas.

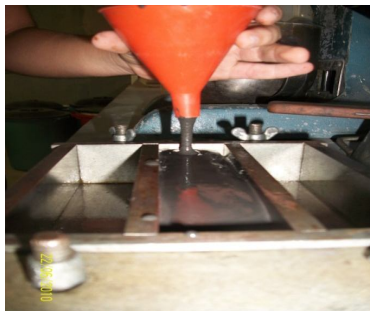


FIGURA 3 - CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

Após cada uma das moldagens dos corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, foram feitos ensaios de massa específica das argamassas no estado fluído. Passadas vinte e quatro horas, as amostras foram desmoldadas e realizados ensaios de massa específica na condição saturada seca e determinação do módulo de elasticidade dinâmico, através de equipamento de ultra-som denominado *PUNDIT* - Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester, em acordo com a NBR 15630 (2008). Esses procedimentos se repetiram aos sete e vinte e oito dias de cura. O processo de cura se deu em tanques de água situados nas instalações dos laboratórios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio grande do Norte - IFRN.

O ensaio de resistência a compressão foi realizado nas amostras cilíndricas na idade de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias. Para garantir uniformidade na distribuição da carga na superfície das amostras, em virtude de possíveis ausências de planicidade, todas as amostras foram capeadas antes de serem ensaiadas.

A determinação da resistência à tração na flexão foi realizada em amostras prismáticas de 4x4x16 cm aos 28 dias de idade, em prensa universal, conforme orientações da NBR 13279 (2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Argamassa no estado fresco

A quantidade de água de amassamento utilizada no início da hidratação está intimamente ligada ao volume de vazios capilares produzidos (MEHTA, 2008). Por isso, é importante que a mistura seja dosada de forma a não apresentar exsudação e segregação, ou seja, com um fator água/cimento adequado. Sendo assim, tomando como referência as orientações expressas por Mehta, durante a mistura dos traços verificou-se que não houve tais características, que acarretam no aumento dos vazios, conseqüente porosidade e por fim acaba diminuindo a resistência mecânica e aumentando a permeabilidade do material.

Quanto à massa específica das amostras no estado fluído, a argamassa de maior densidade, conforme demonstrado na Tabela 4, foi a ARG 05%M_05%C, as demais se mantiveram com valores próximos.

TABELA 4 - MASSAS ESPECÍFICAS FLUÍDA

MASSAS ESPECÍFICAS FLUÍDAS (Kg/m³)	
ARG00M_00C	2085
ARG00M_10C	2091
ARG00M_20C	2077
ARG05M_05C	2124
ARG10M_00C	2086

4.2 Argamassa no estado endurecido

- Massas específicas na condição superfície saturada seca

As massas específicas nas condições saturadas secas informam o processo de hidratação da pasta, podendo ser feita uma relação com a porosidade, como comprovado na Figura 5 (a), (b) e (c), que esclarece, que com as idades alcançadas a argamassa apresenta-se mais ou menos densas. Os traços ARG00M_00C, ARG05M_05C e ARG10M_00C mostraram resultados favoráveis, com alcance das idades, o que denota redução na porosidade. Já os traços ARG00M_10C e ARG 00M_20C, com o passar do tempo apresentaram diminuição das massas específicas na condição saturada seca o que implica na não diminuição dos poros com a hidratação.

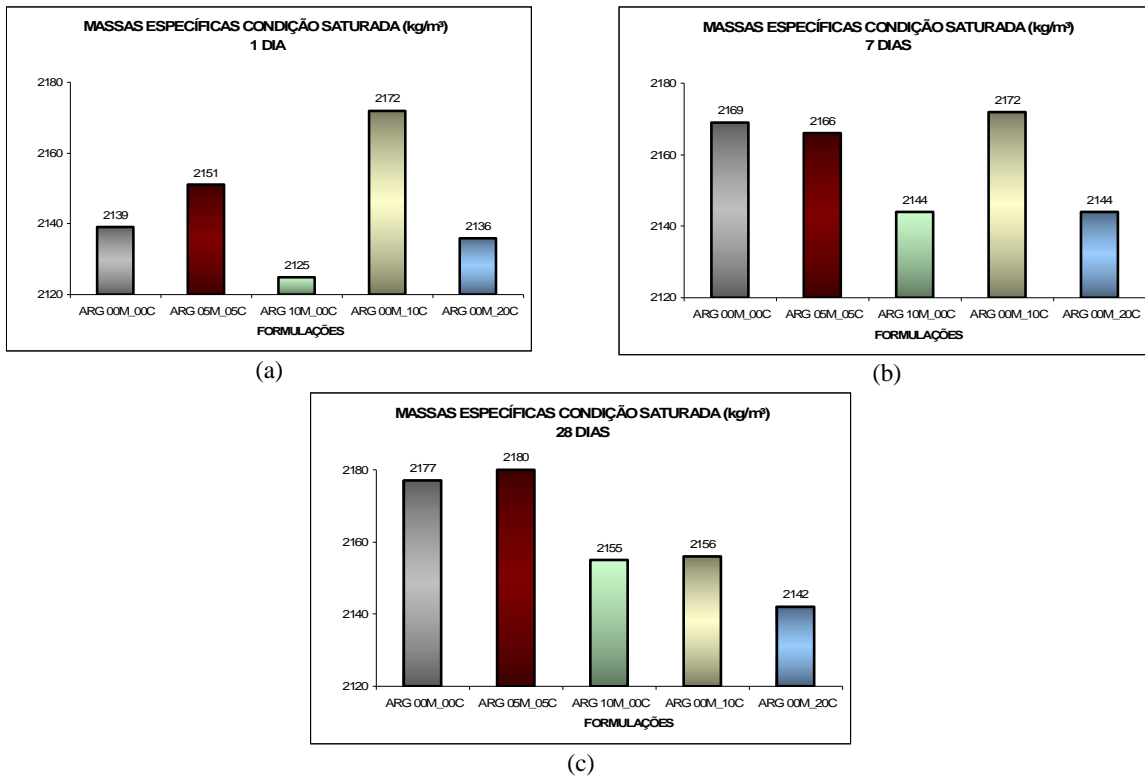


FIGURA 4. MASSAS ESPECÍFICAS NA CONDIÇÃO SUPERFÍCIE SATURADA SECA (A) 1 DIA, (B) 7 DIAS E (C) AOS 28 DIAS

- Módulo de elasticidade dinâmico

Através do Módulo de Elasticidade é que se determina a capacidade de deformação da argamassa no estado endurecido, essa característica está diretamente relacionada com a durabilidade do material (CINCOTTO et al., 1995). Neste caso, em virtude da aplicação da argamassa é extremamente importante a verificação desta capacidade, já que existem deformações diárias através das cargas aplicadas sobre os pisos.

Sendo assim, a partir dos estudos obtidos para a análise da capacidade de deformação da argamassa auto-nivelante, objeto desse estudo, conforme demonstrado abaixo na Tabela 5 é possível verificar que o traço que apresentou maior capacidade de deformações com um período de cura de 1 (um) dia, foi aquele com adição mineral de 10% de Metacaulim, esse resultado aproximou-se do obtido pelo traço de referência. Aos 7 (sete) dias de cura os módulos de elasticidade das amostras continuaram crescendo, a partir das reações de hidratação, continuando a apresentar maior resultado o traço com 10% de Metacaulim. Com 28 dias as amostras permaneceram praticamente estabilizadas, pois houve em alguns casos apenas um pequeno acréscimo nas capacidades de deformação, contudo, o traço com 5% de Metacaulim e Cinza obteve um acréscimo no módulo, superior aos demais períodos e traços.

TABELA 5 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS AMOSTRAS

FORMULAÇÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)		
	1 DIA	7 DIAS	28 DIAS
ARG00M_00C	20	31	30
ARG00M_10C	12	28	30
ARG00M_20C	17	26	29
ARG05M_05C	18	28	33
ARG10M_00C	19	29	30

As respostas apresentadas no ensaio para a determinação dos módulos de elasticidade foram favoráveis, pois descrevem a capacidade de deformação da argamassa, frente ao resultado de referência e ao comportamento das reações de hidratação dos materiais utilizados.

- Resistência à compressão e à tração na flexão

Conforme a Tabela 6, o traço de referência demonstrou-se com resistência igual a 32,0 e 33,6 MPa, respectivamente, aos 7 e 28 dias. Quando comparado aos demais traços que apresentaram as adições, é possível verificar que apenas o traço com 20% da Cinza de Biomassa não apresentou um resultado favorável, pois nas idades aos quais foram feitos os ensaios de compressão, em nenhuma delas a resistência deu igual ou superior.

Diante das resistências alcançadas verifica-se que em todos os casos houve acréscimo na resistência com o passar das idades, sendo o traço ARG05M_05C o que apresentou um elevado acréscimo da resistência à compressão. Contudo, os demais com exceção daquele com 20% de Cinza, tiveram também bons resultados nesse aspecto.

As resistências à tração na flexão obtiveram aumento em relação ao traço de referência, nas argamassas com 20% de Cinza e as de 05% de Metacaulim e 05% de Cinza da Biomassa. A argamassa com adição de 10% de Metacaulim não demonstrou resistência à tração favorável, uma vez que o seu resultado foi inferior ao do traço sem adição mineral, como demonstrado na Tabela 6.

TABELA 6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

TRAÇO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		TRAÇÃO (MPa)
	7 DIAS	28 DIAS	28 DIAS
ARG00M_00C	32,0	33,6	11,9
ARG00M_10C	33,0	49,0	11,0
ARG00M_20C	24,6	29,0	13,2
ARG05M_05C	33,6	51,0	13,2
ARG10M_00C	42,3	46,0	7,5

5 CONCLUSÕES

Os resultados expressados na Fluorescência de Raios-X, demonstram que existe potencial pozolânico na composição da Cinza e do Metacaulim, já que ambos apresentaram percentuais favoráveis de elementos básicos de uma pozolana, exigidos pela norma NBR 12653 (ABNT, 1992).

As adições minerais contribuíram no aumento da resistência à compressão em 80% dos traços, ou seja, isso significa que a argamassa auto-adensável quando dosada adequadamente junto às adições, produzem benefícios ao material, proporcionando altas resistências e mantendo a sua principal característica.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, M. A. S.; MARTINELLI, A. E. Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias. In: 18° CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008, Porto de Galinhas. Anais do 18° CBECiMat, 2008. v. único.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do modulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão .** Rio de Janeiro: 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro:1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Especificação.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro:1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro:1984.

ANJOS, M.A.S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados.** Tese de Doutorado – UFRN. Natal-RN. 2009.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim técnico n. 68

FIESP/CIESP. **Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa.** São Paulo, 2001. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2007

MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para Argamassa auto-nivelante.** Dissertação de Mestrado - UFPR. Curitiba –PR. 2009.

MEHTA, P. K., e P. J. M. MONTEIRO. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008;

ORTEGA, A. G. **Mortero Autonivelante.** III Jornadas Iberoamericano de Materiales de Construcción. San Juan, 2003.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland,** Editora Globo, Rio de Janeiro, 1993.

ZHU, W., e P.J. M. BARTOS. **Permeation properties of self-compacting concrete.** *Cement and Concrete Research* 33, 2003: 921–926.