

INCREMENTOS DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL EM MASSAS ARGILOSAS



OLAM – Ciência & Tecnologia, Rio Claro, SP, Brasil – ISSN: 1982-7784 – está licenciada sob [Licença Creative Commons](#)

Priscila Pires de Camargo [1]

Maiko Cristian Sedoski [2]

Sergio Roberto Oberhauser Quintanilha Braga [3]

Darlene Lopes do Amaral Oliveira [4]

INTRODUÇÃO

A intensidade do crescimento industrial e demográfico ocorrido nas últimas décadas trouxe como conseqüência a geração de quantidades significativas de resíduos, os quais podem ser gerenciados por diferentes formas. Atualmente, esforços tecnológicos têm sido concentrados nas ações que levem à utilização de tecnologias limpas, que possibilitam a eliminação total desses resíduos ou incorporação no processo produtivo que os gerou ou como matéria prima em outros processos.

O presente estudo foi desenvolvido em uma indústria de açúcar e álcool, na região central do estado do Paraná (PR), que apresenta sua capacidade instalada diária atual de 24.000 sacas de açúcar e 580.000 litros de álcool. A demanda diária de matéria prima é de 2.500 toneladas.

Esta indústria gera grande quantidade de fuligem em seu processo industrial ao realizar a queima do bagaço da cana-de-açúcar e para atender a Resolução nº 54/06 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) (PARANÁ, 2006) que estabelece critérios para a qualidade do ar foram implantados dois lavadores de gases onde são retidos os materiais particulados, neste caso a fuligem. Existe também o “barro”, um resíduo resultante da lavagem inicial da cana

de açúcar (águas de lavagem, terra, e fuligem resultante da queimada da cana de açúcar), que é gerado em grandes quantidades. A separação sólido/líquido é feita em caixas separadoras e o líquido sobrenadante é encaminhado para as lagoas de armazenamento de vinhaça.

De acordo com Oliveira et al. (2007), o setor de construção civil é excelente para incorporar resíduos, pois pode aceitar grandes quantidades de materiais, sendo a técnica de encapsulamento de resíduos em artefatos de construção civil uma das mais promissoras. A utilização de resíduos na fabricação de cerâmica faz com que ocorra uma redução no consumo de matérias primas naturais (TALLINI JUNIOR et al., 2007).

Esta pesquisa teve como objetivo realizar a reciclagem de dois resíduos sólidos gerados pela indústria de açúcar e álcool, o resíduo do lavador de gases (fuligem) e o resíduo de lavagem da cana de açúcar (barro), através de sua incorporação em formulações cerâmicas, visando demonstrar sua viabilidade na produção de blocos cerâmicos vermelhos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da Área de Estudo

A fase industrial de uma usina de açúcar e álcool é composta por seis centros: moendas, tratamento de caldo, fábrica de açúcar, fábrica de álcool, geradores de energia e tratamento de resíduos e efluentes. O processo produtivo industrial segue um fluxo contínuo (Figura 1).

Depois que a cana-de-açúcar sai do campo ela chega à indústria, onde guindastes mecânicos efetuam a transferência da matéria-prima do caminhão para o barracão de estoque. Em seguida a cana passa pela fase da lavagem, cuja meta é retirar o máximo possível de impurezas que chega junto a ela. Após a lavagem a água

residuária segue por gravidade para caixas de sedimentação (duas em série), para separação do sólido/líquido. A água segue para o tanque de vinhaça onde é recalçada para a lavoura. Quando a primeira caixa de sedimentação está cheia a água residuária é encaminhada para a segunda. O material sólido retido no primeiro tanque de sedimentação é removido com uso de pá carregadeira e caminhões basculantes. Este material é transportado para a lavoura e dispostos para recuperação de áreas erodidas, bem como incorporadas no solo juntamente com a torta de filtro.

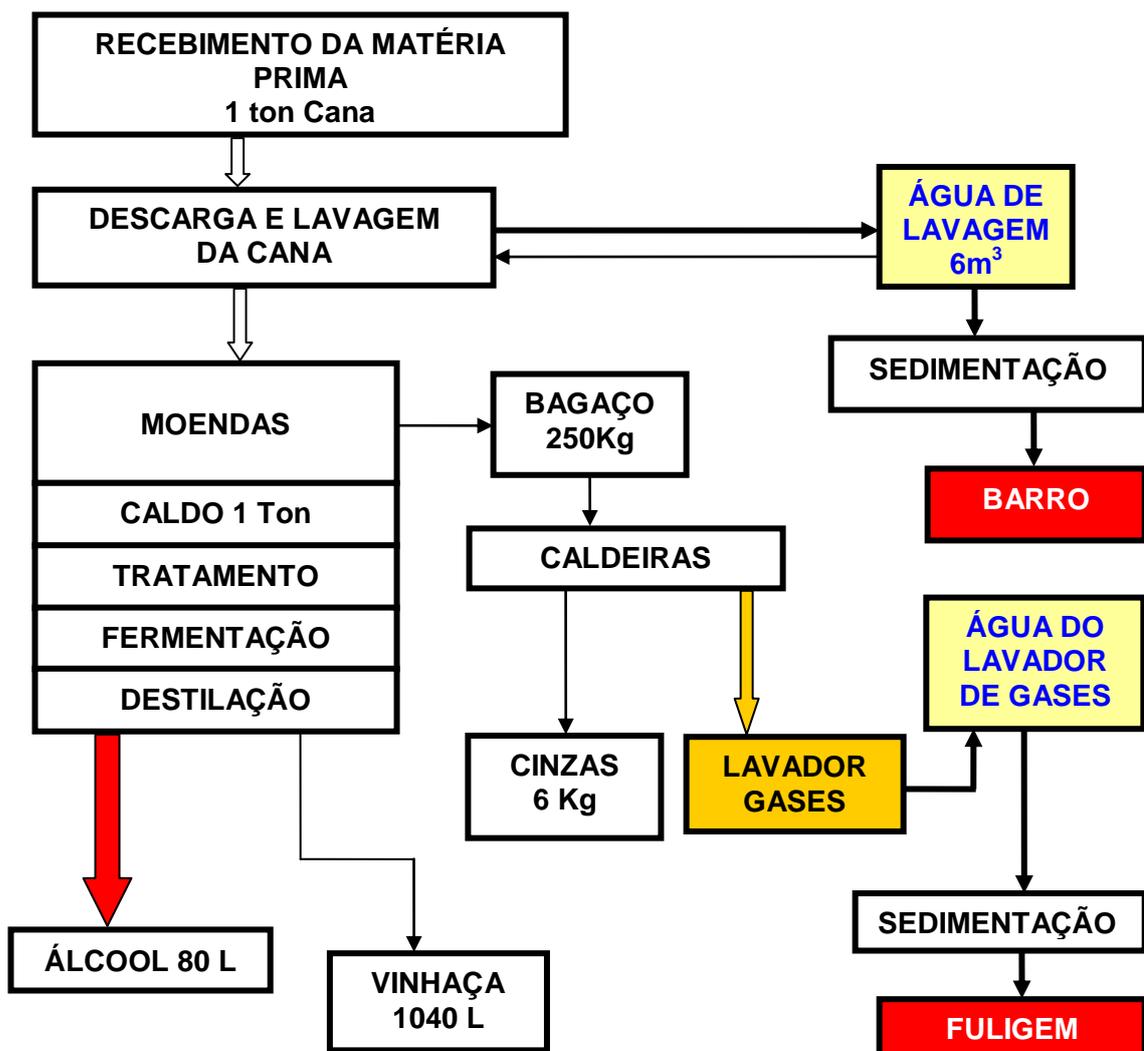


Figura 1: Fluxograma do processo industrial da indústria sucroalcooleira destacando as etapas para o processo de produção do álcool e os resíduos gerados. Elaborado pelos autores (2009).

Após o processo de lavagem, a cana segue através de esteira, até a mesa alimentadora, onde ocorre a preparação (picagem e desfibramento). Em seguida, ocorre a moagem da cana e extração do caldo, retirando-se daí, o bagaço. A partir desta etapa, o bagaço segue, de forma contínua, através de esteira de borracha e esteira alimentadora para a caldeira, onde é queimado para a geração de vapor e, conseqüentemente, produção de energia para a indústria.

A queima do bagaço gera grande quantidade de fuligem. Para a retirada destes materiais particulados foram implantados dois lavadores de gases. A água de lavagem gerada neste processo é encaminhada por gravidade para uma caixa de sedimentação (a qual não é a mesma da lavagem da cana de açúcar) onde são separados o sólido e o líquido. A água residuária resultante deste processo de separação por sua vez também é encaminhada à lagoa de efluentes (vinhaça), e o sólido (fuligem) é disposto em área agrícola, e após ser compostado é misturado à torta de filtro.

Caracterização Físico-Química dos Resíduos

Foram coletadas amostras representativas de fuligem e barro gerados no processo industrial, tomou-se cuidado de coletar várias amostras simples em diferentes lugares para comporem 40 quilos de uma amostra composta. Estas amostras foram secas em estufa à temperatura de 55° C, moídas e passadas em peneira de 2 mm, e posteriormente enviadas ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, para caracterização química e física. Para a caracterização química as amostras recebidas *in natura* foram inicialmente quarteadas, pulverizadas e secas a 100° C. A seguir foram analisadas através do método de Fluorescência de raio-X em equipamento PHILIPS, Modelo PW 2400 a partir de pó prensado.

Para a caracterização física foi feita a granulometria integrada utilizando peneiras Bertel entre as malhas *mesh* 8 e 80 e o granulômetro a *laser Cilas* 1064

para os tamanhos de partículas de 0,04 a 500 μm . As amostras recebidas *in natura* foram secas a 110° C e pesadas, a seguir o material foi desagregado em água desionizada e a análise foi realizada em peneiras e por difração de raio-X com tempo de ultrassom de 60 segundos e um total de 200 gramas de amostra.

Caracterização da Argila

A argila utilizada no experimento foi doada pela cerâmica Ki Base localizada no município de Luiziana (PR). Para caracterização da argila foram retiradas amostras simples em vários pontos do caixão alimentador e homogeneizadas em balde limpo para compor amostras compostas e, posteriormente, foram enviadas ao laboratório LAMIR para caracterização física por granulometria a *laser* e identificação mineralógica por difração de raio-X através de um difratômetro modelo PW1830 e foi utilizado na interpretação dos resultados o *software X`Pert HighScore*. A metodologia utilizada foi a da análise total ou do pó, e da análise orientada. Os minerais e/ou fases cristalinas foram identificados através da medida das distâncias interplanares (valores de "d") e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas.

Ensaio Tecnológico em Corpos de Prova

Para a confecção dos corpos de prova foram preparadas massas argilosas com as seguintes adições de resíduos (fuligem e barro): 0, 5, 10 e 15% em peso. Para cada tipo de massa argilosa foram preparados 9 corpos de prova (réplicas).

As misturas com argila e resíduo foram passadas em peneira marca Granulotest, com abertura de 355 μm , em seguida adicionado de 16 a 18% umidade as amostras, com auxílio de um borrifador tarado. A umidade utilizada foi calculada através da equação:

$$M_{\text{amostra}} \times 16\% \text{ de água} / 100\% \quad (\text{A})$$

Em que: M_{amostra} corresponde à massa de material seca a 110° C (usualmente: 200 gramas) e 16% de água valor intermediário.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos afim de não perder a umidade durante o procedimento experimental, foram pesadas aproximadamente 12 gramas de amostra e em seguida transferidas para um molde metálico de perfil retangular com dimensões de 60x20x5mm, aplicando 2,5 toneladas com auxílio de uma prensa hidráulica.

Os corpos de prova recém-prensados foram pesados e medidos, e postos a secar primeiramente ao ar e posteriormente em estufa a uma temperatura de 110° C por 2 horas, em seguida pesados e medidos novamente de modo a se determinar a umidade imediatamente após a prensagem (equação B), massa específica aparente após secagem em estufa (equação C), volume aparente (equação D) e retração linear após secagem na estufa (equação E).

$$hp = [(mv - ms) / ms] \times 100 \quad (\text{B})$$

$$MEA = m / Va \quad (\text{C})$$

$$Va = (Cs \times Ls \times Es) \quad (\text{D})$$

$$RL \text{ seca} = [(Cv - Cs) / Cs] \times 100 \quad (\text{E})$$

Em que: para a equação da umidade imediatamente após prensagem (hp), mv e ms, são respectivamente a massa do corpo de prova verde (logo após prensagem) e após secagem em estufa; para a massa específica aparente (MEA) m e Va representam a massa úmida do corpo de prova após secagem, e o volume do corpo de prova, respectivamente; para o volume aparente (Va) Cv, Ls e Es, são respectivamente, o comprimento do corpo de prova verde, a largura e a espessura do corpo de prova após secagem em estufa; para a retração linear seca (RL seca)

Cv e Cs são o comprimento dos corpos de prova verde e seco em estufa respectivamente.

Para determinação das propriedades tecnológicas das massas cerâmicas após prensagem e secagem, os corpos-de-prova preparados foram queimados em forno elétrico de laboratório nas temperaturas, 700° C, 800° C e 900° C, com taxa de aquecimento de 4° C/min, tempo de patamar de 3 horas e resfriamento realizado por convecção natural, desligando-se o forno elétrico. As propriedades tecnológicas determinadas foram: perda ao fogo (equação F), retração linear de queima (equação G), absorção de água (equação H) de acordo com a NBR n° 13.818 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997).

As medidas dos corpos de prova cerâmicos foram realizadas antes e após a sinterização, como comprimento, largura, altura onde foram obtidos com o auxílio de um paquímetro e pesados através de balança analítica de precisão de 4 casas decimais, a fim de observar as variações dimensionais, e em seguida foi feito registro fotográfico para avaliar as variações da cor de queima e variações dimensionais dos corpos de prova.

$$PF = [(ms - mqs) / mqs] \times 100 \quad (F)$$

$$RL \text{ queima} = [(Cs - Cq) / Cq] \times 100 \quad (G)$$

$$AA = [(mqu - mqs) / mqs] \times 100 \quad (H)$$

Em que: para a equação da retração linear de queima (RL queima) Cs e Cq são respectivamente os comprimentos dos corpos de prova sinterizados em forno elétrico; para perda ao fogo (PF) ms e mqs são respectivamente a massa seca em estufa e em forno elétrico respectivamente dos corpos de prova; para a absorção de água (AA) mqs e mqu são respectivamente a massa dos corpos de prova após queima em forno elétrico e massa do corpo de prova úmido após imersão em água por 24 horas.

Limites de Consistência de Atterberg

Os limites de consistência de Atterberg foram avaliados de acordo com as normas brasileiras NBR nº 6459/1984 (ABNT, 1984b) e NBR nº 7180/1984 (ABNT, 1984a) da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Através dos resultados obtidos calculou-se o índice de plasticidade (IP) de acordo com a equação I:

$$IP = LL - LP \quad (I)$$

Em que: LL é o limite de liquidez e LP o de plasticidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises químicas pelo método da fluorescência de raio-X (Quadro 1) evidenciaram que os principais constituintes do resíduo da água de lavagem da cana (barro) são o óxido de silício (SiO_2) e o óxido de alumínio (Al_2O_3) com percentuais de 34,8% e 21,2% respectivamente. Visto que a lavagem da cana (efetuada sobre as mesas alimentadoras) visa à retirada de matérias estranhas como terra, areia, palha, cinzas da queimada com a finalidade de obtenção de um caldo de melhor qualidade e aumento da vida útil dos equipamentos pela redução do desgaste, estas quantidades de sílica e alumina podem estar relacionadas às proporções de minerais argilosos presentes nas diferentes argilas dos locais de cultivo em que é retirada a cana para o processamento industrial. Muito embora a lavagem nunca seja feita na cana picada ocorre ainda um arraste de sacarose pela água mesmo que em pequenas proporções e isto pode ter contribuído para o alto valor de perda ao fogo (PF= 18,56%) observado.

Vale a pena ressaltar que a indústria sucroalcooleira desta pesquisa localiza-se em solos da Formação Serra Geral do Paraná, em que há predominância de caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro. O percentual de 21,2 % de óxido de alumínio

(Al₂O₃) no resíduo da água de lavagem da cana de açúcar (barro) pode classificar este material como aluminoso. Argilas com alto teor de alumínio na sua composição invariavelmente apresentam a caulinita como principal argilomineral. Ressalta-se que o resíduo do lavador de gases (fuligem) apresenta apenas 11,4% de Al₂O₃ e 35,2 % de óxido de silício (SiO₂).

Os valores de SiO₂ encontrados no resíduo do lavador de gases (fuligem) é muito inferior aqueles relatados por Cordeiro et al. (2004) e Paula (2006), para a cinza de bagaço de cana (CBC). Estes autores citaram que a composição média de sílica na CBC foi de cerca de 80%. Encontraram também o óxido de potássio (K₂O), óxido de magnésio (MgO), óxido de fósforo (P₂O₅) e óxido de cálcio (CaO) em menor quantidade e impurezas na forma de óxido de sódio (Na₂O), óxido de manganês (MnO), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), com teores inferiores a 1%. Cabe ressaltar que a composição química da cinza do bagaço pode variar em função do tipo de cana de açúcar cultivada, fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água e que o processo de combustão da cinza do bagaço é extremamente complexo pelo grande número de reações simultâneas e pela difusão de substâncias voláteis.

Quadro 1: Composição química dos resíduos da indústria sucroalcooleira.

Resíduo água Lavagem (barro) (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃
	34,8	21,2	17,1	4,4	1,4	1,2	0,5	0,3	0,3	0,1
	Cl	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	CuO	ZnO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Rb ₂ O	P.F.	
	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	18,56

Resíduo lavador gases (fuligem) (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃
	35,2	11,4	4,2	3,7	2,5	0,9	0,9	0,8	0,4	0,3
	Cl	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	CuO	ZnO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Rb ₂ O	P.F.	
	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	39,25

Elaborado pelos autores (2009).

O bagaço de cana de açúcar é composto aproximadamente de 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina. Após a queima, a parte remanescente é um material cuja composição deve revelar a presença predominante de dióxido de silício. Segundo Cook (1986), para queimas de 450° C e 500° C, o carbono é mantido na cinza e apresenta cor negra, sendo amorfo e combinado a outros elementos. Além disso, a incineração do bagaço de cana de açúcar em condições não controladas gera cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. A composição do resíduo do lavador de gases (fuligem) é semelhante a da cinza qualitativamente e mais diluída quantitativamente, pois apresenta de 30 a 70% de água. O resíduo do lavador de gases (fuligem) nos ensaios propostos neste estudo passou inicialmente por processo de secagem. O resultado de perda ao fogo de 39,25% do resíduo do lavador de gases (fuligem) pode ser explicado pelo o que foi aqui exposto.

Pode-se observar que o resíduo do lavador de gases (fuligem) utilizado nesta pesquisa foi de coloração preta e sua composição heterogênea, compreendendo restos de bagaço de cana de açúcar não queimados, de diferentes tamanhos, além de partículas de carvão que se desfaziam ao simples toque. Foi necessária a realização de uma retirada do material grosseiro através de moagem e posterior peneiramento em peneiras granulométricas de 1mm de diâmetro para em seguida serem preparadas as misturas argila mais resíduo do lavador de gases (fuligem).

O teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) foi de 17,1 % para a água de lavagem da cana de açúcar (barro) e de 4,2% para o resíduo do lavador de gases (fuligem). Teores de Fe_2O_3 acima de 3% em matérias primas para cerâmica vermelha favorecem o aparecimento da coloração vermelha. Portanto, pode-se inferir que o resíduo da água da lavagem da cana de açúcar (barro) por ter maior percentual de óxido de ferro acentuará a coloração vermelha dos corpos de prova testados. O titânio em percentagem superior a 1% também pode ser responsável por proporcionar variação de tonalidade após queima.

O K_2O é um agente fundente que atua no sentido de melhorar a vitrificação dos materiais cerâmicos, sendo essencial para a maioria das massas cerâmicas, exceto para as usadas na fabricação de materiais refratários. O óxido de potássio foi detectado nas duas amostras analisadas, muito embora em pequenas proporções. O MgO e o CaO agem também como agentes fundentes e tendem a baixar a faixa de temperatura de sinterização da massa cerâmica. Ambos os resíduos apresentaram teores destes óxidos muito embora os percentuais encontrados no resíduo do lavador de gases (fuligem) foram maiores.

Os gráficos das distribuições granulométricas evidenciam que a fração de partículas com diâmetro médio equivalente $< 2 \mu m$ foi de 14% para a argila da Cerâmica Ki Base (Figura 2) e de 13% para o resíduo da água de lavagem da cana de açúcar (barro) (Figura 3), enquanto que para o resíduo do lavador de gases (fuligem) (Figura 4) os valores foram inferiores 3%. Pode-se observar que na distribuição granulométrica de todos os materiais testados há predomínio de partículas da fração grosseira (silte). Segundo Holanda e Vieira (2002), a distribuição granulométrica da massa cerâmica poderá interferir na estabilidade dimensional à medida que o tamanho, o formato, a rugosidade e a homogeneização do pó determinarem o preenchimento do molde de prensagem e, posteriormente, determinarem os pontos de contato entre as partículas, pontos, estes, onde ocorrem as reações de sinterização.

Pode-se observar que os valores de D_{10} , D_{50} , D_{90} e $D_{médio}$ foram muito próximos (Quadro 2) para a argila e o resíduo da água de lavagem da cana enquanto que os valores para o resíduo do lavador de gases foram muito superiores.

Quadro 2: Resultados de análise granulométrica integrada por peneiramento e difração a *laser* evidenciando os finos abaixo de 80 micrômetros.

Amostras	Argila Cerâmica Ki base	Resíduo água de lavagem	Resíduo lavador de gases
D 10%	1,51	1,47	6,49
D 50%	14,15	14,43	26,32
D 90%	49,9	40,9	61,5
D médio	20,85	17,94	30,53

Elaborado pelos autores (2009).

D_{10} , D_{50} , D_{90} são percentagens (10, 50 e 90%) as quais as partículas encontram-se abaixo do diâmetro especificado.

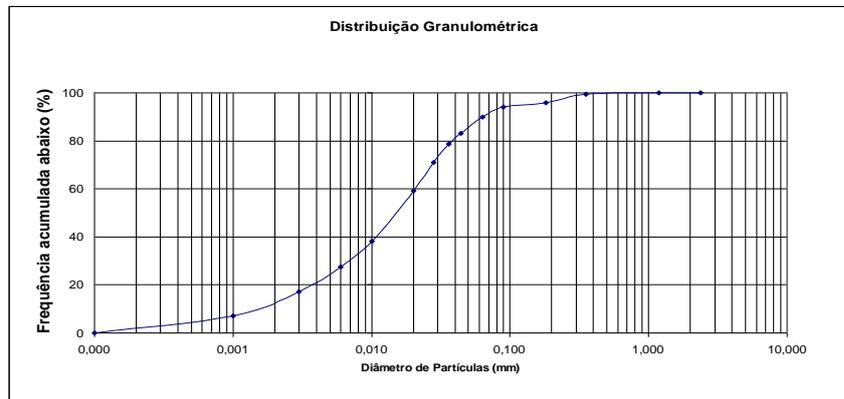


Figura 2: Distribuição granulométrica acumulada: Argila cerâmica Ki base. Elaborado pelos autores (2008).

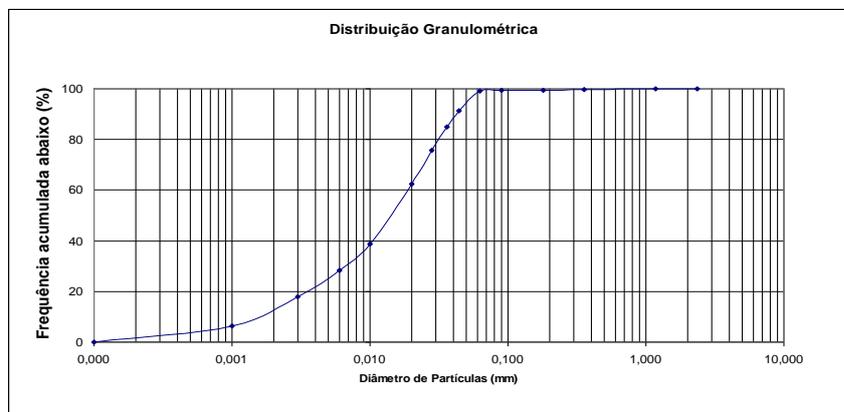


Figura 3: Distribuição granulométrica acumulada: Resíduo água de lavagem da cana (barro). Elaborado pelos autores (2008).

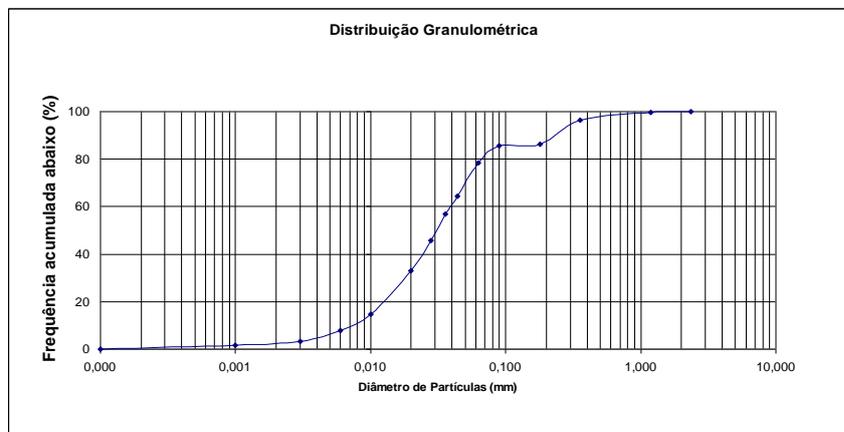


Figura 4: Distribuição granulométrica acumulada: Resíduo lavador de gases (fuligem). Elaborado pelos autores (2008).

Na Figura 5a estão expostos os difratogramas da argila da Cerâmica Ki Base. A letra "N" ao lado da identificação da amostra significa orientada natural, a letra "G" ao lado da identificação da amostra significa orientada saturada com etileno glicol e a letra "C" ao lado da identificação significa que a amostra foi calcinada. A Figura 5b apresenta o difratograma da amostra *in natura*.

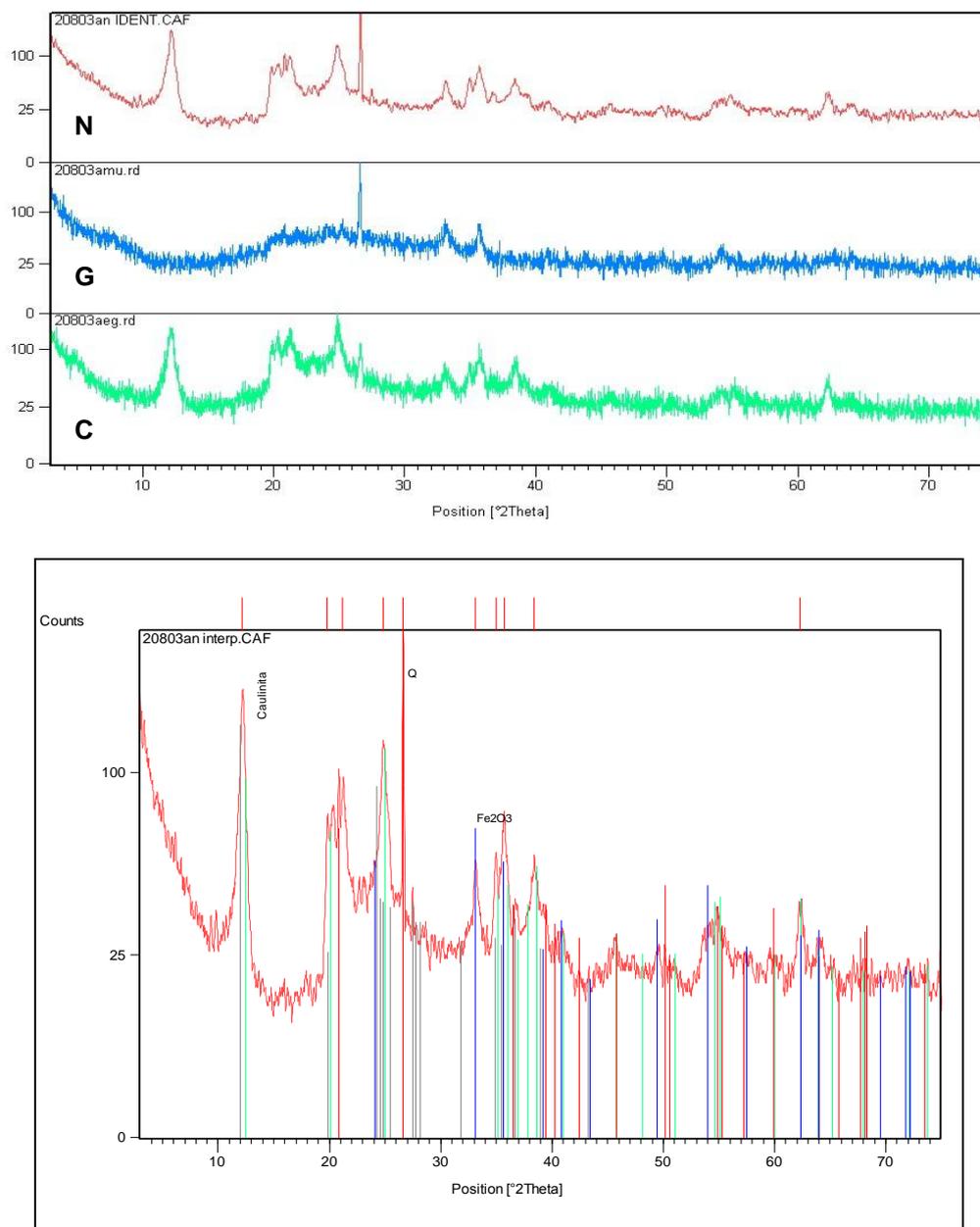


Figura 5: a) Difratogramas da argila da Cerâmica Ki Base; b) Difratograma da amostra *in natura*. Elaborado pelos autores (2008).

Pode-se evidenciar através dos difratogramas que a argila da Cerâmica Ki Base tem como constituintes o argilomineral tipo 1:1 caulinita não expansiva, o mineral primário quartzo (da fração areia) e o óxido de ferro hematita (Quadro 3). Ressalta-se aqui que no processo de sinterização parte da caulinita presente na fração argila é também calcinada (desidroxilação), além de também ocorrer perdas de água estrutural neste processo.

Quadro 3: Lista dos minerais presentes na argila da Cerâmica ki Base.

Código	Contagem	Mineral	Fórmula
29-1488	44	Caulinita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$
33-1161	33	Quartzo	$Si O_2$
24-0072	31	Hematita	$Fe_2 O_3$

Elaborado pelos autores (2009).

O Quadro 4 apresenta os limites de consistência de Atterberg para as massas preparadas. Pode-se observar que os resíduos incorporados à argila tiveram comportamento diferentes, enquanto o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP) sofreram um decréscimo em função do aumento do resíduo da água de lavagem da cana de açúcar (barro) estes índices aumentaram quando no acréscimo do resíduo do lavador de gases (fuligem), com exceção do IP. LL é o teor de umidade que separa o estado líquido do plástico, e as massas argilosas apresentaram valores acima de 50% o que indica alta compressibilidade.

Quadro 4: Limites de Atterberg para as massas cerâmicas preparadas

Resíduo da água lavagem	Argila + 0% Resíduo	Argila + 5% Resíduo	Argila + 10% Resíduo	Argila + 15% Resíduo	100 % Resíduo
LL	77,4	72,0	72,4	71,2	57,5
LP	38,2	34,0	38,0	35,4	36,5
IP	39,2	38,0	34,4	35,8	21,0
Resíduo do lavador de gases	Argila + 0% Resíduo	Argila + 5% Resíduo	Argila + 10% Resíduo	Argila + 15% Resíduo	100 % Resíduo
LL	77,4	85,2	81,3	77,0	ND
LP	38,2	46,5	44,5	40,2	ND
IP	39,2	38,7	36,8	36,80	ND

Legenda: L= Limite de liquidez, LP= Limite de plasticidade e IP= índice de plasticidade. Elaborado pelos autores (2009).

O LP é a quantidade de água necessária para alcançar uma consistência plástica, observou-se que as massas cerâmicas incorporadas com resíduo da água de lavagem da cana de açúcar (barro) necessitaram de menor teor de água para desenvolver sua plasticidade. O IP indica a faixa de consistência plástica, os resultados mostram que as massas argilosas apresentaram valores da ordem de 21,0 a 39,2%, o que a caracterizam como altamente plástica ($IP > 15\%$), exceto para o resíduo do lavador de gases (fuligem).

Na Figura 6 estão representados os dados de umidade após prensagem e massa específica aparente (MEA) em temperatura ambiente (MEA verde) e após secagem em estufa a 105°C (MEA seca). Pode-se observar que para a mesma pressão de compactação a umidade após a prensagem das massas argilosas com incrementos de resíduos aumentou em relação á testemunha (massa argilosa sem incremento de resíduo) com exceção da mistura de argila + 15% de resíduo do lavador de gases (fuligem). As misturas de um modo geral comportaram-se bem na conformação por prensagem, pois os corpos de prova não apresentaram defeitos de conformação e secagem.

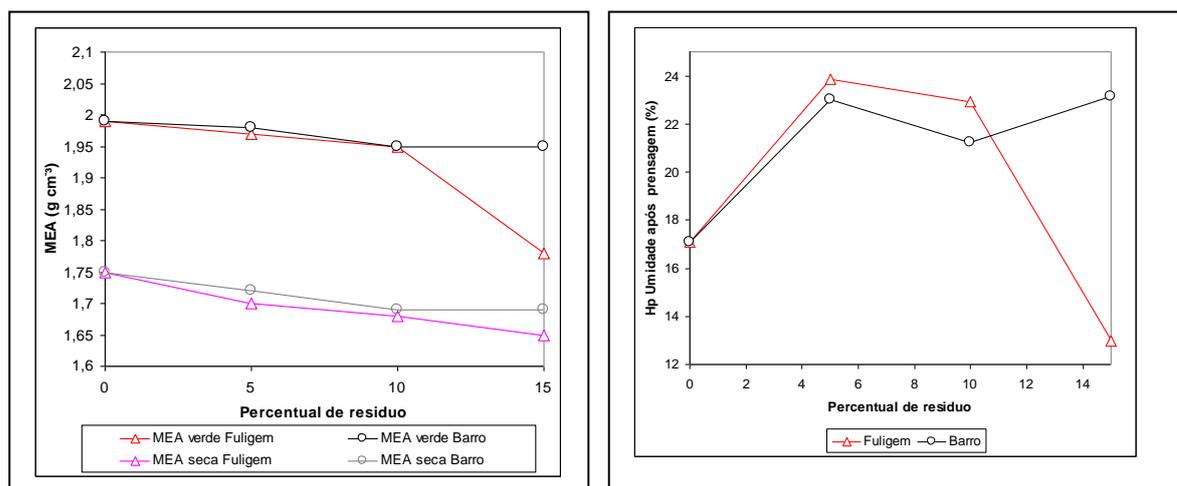


Figura 6: Valores da umidade das misturas após prensagem (hP) em g/cm^3 e da massa específica aparente verde (MEA verde) e seca em estufa a 105°C (MEA seca) das misturas em g/cm^3 . Elaborado pelos autores (2009).

Os valores de MEA verde (temperatura ambiente) para as diferentes massas propostas se mantiveram muito próximos com exceção da MEA verde da massa argilosa com 15% de resíduo do lavador de gases (fuligem) a qual sofreu um decréscimo a exemplo da umidade de prensagem. Nas peças cerâmicas, os argilominerais atuam como uma liga para os constituintes no estado verde e também conferem plasticidade para modelagem do corpo quando na presença de água. Os valores da MEA seca (após secagem em estufa a 110° C) tiveram ligeiro decréscimo com o acréscimo de ambos os resíduos. Os resultados da MEA seca para todas as massas argilosas propostas foram menores do que a MEA verde indicando que as misturas apresentaram densidades aparentes diferentes após secagem.

Os resultados da retração linear das formulações cerâmicas secas em estufa em 110° C (Figura 7) evidenciam que a incorporação dos resíduos nas massas cerâmica resultou em um aumento da retração linear dos corpos cerâmicos. Pode-se observar que os valores da retração linear seca estão abaixo de 7,96% que são os recomendados para a fabricação de cerâmica vermelha (HOLANDA; VIEIRA, 2002).

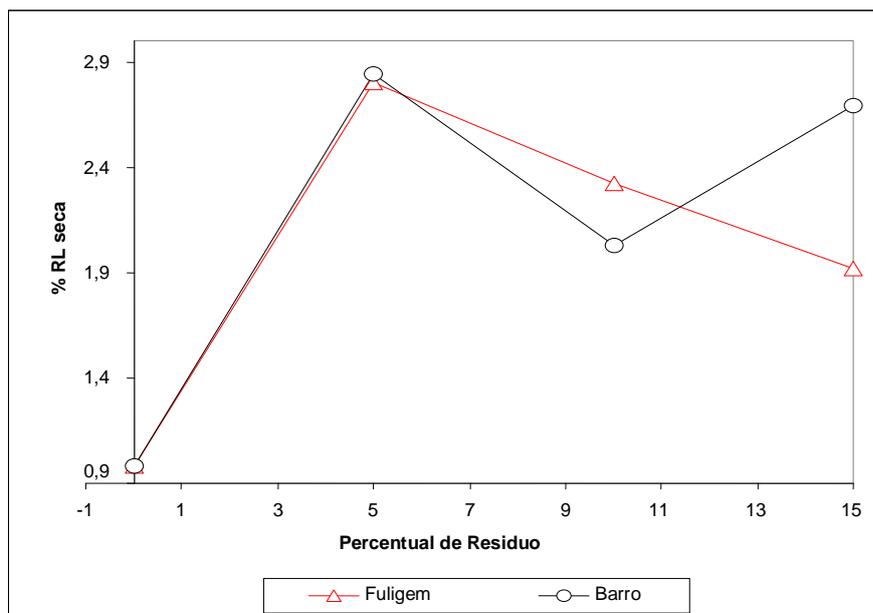


Figura 7: Retração linear seca.
Elaborado pelos autores (2009).

Observou-se que a retração linear aumenta significativamente para todos os corpos cerâmicos quando aumentada a temperatura de sinterização, independente da quantidade de resíduo adicionado (Figura 8). A qualidade de um bloco mede-se através do grau de contração devido á queima. Normalmente uma boa qualidade de bloco cerâmico possui contração abaixo de 8% na faixa de 1,19 a 7,33 % segundo a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT, 1997). Pode-se evidenciar que todos os resultados da retração linear de queima das massas argilosas deste estudo estiveram abaixo deste valor.

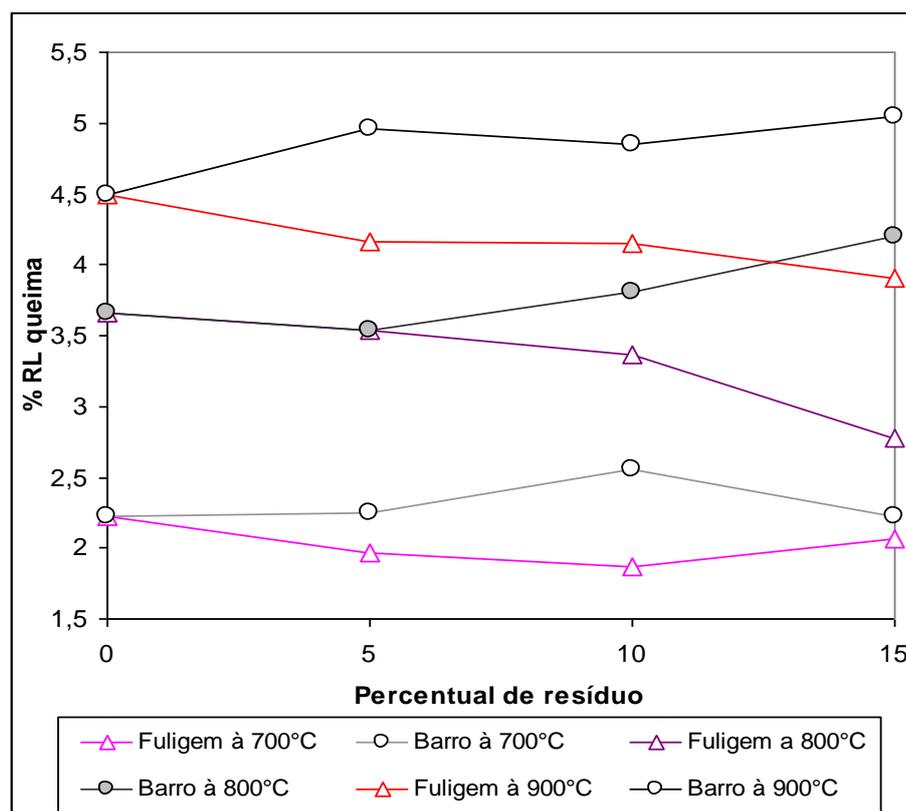


Figura 8: Retração linear dos corpos cerâmicos sinterizados
Elaborado pelos autores (2009).

Em relação ao comportamento da variação da perda de massa ao fogo (Figura 9) pode-se observar que os corpos cerâmicos sinterizados em maiores temperaturas foram os que apresentaram maior variação e que a perda ao fogo foi

maior nos corpos cerâmicos incorporados com o resíduo da lavagem da cana de açúcar (barro) do que com o resíduo do lavador de gases (fuligem). Essas variações de massa devem-se, principalmente, a eliminações de matéria orgânica, perda de água por desidroxilação e descarbonatação. Quando comparamos os valores de perda ao fogo das massas argilosas com resíduo, com os da testemunha (massa sem resíduo) pode-se observar que as variações não foram significativas. A perda ao fogo para um bloco cerâmico deve ficar em torno de 15% (ABNT, 1997).

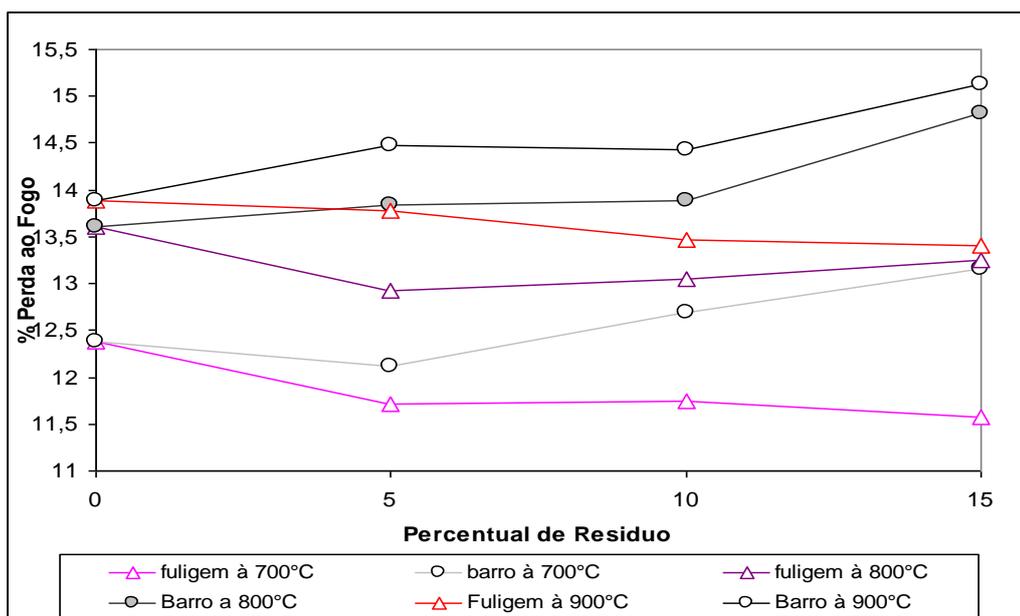


Figura 9: Perda ao fogo.
Elaborado pelos autores (2009).

A absorção de água (AA) como a retração após a queima reflete o grau de sinterização alcançado pelo material durante a queima. AA é um importante fator que interfere na durabilidade do bloco, pois está relacionada com a resistência dos ataques químicos e físicos do meio ambiente. A absorção de água (Figura 10) diminuiu com o aumento da temperatura de queima. Para a fabricação de tijolos e blocos cerâmicos a absorção de água permitida é de menos de 25% (ABNT, 1997) o que excedeu nos corpos cerâmicos em temperatura de 700° C, nas proporções de

10 a 15% de resíduos tanto para o resíduo da lavagem da cana de açúcar (barro) como para o resíduo do lavador de gases (fuligem).

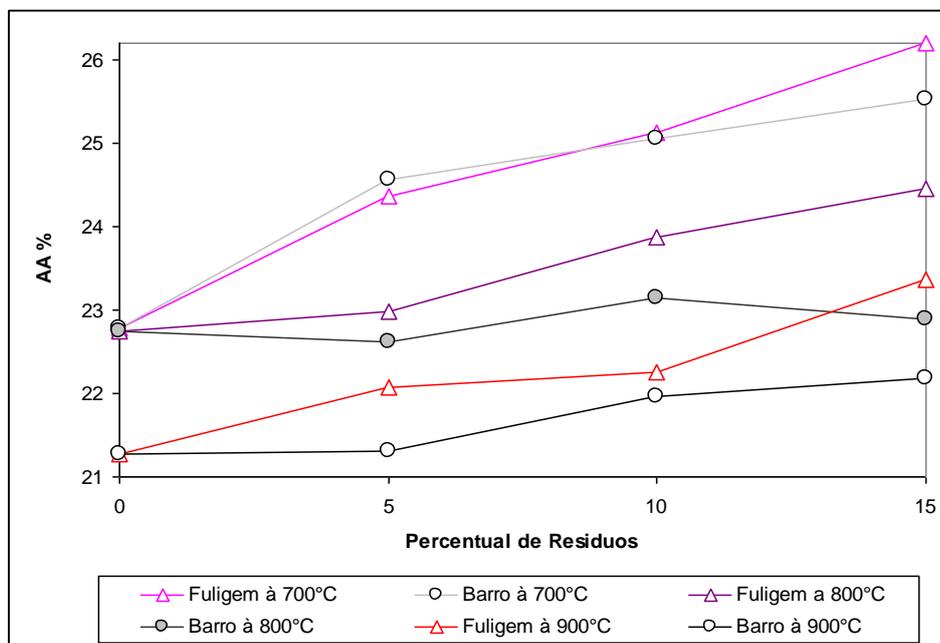


Figura 10: Absorção de água.
Elaborado pelos autores (2009).

Um critério importante usado para classificação de uma massa argilosa para a fabricação de cerâmica vermelha é a sua cor de queima, pode-se observar que devido aos elevados teores de óxidos corantes presentes nas massas argilosas, como Fe_2O_3 e TiO_2 , as peças cerâmicas tiveram cor de queima avermelhada, de acordo com Vieira et al. (2000) a presença dos óxidos Fe_2O_3 e TiO_2 auxiliam o aparecimento da coloração avermelhada em peças cerâmicas sinterizadas.

Na Figura 11, podem-se observar os corpos de prova referentes à queima em diferentes temperaturas, visando observar a variação da cor de queima das peças cerâmicas.

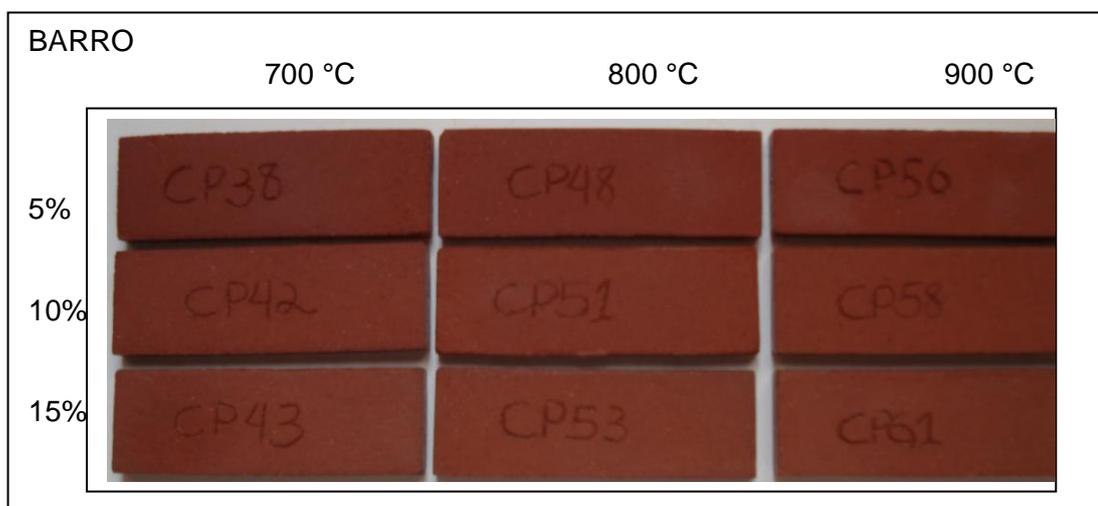
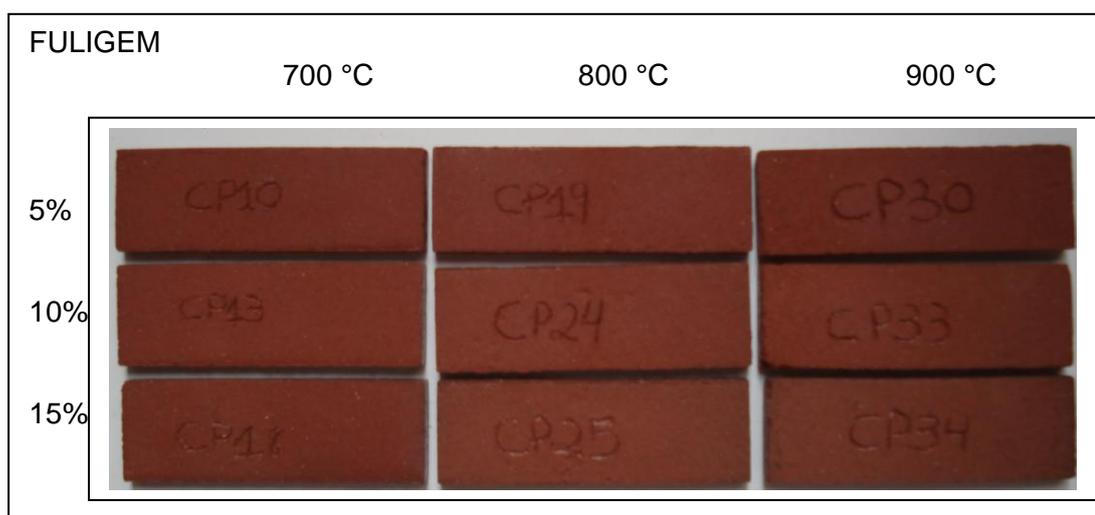
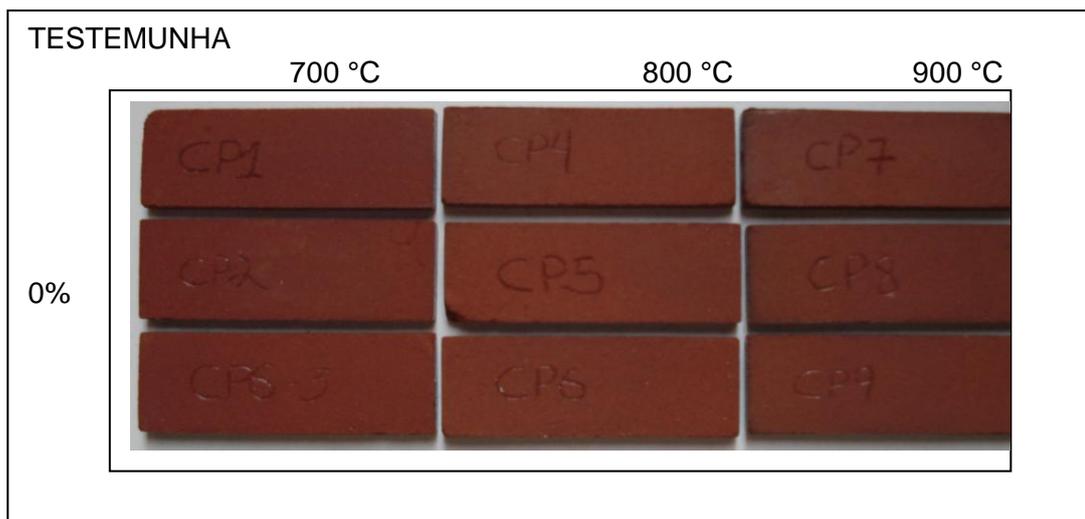


Figura 11: Corpos de prova, referentes às queimas realizadas
Elaborado pelos autores (2009).

Os corpos de prova (CP) com adição de resíduo do lavador de gases (fuligem) apresentaram coloração mais clara, do que os corpos de prova com adição de resíduo de águas de lavagem da cana de açúcar (barro). Nestes corpos de prova foi possível visualizar pequenos pontos negros, indicando a presença do resíduo do lavador de gases (fuligem), além de textura áspera em relação ao toque, diferente dos corpos de prova com adição de resíduo de águas de lavagem da cana de açúcar (barro), que apresentaram superfície lisa. Os corpos de prova com adição do resíduo do lavador de gases (fuligem), com o aumento de temperatura tiveram a intensidade de cor vermelha diminuída e maiores deformações puderam ser visualizadas.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

Os principais constituintes dos resíduos foram a SiO_2 e a Al_2O_3 com percentuais de 34,8% e 21,2% respectivamente para o resíduo de águas de lavagem (barro), enquanto que o resíduo do lavador de gases (fuligem) apresentou porcentagens de 11,4% de Al_2O_3 e 35,2 % de SiO_2 .

Dos resíduos avaliados há predomínio de partículas da fração grosseira (silte).

Através dos limites de consistência de Atterberg, as massas argilosas propostas apresentaram índice de plasticidade maior que 15%, o que as classificou como altamente plásticas (ABNT, 1984a; ABNT, 1984b).

As propriedades físicas retração linear (RL) e perda ao fogo (PF) apresentaram valores abaixo dos limites máximos recomendados para uso em cerâmicas vermelhas. A perda ao fogo (PF) foi maior nos corpos cerâmicos incorporados com o resíduo da lavagem da cana de açúcar (barro) do que com resíduo do lavador de gases (fuligem).

Os valores de absorção de água se enquadram aos níveis permitidos de <25%, exceto para os corpos cerâmicos sinterizados em temperatura de 700° C, nas proporções de 10 e 15% em ambos os resíduos.

As massas argilosas propostas apresentaram potencial de aplicação em produção de blocos cerâmicos e também para a moldagem de peças a mãos características de artesanato manual. Em relação à incorporação do resíduo do lavador de gases (fuligem) os resultados não foram tão satisfatórios quanto o resíduo de águas de lavagem da cana de açúcar (barro) em função dos pontos negros e das deformações apresentadas nos corpos de prova em relação ao aspecto visual.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13.818**: placas cerâmicas para revestimentos: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7.180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6.459**: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

COOK, D. J. Cement replacement materials: rice husk ash. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **Concrete technology and design**. 1 ed. London: Surrey University Press, 1986, v. 3, p. 141-152.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. ; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. Estudo do processo de moagem da cinza do bagaço de cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral para concreto. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO CONVENCIONAIS; HABITAÇÕES E INFRA-ESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL, 1., 2004, Pirassununga, **Anais...** São Paulo: IAC-NOCMAT, 2004. CD-ROM.

HOLANDA, J. N. F.; VIEIRA, C. M. F. Análise da situação atual e perspectivas de crescimento do setor de cerâmica vermelha estrutural de Campos dos Goytacazes - RJ. **Revista Mundo Cerâmico**, São Paulo, v. 82, p. 29-31, abr-mai/2002.

OLIVEIRA, L. T.; SILVA, J. B.; IDE, C. N. Avaliação das propriedades físicas de corpos de prova com a adição de lodo de reciclo de cromo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51, 2007, Salvador, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2007. CD-ROM.

PARANÁ (estado). Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. **Resolução 54**. Curitiba: Secretaria do Estado do Meio Ambiente, 2006.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

TALLINI JUNIOR, V. M.; MYMRINE, V.; RIBEIRO R. A. C.; PONTE, H. A. Reciclagem de Resíduos Industriais em Materiais Cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51, 2007, Salvador, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2007. CD-ROM.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 46, n. 297, p.14-17, jan-fev-mar/2000. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132000000100003>. Acesso em: 15 mar. 2009.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo realizar a incorporação dos resíduos - fuligem e água de lavagem da cana de açúcar (barro) em formulações cerâmicas. Foi realizada a caracterização química e física dos resíduos por meio de método de fluorescência de raios X, granulometria a *laser* e da argila por difração de raio-X. Foram analisados incrementos dos resíduos (0, 5, 10 e 15%). Os corpos de prova foram compactados e queimados em diferentes temperaturas (700° C, 800° C e 900° C). As seguintes propriedades foram determinadas: limites de Atterberg, perda ao fogo, retração linear seca e de queima, absorção de água e cor de queima. As massas argilosas propostas apresentaram potencial de aplicação para a produção de cerâmicas vermelhas e a cor de queima relacionada aos altos teores de Fe₂O₃ tendeu ao vermelho escuro. Foram observadas alterações na cor (pontos negros) e deformações para as massas com incremento de fuligem.

Palavras-chave: Argila. Resíduo Industrial. Cerâmica Vermelha. Propriedades Físicas. Queima. Reciclagem.

ABSTRACT

This work had the objective of realize the incorporation of wastes – soot and water from sugar cane washes soot and sugar cane (clay) in ceramic formulations. It was

carried out chemical and physical characterization of the wastes by X-ray fluorescence method, laser granulometry and X-ray diffraction of the clay. It was analyzed increments of the wastes (0, 5, 10 and 15%). The samples were compressed and burned at different temperatures (700, 800 and 900 °C). The following properties were determined: Atterberg limits, loss by fire, linear shrinkage and dry-firing, water absorption and color of burning. The proposed clay masses presented potential of application to the production of red ceramics and the color of burning related to the high levels of Fe₂O₃ tended to dark red. It can be observed changes in color (black spots) and deformations to the masses with increment of soot.

Key words: Clay. Industrial Waste. Red Ceramic. Physical Properties. Burning. Recycling.

Informações sobre os autores:

[1] Priscila Pires de Camargo – <http://lattes.cnpq.br/2693808177487697>
Graduanda em Tecnologia em Gerenciamento Ambiental na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Campo Mourão, Paraná.
Contato: pridecamargo@gmail.com

[2] Maiko Cristian Sedoski – <http://lattes.cnpq.br/8354821176907733>
Tecnólogo em Construção Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná; Técnico do Laboratório de Ensaios Tecnológicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná.
Contato: mackensi_maiko@hotmail.com

[3] Sergio Roberto Oberhauser Quintanilha Braga –
<http://lattes.cnpq.br/7199000210386101>
Docente nos cursos de Tecnologia e Engenharia de Produção Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná; Coordenador do Laboratório de Ensaios Tecnológicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná.
Contato: braga@utfpr.edu.br

[4] Darlene Lopes do Amaral Oliveira – <http://lattes.cnpq.br/6016602588660305>
Docente nos cursos de Tecnologia e Engenharia Ambiental e de Tecnologia e Engenharia de Produção Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná; Coordenadora do Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Paraná.
Contato: darlene@onda.com.br