

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Paulo Henrique Pereira Lima

Agregados reciclados de tijolos refratários para utilização em argamassa de proteção passiva de estruturas metálicas em caso de incêndio.

Belo Horizonte

Agosto de 2014

Paulo Henrique Pereira Lima

Agregados reciclados de tijolos refratários para utilização em argamassa de proteção passiva de estruturas metálicas

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem.

Orientador: Prof.Dr. Flávio Renato Padula

Belo Horizonte
Agosto de 2014

Lima, Paulo Henrique Pereira.

S586. Agregados reciclados de tijolos refratários para utilização em argamassa de proteção passiva de estruturas metálicas. Paulo Henrique Pereira Lima – Belo Horizonte: CEFET, 2014. 93f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
1. Resíduo refratário 2. Agregados reciclados.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

CDU: 620.1

Catálogo SISBIN/CEFETMG

Agregados reciclados de tijolos refratários para utilização em argamassa de proteção passiva de estruturas metálicas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem.

Prof.Dr. Flávio Renato Padula – Orientador

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Belo Horizonte, Agosto de 2014

RESUMO

A reciclagem dos resíduos refratários é uma das opções a uma política de produção sustentável. Além da possível redução em custo em matérias-primas (viabilidade do reprocessado de reciclagem) e de custos de destinação a aterros, o atendimento a requisitos legais de gestão de resíduos influencia fortemente no interesse em novas tecnologias de reprocessamento desses resíduos. Esse trabalho foi desenvolvido no intuito de apresentar uma tecnologia para reciclagem de resíduos refratários como agregado para materiais de proteção em situações de incêndio visando encontrar uma destinação nobre ao resíduo. Foram ensaios para caracterização do resíduo e após caracterização, o mesmo foi utilizado em substituição ao agregado miúdo. Os resultados demonstram que esse resíduo pode ser usado com agregado de argamassas para proteção passiva, sendo uma opção viável na reciclagem desse resíduo de forma sustentável.

Palavras-chave: resíduos refratários; agregados; matérias-primas recicladas; materiais para proteção de estrutura metálica.

ABSTRACT

The refractory waste recycling is an option to a policy of sustainable production. Besides the possible reduction in cost of raw materials (reprocessed viability of recycling) and disposal costs at landfills, compliance with legal requirements for waste management also strongly influences the interest in new technologies for reprocessing such waste. This work was developed in order to present a technology for recycling of waste refractory materials as aggregate for protection in fire situations in order to find a prime destination to the residue. Tests were carried out to characterize the waste characterization and after, it will be used instead of the fine aggregate in mortars.

Keywords: refractory waste; aggregate; recycled raw materials; protection material.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.2. JUSTIFICATIVA	11
1.3. OBJETIVOS	13
2. RESÍDUOS SÓLIDOS	14
2.1. Classificação de resíduos	14
2.2. Caracterização do problema	15
2.4. Materiais para proteção anti-incêndio	18
2.4.1 Alguns materiais comerciais	21
2.5. Efeito do calor na estrutura	26
3. CONCRETOS REFRACTARIOS	33
3.1 MATERIAIS PARA CONCRETO	34
3.1. Agregados	34
3.1.2. Resíduo refratário - Co-produto silico aluminoso	35
3.1.2. Argila	36
3.1.3 Vermiculita	38
3.2. Ligantes hidráulicos	41
3.2.1 Cimento de aluminato de cálcio (CAC)	42
3.2.1. Constituintes	43
3.3. Cimento Portland	43
3.3.1. Constituintes	44
4. MATERIAIS E METODOS	46
4.1.2 Desenvolvimento e avaliação dos compósitos cimentícios	46
4.2 Caracterização do resíduo	52
4.2.1 Preparação da amostra	53
4.2.4. Métodos de ensaios para caracterização do resíduo	53
4.2.4.1 Perda ao fogo – Forno mufla	53
4.2.4.2 Granulometria	54
4.2.4.3 Umidade balança termogravimétrica	55
4.2.4.4 Densidade	55
4.2.4.5 Perda ao fogo - TGA	57

4.2.4.6 DRX e FRX – Fases mineralógicas e Análise química	57
4.2.4.7 Resistência à flexão a temperatura ambiente (RFTA)	58
4.2.4.8 Resistência à compressão a temperatura ambiente (RCTA)	60
4.2.4.9 Variação linear permanente.....	60
4.2.5.0 Módulo elástico	61
5. RESULTADO E DISCUSSÕES	63
5.1 Caracterização do resíduo refratário <600um.....	63
5.2 Caracterização das composições com agregados refratários	66
5.2.1 RCTA RFTA e Densidade.....	73
5.2.2 Ensaio após Queima	77
5.2.3 Comparação com os resultados Pyrocrete.....	82
6. CONCLUSÕES.....	86
7. Sugestões para trabalhos futuros	88
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades Pyrocrete.....	25
Tabela 2 Propriedades Pyrolite	26
Tabela 3- Características do concreto superaquecido	28
Tabela 4-Fatores de redução para o aço (NBR 14323/2013).....	31
Tabela 5- Composição Química (% em óxidos) e perda ao fogo de argilas Bentonita.....	37
Tabela 6- Composição Química e densidade Vermiculita	39
Tabela 7- Absorção de água pela vermiculita.....	39
Tabela 8- Composição química da micro-sílica	40
Tabela 9- Cimento CAC comercial	43
Tabela 10- Citrato de sódio.....	47
Tabela 11- Vermiculita	47
Tabela 12- Reciclado sílico aluminoso	47
Tabela 13- Micro-sílica	48
Tabela 14- Cimento Aluminoso	48
Tabela 15- Descrição e quantidades dos materiais utilizados para confecção dos traços	49
Tabela 16- Quantidade de amostra	52
Tabela 17- Análise granulométrica	63
Tabela 18- Umidade.....	64
Tabela 19- Densidade.....	64
Tabela 20- Análise química FRX e Difração de raio-x	65
Tabela 21- Perda ao fogo	65
Tabela 22- RCTA E DMA/PA das composições A e B	67
Tabela 23-Teste de aderência, tempo de pega e fluência livre.....	69
Tabela 24- Granulometria das misturas secas	70
Tabela 25- AQ, DRX e Perda ao fogo	71
Tabela 26- Módulo de elasticidade	76
Tabela 27- Valores referência Pyrocrete	82

INDICE DE FIGURAS

Figura1 Resíduos refratários.....	16
Figura 2- Argamassa projetas	22
Figura 3- Fibras projetas.....	23
Figura 4- Placas de gesso	23
Figura 5 - Tinta intumescente.....	24
Figura 6- Curva temperatura – tempo de um incêndio real	27
Figura 7 Efeito da Temperatura na resistência do aço estrutural.....	29
Figura 8- Aquecimento de placas de aço Unwetted expostos em uma das faces ao fogo (gasolina)	30
Figura 9- Etapas de processamento do tijolo	36
Figura 10- Mistura C.....	49
Figura 11- Moldagem corpo-de-provas	50
Figura 12- Amostra para caracterizações físicas	50
Figura 13- Amostras para RCTA, RFTA e DMA/PA.....	51
Figura 14- Amostra para condutividade térmica	52
Figura 15- Prensa hidráulica Kratos	58
Figura 16 Esquema do ensaio de resistência à flexão a temperatura ambiente.....	59
Figura 17 - Esquema do ensaio de resistência à compressão a temperatura.....	60
Figura 18 Equipamento de ultra-som	62
Figura 19-Perda ao fogo agregado reciclado.....	66
Figura 20- Adição de H2O.....	68
Figura 21 Perda de umidade.....	68
Figura 22- Aderência, fluidez e tempo de pega	70
Figura 23 RCTA cura ao ar	73
Figura 24- Gráficos de DMA /PA	74
Figura 25- % Agregados x RCTA	74
Figura 26- % ligante x RCTA.....	75
Figura 27- Agregado/ligante x RCTA	75
Figura 28 RCTA após queima.....	78

Figura 29- RFTA após queima.....	79
Figura 30-DMA após queima	79
Figura 31- Densidade após queima	79
Figura 32- Porosidade após queima.....	80
Figura 33- Variação linear VLD.....	81
Figura 34- DMA composições x Pyrocrete.....	83
Figura 35- RCTA x Pyrocrete.....	83
Figura 36- RFTA x Pyrocrete	84
Figura 37- Variação linear x Pyrocrete	85
Figura 38- Condutividade Térmica x Pyrocrete	85

1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente preocupação em gestões produtivas com ênfase no desenvolvimento sustentável, a sociedade envolve-se cada vez mais na busca de tecnologias de reutilização de resíduos e utilização de recursos naturais conscientemente. Com a recente sanção da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), apresentando uma nova visão da responsabilidade por resíduos gerados, pela qual são compartilhadas as responsabilidades pelo ciclo durável dos produtos e definidas diretrizes de diferenciação de resíduos (passível de reciclagem) e rejeito (não passível de reaproveitamento), as indústrias investem em uma melhor gestão de utilização de recursos naturais priorizando a redução, reutilização e tratamento de resíduos sólidos gerados por sua atividade e produtos, e também a redução da demanda dos recursos naturais na produção de novos produtos. A implantação de rotas de retorno (Logística Reversa) de modo a facilitar a devolução dos resíduos aos geradores, também é um ponto fundamental apresentado na PNRS.

A indústria de materiais refratários fornece serviços e produtos para vários segmentos industriais, principalmente para o setor siderúrgico, tendo sua produção fortemente vinculada à produção de aço. A demanda produtiva de refratários tem grande solicitação de diversos tipos de recursos minerais, onde é necessário o beneficiamento a matéria primária, e/ou a transformação em matéria-prima sintética.

Há diversos aspectos ambientais relacionados à atividade das indústrias refrataristas: uso de recursos hídricos, uso de recursos minerais, emissão de gases e a geração de resíduos sólidos ao longo da cadeia produtiva e após uso industrial. A redução da geração dos resíduos sólidos refratários depende principalmente, do prolongamento da vida útil dos revestimentos refratários (performance), e da reutilização dos resíduos sólidos, preferencialmente como matéria-prima.

1.2. JUSTIFICATIVA

A reciclagem dos resíduos refratários é uma das opções a uma política de produção sustentável. Além da possível redução em custo em matérias-primas (viabilidade do reprocessado) e de custos de destinação a aterros, o atendimento a requisitos legais de gestão de resíduos também influencia fortemente no interesse em novas tecnologias de reprocessamento desses resíduos. Uma tecnologia inovadora de reutilização de resíduos refratários, certamente, contribuiria na preservação de recursos naturais e diminuiria drasticamente o passivo ambiental de muitas empresas.

Os resíduos refratários são materiais após o uso (post mortem) que ainda apresentam potencial de aplicação em categorias menos nobres dos processos onde as solicitações químicas, mecânicas e térmicas não são exigidas quanto às de suas aplicações iniciais. Contudo, devido as características de segurança estruturais que os refratários exigem, devem-se avaliar os potenciais de aplicação destes resíduos através de estudos de suas propriedades post mortem.

Esses resíduos ainda mantém suas propriedades refratárias mesmo após o uso, devido à presença de óxidos e fases mineralógicas refratárias, porém apresentam contaminantes que podem interferir nas propriedades físicas e químicas do refratário como matéria-prima reciclada, sendo necessário um estudo do impacto destes contaminantes antes do uso.

Os contaminantes presentes nos resíduos dependem do tipo de processo ao qual o revestimento refratário foi submetido e posteriormente ao processo de beneficiamento do mesmo. Algumas dessas contaminações são passíveis de redução nas frações mais grossas, porém as frações mais finas têm-se uma maior dificuldade de separação, sendo essas frações as quais interferem diretamente na matriz do refratário quando utilizadas.

Dentre as vantagens as quais as empresas podem se beneficiar são:

- Imagem diferenciada: as empresas que utilizarem o reprocessamento e/ou produto reprocessado poderão alcançar a imagem positiva de comprometimento com políticas sociais e ambientais;

- Atendimento a legislação: atendimento a PNRS, dentre outras legislações destinadas à gestão de resíduos sólidos e uso de recursos naturais;

- Redução de passivos ambientais: Redução da destinação de resíduos gerados pela atividade a aterros.

Devido ao grau de complexidade e a geração considerável de resíduos refratários, o estudo será uma oportunidade de criar uma tecnologia limpa (sustentável) visando minimizar os impactos ambientais e maximizar a vida útil dos recursos naturais não renováveis. Há a necessidade do conhecimento das características físico-químicas dos resíduos, teste de formulações de produtos (físicos e químicos) e a utilização/conhecimento de operações unitárias no processamento.

1.3. OBJETIVOS

A) Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um compósito cimentício com resíduos refratários para utilização como proteção de estruturas metálicas sujeita a exposição a altas temperaturas na possibilidade de ocorrência de incêndios.

B) Objetivos específicos:

O presente trabalho teve como objetivos específicos:

- Caracterizar o co-produto de reciclagem de tijolos refratário silico-aluminosos post mortem.
- Estudar as propriedades mecânicas e térmicas da argamassa anti-incêndio com agregado miúdo de resíduo reciclado.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS

Conforme definição NBR 10004:2004 Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT NBR 10004,2004)

2.1. Classificação de resíduos

De acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004 os resíduos são classificados em:

a)resíduos classe I;

b)resíduos classe II ;

– resíduos classe II A – Não inertes.

– resíduos classe II B – Inertes.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

2.2. Caracterização do problema

Refratários é uma categoria de cerâmicas técnicas. Refratários industriais são quase todos combinações complexas de óxidos cristalinos de alta fusão, além de carbetos, carbono e grafite. BARNA (1992).

A mais comum função dos refratários é conter altas temperaturas: é manter uma barreira sólida entre o “lado quente” e o ambiente externo. Uma vez que estes materiais são normalmente utilizados em fornos, altos fornos, incineradores e outras aplicações, eles têm de cumprir especificações diferentes, tais como resistência mecânica, estabilidade térmica, resistência à corrosão, a expansão térmica e outras qualidades para aumentar a vida de serviço.

Há um elevado consumo mundial destes materiais pela indústria metalúrgica devido os materiais refratários serem os principais materiais usados como revestimento interno de altos fornos, panelas dentre outros equipamentos no processo siderúrgico.

Estima-se que a indústria siderúrgica gera em torno de 55.000 toneladas/ano de resíduos refratários e a indústria cimenteiras gera em torno de 10.000 toneladas/ano. Uma parcela entre 50% a 75% desta geração pode ser tecnicamente aproveitável por meio de operações e tecnologias de reciclagem em diversos segmentos. (LIMA, 2010).

Devido à grande diversidade de classes de produtos refratários aplicados em equipamentos siderúrgicos, os resíduos refratários apresentam características físico-químicas, grau e tipo de contaminações distintas. Considerando vários níveis de dificuldades nas operações de reprocessamento desses resíduos, é necessário uma pré-avaliação da viabilidade de cada classe.

A) Principais classes de refratários utilizadas em equipamentos siderúrgicos são:

(I) Magnesiano, (II) Magnesia Carbono, (III) Aluminosos, (IV) Silico aluminosos, (V) Alumina Carbetos carbono, (VI) Alumina zircônia, (VII)

Alumina magnésia carbono, (VIII) Válvulas gaveta. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os resíduos do desmonte do revestimento refratários , anteriormente citados.

Figura1 Resíduos refratários



Fonte: Empresa X

O aterro é a destinação mais comum de eliminação dos resíduos refratários após o uso. Como resultado, a disposição de resíduos refratários tornou-se um grande problema, considerando-se a composição de tais materiais, custo de descarte, bem como a situação atual da sobrecarga nos aterros e principalmente os regulamentos ambientais.

Abaixo são apresentados alguns estudos citados por Sonoglio (2011) relacionados ao estudo do uso de resíduos refratários:

Conejo (2006) utilizou materiais refratários post-mortem para injeção no forno elétrico a arco para saturação do MgO da escória. Tijolos MgO-C, tanto de painéis

quanto de fornos, foram moídos e injetados nos fornos via lanças de injeção de carbono. O estudo também avaliou o impacto deste reuso em outros fatores como espumação da escória e a taxa de fusão do aço com a inserção deste material e outras medidas de desempenho de fornos.

Kwong (2012) também tentou o reaproveitamento de tijolos MgO-C, contudo além de avaliar a espumação da escória, foi montado um estudo de simulação para avaliação da espumação e o ganho de vida do refratário em trabalho, com a saturação da escória. Outros fatores como energia e desempenho foram avaliados juntamente.

Takahashi (2000) utilizou resíduos de refratários MgO-C utilizados em aciarias de aços especiais para formular massas e aplicá-las em juntas de tijolos. Seu principal objetivo foi avaliar a utilização nas estruturas de painéis e no sistema de forno painel. Neste trabalho também são discutidos formas de aplicação deste concreto.

Arianpoura (2010) avaliou a corrosão química e características microestruturais de refratários moldados com resíduos inseridos e metodologias de fabricação deste material. Seus resultados mostraram que até 30% de resíduos de MgO-C as propriedades não são afetadas negativamente.

Ferreira (2014) também cita alguns estudos realizados sobre temas relacionados a reciclagem de refratários magnesianos, provenientes de fornos elétricos realizados por Lule-Gonzalez et al. (2005), a recuperação e reciclagem de sucatas de refratários estudado por Valoref (1998) ou mesmo a reciclagem na indústria do aço de refratários como as pesquisadas realizadas por Nakamura *et al.* (1999).

Por outro lado, vários estudos têm sido alinhados para a melhoria dos processos de reciclagem. Presa et al. (1999) centrou-se sobre a reciclagem de resíduos refratários através da quantificação destes resíduos e da análise da viabilidade da reciclagem e de tecnologias de reutilização nos Estados Unidos. Além desse estudo Hanagiri et al. (2008) analisaram o atual estado das tecnologias de reciclagem de refratários no Japão, bem como as etapas do processo de reciclagem.

2.4. Materiais para proteção anti-incêndio

O objetivo fundamental dos sistemas de proteção contra incêndios ativa ou passiva é em primeiro lugar, impedir a passagem e propagação de fumaça e do fogo, de modo a garantir tempo hábil para evacuação da edificação. Em segundo lugar para evitar e/ou reduzir a quantidade de danos causados à estrutura do edifício, às estruturas vizinhas e reduzir o risco de colapso.

Hoje em dia há um crescente interesse na proteção contra incêndios em tecnologia de construção. Há duas razões principais. Por um lado, as normas de incêndio estão se tornando mais restritiva. Como consequência, materiais de construção têm de ser melhorados. Por outro lado há uma maior consciência social do risco de incêndio. Este fato exige também o uso de materiais que têm um bom comportamento sob um cenário de incêndio. (CIUDAD, 2011)

As medidas de segurança e proteção contra incêndio podem se classificar em ativas e passivas. As medidas ativas proveem os meios adequados à salvação das pessoas, começando pelo próprio projeto arquitetônico. Estas medidas também visam reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios severos, através da atuação em suas causas acidentais e da detecção de focos e limitações das possibilidades de propagação.

O objetivo principal dos sistemas ativos é apagar o fogo por:

- A) Detectar o fogo cedo e evacuar o prédio
- B) Alertar os serviços de emergência em um estágio inicial do incêndio
- C) Controle da fumaça e do fogo
- D) Suprimir e / ou reduzir o contato fogo com o oxigênio ou outro combustível.

As medidas de proteção passivas visam reduzir a probabilidade de colapso estruturas sempre que ocorra um incêndio severo. Esta probabilidade depende da resistência ao fogo, a qual compreende três aspectos, ou seja, a capacidade resistente da estrutura, a sua integridade perante o fogo e a sua capacidade de isolamento térmico e que devem ser observados para os vários elementos da

construção. A capacidade resistente da estrutura vai depender fortemente do comportamento do material estrutural utilizado, ou seja, do grau de variação de suas propriedades físicas e mecânicas com a temperatura.

Os objetivos principais dos sistemas passivos é conter o fogo por:

- A) Uso de divisórias e porta corta-fogo evitando que o fogo e a fumaça se mova de um compartimento para outro
- B) Atrasar o colapso da estrutura do edifício
- C) Atrasar a propagação do fogo
- D) Proteção contra incêndio passiva

A preocupação com os efeitos eventuais gerados numa estrutura em situação de incêndio é recente no Brasil quando comparada a países mais desenvolvidos tais como países pertencentes à Europa, assim como Estados Unidos e Japão. Martins (2000).

As proteções passivas anti-chamas não apagam incêndios e não podem ter nenhum efeito significativo sobre a extensão final dos danos aos materiais se exposição ao fogo intenso persistir além do projetado para o sistema de proteção contra incêndios. Quando devidamente implementado, sistemas à prova de fogo pode ajudar a reduzir as perdas e proteger o pessoal e equipamentos por fornecer tempo adicional para controlar ou extinguir um incêndio antes do colapso da estrutura.

Cada sistema de proteção anti-incêndio usam diferentes combinações de materiais visando propriedades químicas e físicas específicas. As propriedades requeridas devem ser apropriadas a estrutura a ser protegida.

De acordo com a norma API 2218 alguns fatores devem ser avaliados na seleção de um sistema anti-incêndio:

- a) Limitação de peso suportada pelo aço;

- b) Classificação de resistência ao fogo (em horas) requerida;
- c) A força de adesão do material e durabilidade;
- d) Se o material a ser especificado e para um equipamento em a fase de concepção ou aplicada a equipamento existente;
- e) A corrosividade da atmosfera e do material de proteção contra incêndios com o substrato. Aço inoxidável e o alumínio podem ser especialmente sensíveis a algumas condições, especialmente exposição ao cloro;
- f) Limitação na temperatura de operação em condições sem proteção;
- g) Requisitos regulamentares;
- h) Custos.

A NPT 008 (2012) sugere que as propriedades térmicas e o desempenho dos materiais de revestimento contra o fogo quanto à aderência, combustibilidade, fissuras, toxidade, erosão, corrosão, deflexão, impacto, compressão, densidade e outras propriedades necessárias para garantir o desempenho e durabilidade dos materiais, devem ser determinados por ensaios realizados em laboratório nacional ou estrangeiro reconhecido internacionalmente, de acordo com norma técnica nacional ou, na ausência desta, de acordo com norma estrangeira reconhecida internacionalmente.

Há uma ampla variedade de materiais que podem ser usados como agregados em concretos refratários desde que possuam estabilidade adequada em altas temperaturas e que não decompõem ou apresentem expansividade térmica.

Segundo Prisszkulnik (1972) a temperatura máxima suportável pelo concreto depende, fundamentalmente, do tipo de agregado, do teor e do tipo de cimento empregados. De acordo como o mesmo pode-se distinguir os agregados em função

da temperatura de trabalho dos concretos, relacionada com o seu papel específico:

- isolante-refratário (heat-resistant) de 200° C a 1100°C;
- refratário-isolante (fire-resistant) acima de 1100°C

2.4.1 Alguns materiais comerciais

Conforme Panonni (2003) a proteção térmica dos elementos estruturais de aço (proteção passiva) é o meio mais comum de se proteger o aço contra o incêndio. Vários são os materiais utilizados com esta finalidade, tais como as argamassas projetadas, tintas intumescentes, mantas cerâmicas ou de lã de rocha basáltica, gesso acantonado e outros. Esses materiais são apresentados abaixo de acordo com as definições de Panonni (2003):

Argamassa Projetada: São produtos com alto conteúdo de aglomerantes que, quando misturados com água, geram uma massa fluida que pode ser bombeada. São apresentados como produtos de baixa, média ou alta densidade, e são constituídos basicamente de gesso (aproximadamente 80% do peso seco), cimento Portland (em materiais de média e alta densidade), resinas acrílicas e cargas inertes, tais como poliestireno expandido, celulose e preservantes.

Materiais de baixa densidade são aplicados, de modo geral, em obras internas. Materiais de média densidade são utilizados em obras internas com requisitos de certa resistência ao impacto e à umidade. Materiais de alta densidade são utilizados em obras externas onde o risco de impacto é alto, assim como a umidade.

Figura 2- Argamassa projetas



Fonte: Panonni (2003)

Argamassa Projetada à Base de Vermiculita: É produto de baixa densidade, composto basicamente de vermiculita expandida, cimento Portland e aglomerados minerais. Este material deve ser completamente isento de amianto, e, para melhorar sua aderência ao aço, costuma ser necessária a utilização de telas.

Fibra Projetada: São produtos de baixas e médias densidades, contendo basicamente fibras obtidas a partir de rocha basáltica (ou escória de alto-forno) como principal ingrediente. Estas fibras são misturadas com escória de alto-forno (20 a 30% do peso seco total) para criar uma mistura de baixa densidade. A proteção à base de fibras utiliza as propriedades isolantes da fibra para proteger o aço. Esta mistura é projetada sobre a estrutura.

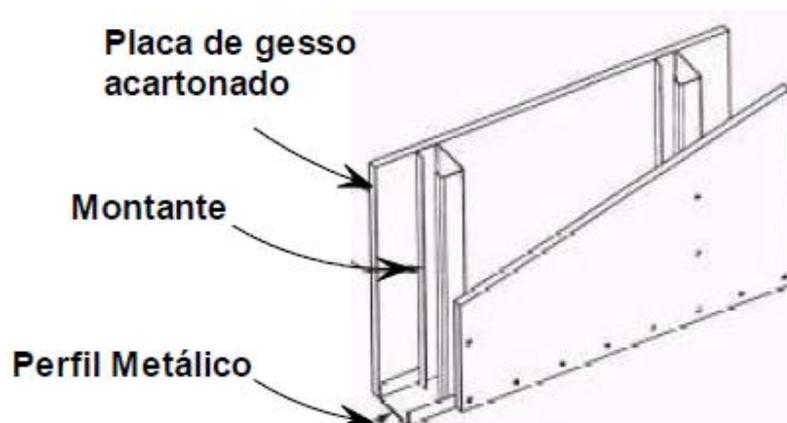
Figura 3- Fibras projetadas



Fonte: Panonni (2003)

Placas de Gesso Acartonado: Placas de gesso contendo fibra de vidro, e, em alguns casos, vermiculita incorporada. Assim como a argamassa “cimenticious”, o gesso da placa perde moléculas de água de hidratação durante o aquecimento, mantendo baixa a temperatura do aço. Estes materiais tem, internamente, uma malha de fibra de vidro, que mantém o conjunto estruturado quando exposto às elevadas temperaturas do incêndio. A placa é mantida, de modo geral, visível em estruturas, por motivos estéticos.

Figura 4- Placas de gesso



Fonte: Panonni (2003)

Tintas Intumescentes: São tintas especiais que expandem a partir de 200°C, formando uma espuma rígida que isolam eficientemente os gases quentes gerados no incêndio do aço. Antes da aplicação desta tinta especial, a superfície deverá ser preparada conforme recomendações do fabricante, e um primer compatível deverão ser aplicados. Como esta tinta não apresenta grande resistência química e física, ela deve ser recoberta por uma película acrílica ou poliuretânica, a critério do usuário. As tintas intumescentes são compostas, de modo geral, de sais de fósforo, de amidos, de melamina e resinas orgânicas.

Figura 5 - Tinta intumescente



Fonte: Panonni (2003)

Nas tabelas 1 e 2 onde são apresentadas as características físico-químicas de dois materiais de projeção comerciais. Algumas destas propriedades serão avaliadas neste estudo em comparação a esses materiais. Não foram conseguidas amostras para comparação destes materiais com a composição cimentícia de agregado refratário.

PYROCRETE 40®

Pyrocrete 40® é um cimento inorgânico com formulação especialmente desenvolvida para proteção passiva contra incêndio. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas e químicas do Pirocrete 40. Algumas dessas propriedades foram avaliadas nos composições feitas com o agregado de resíduo refratário, tais como densidade, resistência mecânica, condutividade térmica.

Tabela 1 Propriedades Pyrocrete

Propriedades Físicas Típicas

Cor	Não uniforme	Cinza
Densidade (média)	ASTM E 605 (1)	55 lbs/ft ³ . = 880 kg/m ³
Dureza (Shore D)	ASTM D2240	55
Resistência a compressão	ASTM E 761	817 psi = 57,44 kg/cm ²
Coefficiente de expansão térmica		4.5x10E6(inch/inch°F)
Bond Strength Unprimed Steel	ASTM E 736	> 1146 psf
Bond Impact	ASTM E 760	Aprovado
Resistência ao Impacto	ASTM D 2794	0.
Deflexão	ASTM E 759	Aprovado
Curvatura Média (resistência)	ASTM D 790	502 psi = 35,3 kg/cm ²
Alastramento de Chamas	ASTM E 84 0	0.
Desenvolvimento de fumaça	ASTM E 84 0	0.
Máxima Tensão	ASTM D 790	0,0015 in/in
Corrosão	ASTM E 937	0,00 gm/mm ²
Condutividade fator "k"	ASTM C 177	0,87 BTU in/ hr ft ² oF para 75 F
Calor Específico	-	0,36 BTU/lb oF
Encolhimento	-	< 0,5%
Vida Útil	-	2 anos

Fonte: Catalogo Pyrocrete

Pyrolite 15 HY®

Pyrolite 15 HY® é uma formulação inorgânica, cimentosa para proteção passiva contra incêndio. Na tabela 2 também são apresentados as propriedades de um outro material Pyrolite.

Tabela 2 Propriedades Pyrolite**Propriedades Físicas / Químicas**

Propriedade	Método	Resultado / Valor
Cor	Normal	Marron não-uniforme
Densidade (1) (Min.-Média)	ASTM E605(1)	15 lbs/ft3 (.24 g/cm3)
Força de compressão	ASTM E761	2232 PSF
Resistência a fungos	ASTM G21 ASTM D3273	Aprovado
Aço sem primer	ASTM E736	314 psf
Resistência a impacto	ASTM E760	Aprovado
Deflexão	ASTM E759	Aprovado
Propagação da Chama	ASTM E8410	.
Surgimento de fumaça	ASTM E840	.
Corrosão	ASTM E937	0.00 gm/m2
Fator de Isolamento "K"	ASTM C177	0.73 (BTU pol/hr pé2 - °F a 75°F)
Aquecimento Específico	ASTM C177	0.37 BTU/lb °F
Contração		<0.5%
Cobertura 45 lb.saco (2)		40 BFM
Vida Útil		18 meses

Fonte: Catálogo do Pyrolite

2.5. Efeito do calor na estrutura

O aumento de temperatura, que ocorre por consequência de um incêndio em uma construção, pode afetar as propriedades dos materiais modificando significativamente a sua capacidade mecânica. Além disso, outras alterações indiretas aparecem devido à deformação dos elementos estruturais metálicos, que geralmente dão origem a tensões adicionais que podem ocasionar o colapso de toda edificação.

Segundo Morales (2011) o incêndio é constituído principalmente por três fases

:

Na fase inicial verifica-se o aumento gradual da temperatura normalmente em um curto espaço de tempo, sendo que abaixo de 250°C o efeito da elevação da temperatura sobre a resistência mecânica do concreto é

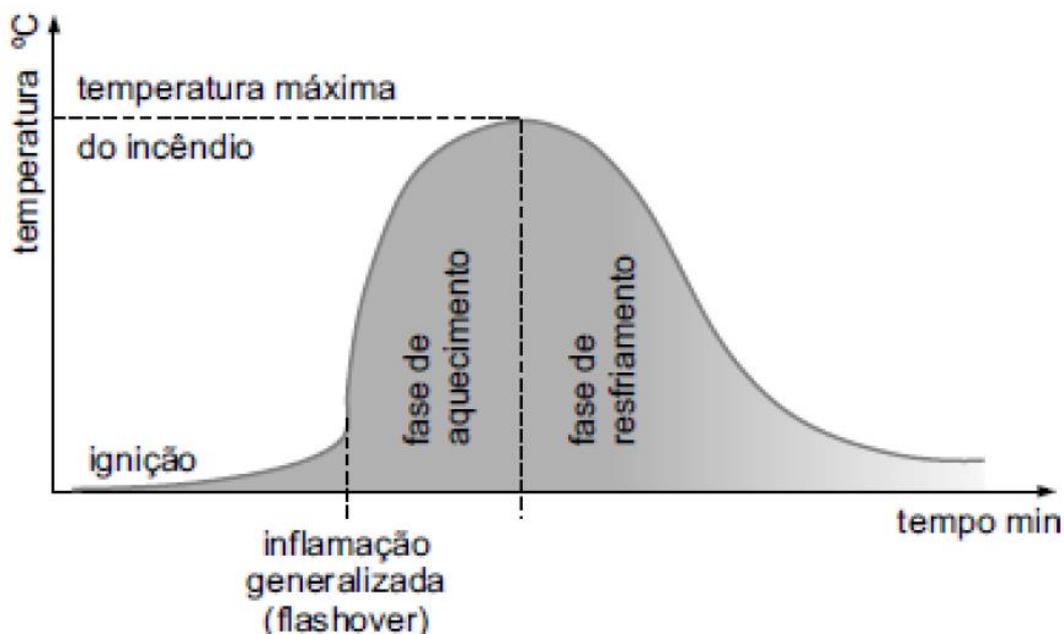
pequena. Nesta fase os valores atingidos passam a casa de 300°C, temperatura acima da qual se acentua a queda da resistência do concreto. Nesta faixa de temperatura já ocorre uma perda considerada de resistência mecânica do concreto, fato que se acentua em situações de resfriamento rápido. Na transição da fase inicial para intermediária também chamada de combustão viva, ocorre uma elevação violenta da temperatura com a propagação descontrolada das chamas chegando a ponto de irreversibilidade do incêndio. É o ponto de inflamação generalizada conhecida como flash over. Conforme Rosso (1975), nesta fase o incêndio raramente excede valores de temperatura de 1250-1300°C.

Na fase intermediária é que ocorrem os efeitos mais danosos ao concreto, os quais se agravam em função da duração da mesma. Particularmente a perda de resistência mecânica ocorre a temperaturas acima de 300°C.

A última fase é caracterizada pela redução até a extinção do fogo, e sua influência nas estruturas de concreto se deve a forma como é feita esta extinção e a duração da mesma. O resfriamento brusco da temperatura é responsável pelas maiores perdas de resistências. Quando é realizado o resfriamento lento existe a possibilidade de recuperação de até 90% da resistência inicial, dependendo da temperatura máxima atingida. (MORALES, 2011).

A figura 6 representa o efeito descrito por Morales (2011).

Figura 6- Curva temperatura – tempo de um incêndio real



Fonte: Vargas (2013)

Segundo Figueiredo, Costa e Silva (2002), aumento da temperatura dos elementos estruturais, decorrentes da ação térmica devido aos incêndios, causa alterações na micro e na macro-estrutura do concreto.

Morales (2011) destaca que a elevação gradual de temperatura provoca efeitos distintos no concreto e nas argamassas, verificando-se alteração na coloração, perda de resistência mecânica, esfarelamento superficial, fissuração até a própria desintegração da estrutura.

Dentre as causas que podem levar uma estrutura sujeita a altas temperaturas ao colapso, estão à temperatura máxima atingida, o tempo de exposição, o traço de concreto, o tipo de estrutura, o elemento estrutural e a velocidade de resfriamento. (MORALES, 2011).

A tabela 3 apresenta algumas alterações ocorridas no concreto após o aquecimento em algumas faixas de temperaturas. Observa-se que a partir de 250°C há alteração no desempenho e no aspecto visual do concreto, tendo uma maior criticidade a partir de 535°C.

Tabela 3- Características do concreto superaquecido

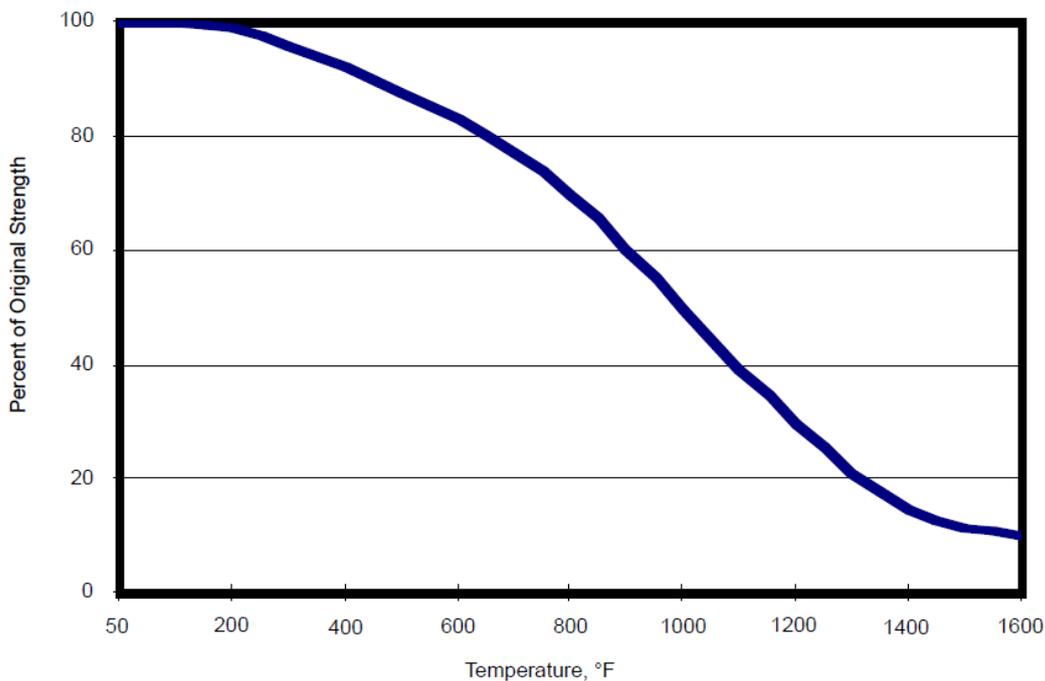
Temperatura [°C]	Cor	Aspecto visual / Desempenho
<250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285-300	Cinza-Roseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
300	Rosa	Início de mudança de cor
50 - 400		Redução do módulo de deformação
535-550	Roxo	Fissuração profunda – friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790-800		Lascamentos do cobrimento das armaduras, com exposição até 25% da superfície das mesmas
900	Amarelo alaranjado	Superfície pulverulenta
1000	Amarelo claro	

Fonte: Morales (2011)

De acordo com API 2218 (2010) o efeito de exposição ao calor em estruturas de aço é de preocupação durante e após o incêndio. O aço perde resistência mecânica se exposto a um aumento de temperatura. Durante um incêndio, se o aço estrutural é aquecido o suficiente por certo período de tempo, pode enfraquecer e perder a sua capacidade de suportar a sua carga. Testes simulando condições de incêndio de hidrocarbonetos são projetados para atingir 2000°F (1100°C) em 5 minutos para simular a temperatura de exposição ao fogo. Testes padronizados definem 1000°F (538°C) como o ponto "fratura" do aço.

A figura 7 mostra a resistência de uma estrutura típica de aço quando aquecida, perdendo cerca de metade da sua resistência na temperatura de 1000 ° F (538°C).

Figura 7 Efeito da Temperatura na resistência do aço estrutural

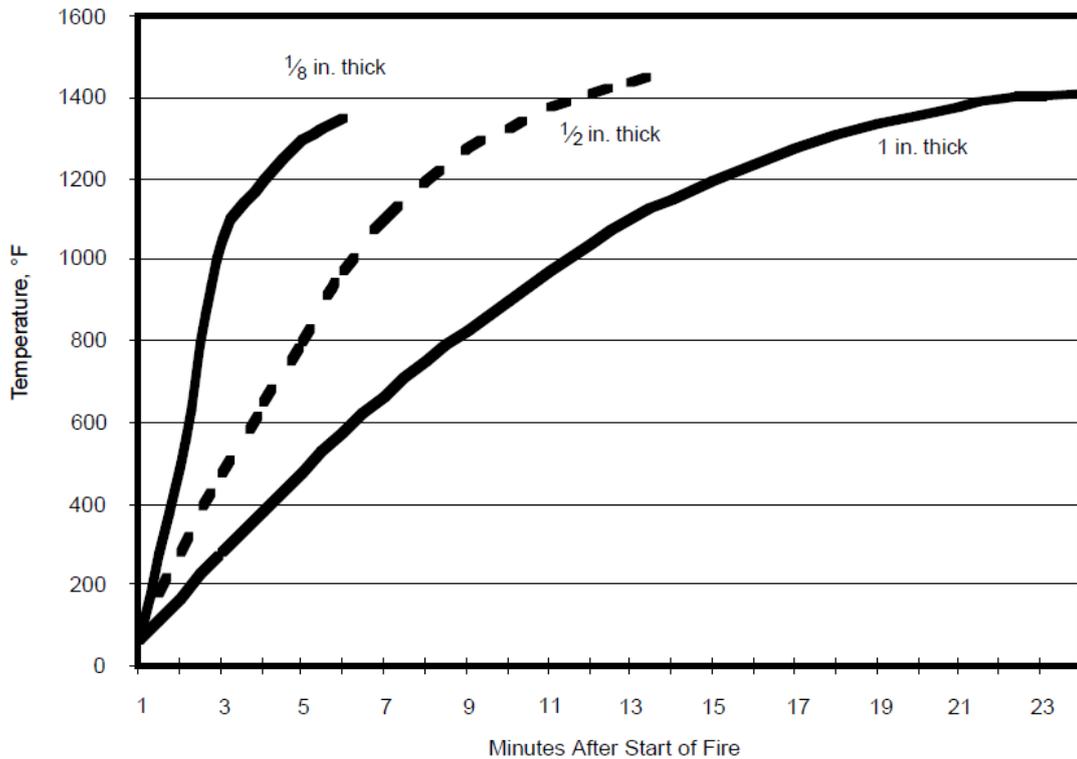


Fonte: API 2218 (2010)

Observando a figura 8 pode se inferir que placas de aço com massa menor irão aquecer mais rápido. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 8 mostra o efeito da espessura da chapa de aço para a taxa de aquecimento para chapas de

diferentes espessuras exposto a um incêndio de gasolina de cerca de 2000°F (1100°C).

Figura 8- Aquecimento de placas de aço Unwetted expostos em uma das faces ao fogo (gasolina)



Fonte: API 2218 (2010)

Analisando a figura acima se observa que os perfis esbeltos são aqueles que possuem maior fator de massividade, portando atingem o equilíbrio térmico com o ambiente mais rapidamente. Quanto maior for o índice de massividade, maior será aumento da temperatura do perfil.

Tabela 4-Fatores de redução para o aço (NBR 14323/2013)

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados $k_{v,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços trefilados $k_{v\theta,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados $k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços trefilados $k_{E\theta,\theta}$
20	1,000	1,000	1,0000	1,000
100	1,000	1,000	1,0000	1,000
200	1,000	1,000	0,9000	0,870
300	1,000	1,000	0,8000	0,720
400	1,000	0,940	0,7000	0,560
500	0,780	0,670	0,6000	0,400
600	0,470	0,400	0,3100	0,240
700	0,230	0,120	0,1300	0,080
800	0,110	0,110	0,0900	0,060
900	0,060	0,080	0,0675	0,050
1000	0,040	0,050	0,0450	0,030
1100	0,020	0,030	0,0225	0,020
1200	0,000	0,000	0,0000	0,000

Nota: Para valores intermediários da temperatura do aço pode ser feita interpolação linear

Fonte: NBR 14323:2013

Conforme observação da tabela 4 os aços laminados têm maior resistência ao escoamento que os aços trefilados e módulos de elasticidades diferenciados. A partir de 400°C/ 300°C de temperatura, os aços (laminados e trefilados respectivamente) começam a reduzir resistência ao escoamento, e aos 100°C, módulo de elasticidade.

A NBR 14432/2001, estabelece exigências de resistência ao fogo para cada elemento (laje, viga e pilar), tempo equivalente ou TRRF, fixando de 30 a 120 minutos, com intervalos de 30 minutos, em função da ocupação da edificação, altura, área do pavimento, das medidas de proteção ativa, entre outras.

A resistência ao fogo de uma construção de concreto depende de sua habilidade em proteger a estrutura metálica durante um período de tempo, limitando o aquecimento excessivo do aço, que provocaria o colapso da estrutura. Logo a proteção dessas estruturas tem uma importância óbvia na preservação das propriedades físicas e químicas do aço em caso de incêndio de modo a evitar a exposição prematura do aço ao fogo. Sendo as propriedades de condutividade e difusividade térmica do

concreto fato relevante, dentre outras, para o estudo da capacidade de proteção passiva da argamassa ou concreto em estruturas metálicas.

Para que se possa verificar a segurança estrutural em situação de incêndio dos elementos estruturais de aço de uma edificação, é necessário conhecer a exigência de resistência ao fogo para cada tipo de elemento (viga, pilar, laje) conforme as normas vigentes no país. As Normas Brasileiras que tratam da segurança estrutural frente ao fogo foram aprovadas em 1999: NBR 14432 “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento” e NBR 14323 “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento”. O desempenho requerido para os elementos de construção estrutural (concreto, madeira ou aço) ou de compartimentação prescritos na NBR 14432 trata de prevenir o colapso estrutural, tornando possível a retirada dos ocupantes, de reduzir os danos às propriedades vizinhas e permitir o rápido acesso do Corpo de Bombeiros. As versões mais recentes dessas normas são:

NBR 14432 de 2001 - Estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. Para os elementos de compartimentação, devem ser atendidos requisitos de estanqueidade e isolamento por um tempo suficiente para possibilitar; fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança; segurança das operações de combate ao incêndio e minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

NBR 14323 de 2013 - Com base no método dos estados-limites, estabelece os requisitos para o projeto das estruturas de aço e das estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio de edificações. Projetos que favoreçam a prevenção ou a proteção contra incêndio, reduzindo o risco de incêndio ou sua propagação, e especialmente facilitando a fuga dos usuários e a operação de combate, podem ter aliviadas as exigências em relação à resistência de sua estrutura ao fogo, conforme previsto na NBR14432. Entende-se por projeto em situação de incêndio a verificação da estrutura nos estados-limites últimos aplicáveis em temperatura elevada. O projeto deve evitar o colapso estrutural em condições

que prejudiquem a fuga dos usuários da edificação. Além disso, quando for o caso, deve evitar soluções que prejudiquem a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo, aumentem o risco de propagação do fogo ou transferência de calor e o risco à vizinhança. Nas estruturas projetadas de acordo com esta Norma, não é necessário verificar os estados-limites de serviço.

3. CONCRETOS REFRATARIOS

Ao se considerar um concreto com propriedades capazes de ser submetido à temperaturas maiores do que a temperatura ambiente deve se distinguir entre as condições nas quais o concreto deva preservar as suas propriedades seja em uso normal ou submetido a temperaturas elevadas, mesmo que seja acidentalmente como em situação de incêndio de uma edificação. A avaliação destas condições é de primordial importância para o desenvolvimento de uma composição que atenda as propriedades requeridas desse material.

A resistência ao fogo de uma construção de concreto ou do revestimento de concreto depende de sua capacidade em proteger a estrutura metálica, logo as propriedades de condutividade térmica e difusividade térmica do concreto, além da expansividade e decomposição térmica excessiva do agregado devem ser consideradas na definição dos componentes e percentuais da mistura cimentícia.

Um concreto é constituído essencialmente da porção mais fina conhecida como matriz e de uma porção mais grossa, o agregado e de água. Também podem ser adicionados aditivos químicos para melhorar algumas propriedades desse compósito, tais como: fluência, tempo de pega, porosidade. A matriz de um concreto isolante é formada basicamente por um ligante, água e de aditivos. O cimento é o ligante mais comumente utilizado em concretos refratários, sendo responsável pela ligação hidráulica e conseqüentemente da resistência a verde do concreto. A água tem papel fundamental sobre a fluência, pela conformação dos constituintes da matriz e também pela porosidade após cura do compósito cimentício.

A interação matriz e seus constituintes é um sistema complexo sendo responsável nas propriedades físicas, na microestrutura, na composição química e no comportamento reológico do compósito final.

3.1 MATERIAIS PARA CONCRETO

3.1. Agregados

De acordo com a NBR 9935 (1987) é definido com material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto.

De acordo com ET-41 (1995) podemos classificar o agregado de três formas: quanto à natureza, dimensões e massa unitária. Será definida neste trabalho apenas a classificação quanto à natureza e dimensões:

Os agregados podem ser classificados em, de acordo com o ET-41 (1995): natural, artificial e reciclado.

Natural – Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc.

Artificial – são aqueles que necessitam ser trabalhados para chegarem à condição necessária e apropriada para seu uso: areia artificial, brita etc.

Reciclado – Nessa categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em interesse por restrições ambientais na exploração de agregados naturais e pelo

desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização.

Quanto às dimensões de acordo com o ET- 41 (1995), os agregados são classificados em: miúdos e graúdos.

Miúdos – É a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT nº 4 (4,48mm) e ficam retidos na peneira ABNT nº 200 (0.075mm).

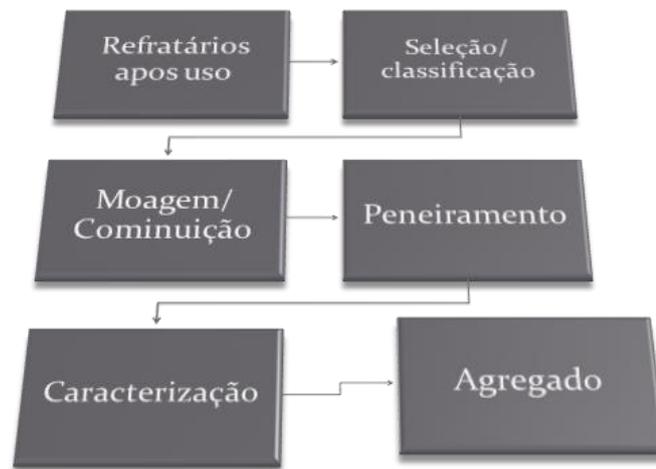
Graúdo – É o pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT Nº 4 (4,48mm).

3.1.2. Resíduo refratário - Co-produto silico aluminoso

O resíduo que será objeto deste estudo é um co-produto do processamento de uma usina de reciclagem de tijolos refratários. O processo de beneficiamento desta usina gera diversas frações cuja se têm o uso definido para algumas como matérias-primas recicladas em tijolos refratários com solicitações menos exigentes.

O resíduo é apresentado no estado bruto como tijolos refratários e deverá passar por processamento para adequar a forma requerida dos agregados para concreto ou argamassa. Esses resíduos são encontrados misturados com diversos macros contaminantes e misturados entre si também. Primeiramente a separação manual dos resíduos de outros contaminantes como madeira, sucatas metálicas etc., e posteriormente a fragmentação dos tijolos e peneiramento para adequar as frações para utilização como agregado. Nesta etapa deverá ser avaliada a dificuldade e custo da aplicação de cada etapa do processamento. A figura 9 apresenta de forma simplificada esse processo de processamento dos tijolos após o uso.

Figura 9- Etapas de processamento do tijolo



Fonte: Empresa X

O co-produto refratário é apresentado na fração < 600mm sendo a geração em torno de 2 toneladas apenas para os tijolos silico-aluminosos. Para a produção de argamassa de proteção anti-incêndio essa geração, a princípio, atenderia a demanda produtiva, devido o uso dessa argamassa ser de caráter preventivo e, posteriormente, a necessidade apenas de manutenções preventivas do revestimento.

Possivelmente outros resíduos refratários poderão ser utilizados como agregado miúdo em argamassas de proteção anti-incêndio, sendo este estudo importante na reutilização e diminuição do passivo já existente e na inovação do uso desses resíduos em argamassas de proteção passiva anti-incêndio.

3.1.2. Argila

Argilas são essencialmente silicatos hidratados de alumínio geralmente cristalinos denominados argilominerais, podendo conter ferro e magnésio. Podem conter ainda outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis. Sob o ponto de vista físico-químico, as argilas podem ser consideradas como sistemas dispersos de minerais, nos quais predominam partículas de diâmetro abaixo de 2 μm . A maioria dos argilominerais são subdivididos em função de suas propriedades estruturais e são essas propriedades que fornecem o desempenho desse material para as mais diversas aplicações. As argilas são empregadas numa série de produtos acabados, por possuir propriedades adequadas, pela abundância e por ser de fácil manuseio. (SANTOS, 2002)

Em um mineral argiloso os elementos mais freqüentes são o oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, no estado iônico, assemelham-se a esferas que se arranjam em modelos estruturais tridimensionais. Minerais como o quartzo, feldspatos, micas, anfíbolos e piroxenas, constituintes das rochas silicatadas da crosta terrestre, quando expostos à atmosfera tornam-se instáveis. A água que penetra nos poros, clivagens e microfraturas desses minerais dissolve os seus constituintes. A reorganização destes constituintes em solução, com participação de água, oxigênio, dióxido de carbono e íons dissolvidos permite a formação de minerais argilosos e, conseqüentemente, de argilas que ficarão em equilíbrio nas condições atmosféricas.

A tabela 5 apresenta a caracterização química das argilas bentonitas em estudo de adsorção de cobre.

Tabela 5- Composição Química (% em óxidos) e perda ao fogo de argilas Bentonita

Óxidos	Bentonita Wyoming	Bentonita Sódica	Bentonita Cálcica
Al	23,84	17,72	14,64
Si	59,62	59,74	55,92
Na	1,67	1,81	0,48
K	0,67	0,46	0,55
Mg	1,87	2,1	2,65
Mn	0,05	0,05	0,03
Zn	-	-	-
Cu	-	-	-

Cr	0,13	-	0,037
Ni	0,08	0,06	0,06
Ti	0,21	0,38	0,54
Fe	7,21	5,2	8,12
Ca	0,64	0,61	1,26
Perda ao fogo %	13,82	9,72	16,02

Fonte: SANTOS (2002)

Segundo PETZOLD (1970) as argilas finamente divididas desempenham papel de estabilizantes cerâmicos além de apresentar a propriedade de retenção de água, impedindo a secagem prematura do concreto. Este agregado é empregado em concretos preparados com cimento portland ou com cimento de aluminato de cálcio, sendo que com o último exerce papel de microfíler, melhorando a plasticidade do concreto recém-misturado e aumentando a sua resistência em temperaturas intermediárias.

3.1.3 Vermiculita

A vermiculita é um mineral da família das argilas micáceas hidratadas magnesianas. É um silicato hidratado contendo magnésio, cálcio, além de alumínio e ferro em proporções variáveis, dependendo da origem e do processo geológico de formação. Parente (1986).

A Vermiculita é um mineral formado pela superposição de finíssimas lamínas, que submetido a altas temperaturas (cerca de 800 °C), sofre uma grande expansão de até quinze vezes o seu volume original. Schackowet (2014).

De acordo com Schackowet (2014) como resultado dessa expansão, a densidade da vermiculita é de 60 a 130 kg / m³ e o concreto feito com ele é de baixa resistência, de alta contração, mas é um excelente isolante térmico podendo ser usada como um isolamento solto independente ou como um agregado em betão leve, por exemplo, nas proporções de 6: 1 (vermiculita: Cimento Portland).

A vermiculita é um mineral que ocorre naturalmente. A composição química consiste de um complexo de alumínio e magnésio hidratado silicato. A fórmula química da

vermiculite é $(\text{Mg}, \text{Ca})_{0,3-0,45} \cdot (\text{H}_2\text{O})_n \{(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3 (\text{Al}, \text{Si})_4 \cdot 10 (\text{OH})_2\}$. (SCHACKOWET, 2014).

A tabela 6 apresenta a composição química e a densidade de uma vermiculita comercial GRANUTEC.

Tabela 6- Composição Química e densidade Vermiculita

Composição química	%
SiO ₂	40,50
Al ₂ O ₃	12,70
Fe ₂ O ₃	5,50
Na ₂ O	–
TiO ₂	1,10
MnO	–
MgO	24,20
CaO	1,60
K ₂ O	6,90
Densidade (g/cm ³)	0,13

Fonte: MATIAS (2014)

Os grãos relativamente grandes da vermiculita absorvem prontamente a água líquida por ação capilar. A quantidade de água retida é variável e depende das condições ambientais. Parente (1986). **Erro! Fonte de referência não encontrada.**tabela 7 indica os valores obtidos segundo o método de Hilgard.

Tabela 7- Absorção de água pela vermiculita

Densidade aparente da vermiculita Kg/m ³	Porcentagem de água retida em relação ao peso seco %	Litros de água retidos por m ³
80/96	500	440
96/112	475	490
120/136	350	440

Fonte: Parente (1986)

A vermiculita expandida ou esfoliada tem baixa densidade, refratariedade alta e

baixa condutividade térmica. A inércia química e outras propriedades já comentadas torna a vermiculita uma ótima opção como material para revestimentos térmicos e isolamentos acústicos ou como agregado para concretos e argamassas para essas finalidades.

3.1.4 Micro-sílica

Micro sílica também chamada de sílica volatizada ou pós de sílica condensados, é definida de acordo com Freitas (1993) como sendo fumos condensados de sílica beneficiados, consistindo de partículas extremamente pequenas de sílica amorfa, geralmente com diâmetro médio de partícula de 0,1 a 0,2 μm . A facilidade de dispersão, a disponibilidade e o baixo custo da micro sílica têm aumentado o uso desta matéria-prima em concretos e argamassas.

A tabela 8 apresenta as composições químicas da micro-silica de duas fontes distintas de silício: Silício elementar e ferro-silício com 75% de ferro. Observa-se que a micro-silica é preponderantemente composta de sílica pura amorfa independente da fonte.

Tabela 8- Composição química da micro-sílica

	Fonte	
	De Silício elementar	De ferro-silício
	%	%
SiO ₂	94-98	85-95
C	0,2-1,5	0,8-25
K	0,2-0,7	0,5-3,5
Na	0,1-0,3	0,2-1,5
Mg	0,1-0,4	0,5-2,5
Ca	0,05-0,3	0,1-0,5
Al	0,05-0,2	0,1-1,0
Fe	0,01-0,3	0,1-2,5
Ti	0,001-0,01	0,01-0,03
P	0,01-0,1	0,02-0,1
S	0,01-0,2	0,05-0,5

Fonte: FREITAS (1993)

A micro sílica exerce grande influência sobre as propriedades do concreto e argamassas, principalmente sobre o comportamento reológico do concreto fresco, sobre a distribuição de poros por tamanho, e dos produtos da hidratação e como consequência sobre as propriedades mecânicas e a durabilidade desse produtos pós cura ou queima. Os concretos contendo micro-silica tem uma maior tendência a coesão e consistência reduzindo a segregação quando comparados a outros concretos contendo apenas cimento portland.

Conforme Freitas (1993) a refratariedade e o aumento da demanda de água são fatores limitantes ao uso da micro-sílica. Altos teores de micro-sílica num concreto levam a formação de anortita e gehlenita limitando a temperatura de utilização do concreto refratário. Porém essa mesma autora também cita algumas vantagens no uso da micro-sílica em concretos e argamassas, tais como:

- Agente ativo durante a hidratação das pastas de cimento;
- A micro sílica age como pozolana formando mais silicatos de cálcio hidratado;
- Alta resistência mecânica;
- Alta resistência a erosão;
- Pequena retração.

3.2. Ligantes hidráulicos

O agregado tem grande importância nas propriedades finais do concreto, porém o cimento utilizado como ligante tem importância primordial nas propriedades do concreto a temperatura ambiente, e também a quente. O cimento normalmente é um material fino que reage com água para formar as ligações hidráulicas unindo mecanicamente o agregado a matriz à temperatura ambiente.

3.2.1 Cimento de aluminato de cálcio (CAC)

A fabricação do Cimento de aluminato de cálcio requer uma fonte de alumina e uma de cal, sendo a bauxita e o calcário as matérias primas mais comumente empregadas. O CAC pode ser produzido por:

- Sinterização ou clinquerização de bauxita e calcário;
- Por fusão simples de bauxita vermelha e calcário;
- Por fusão redutora.

Além da bauxita e do calcário, outras matérias primas tem sido empregadas como fontes de alumina e cal. Prisszkulnik (1972) apud Taylor (1962) propôs a substituição do calcário por gesso hidratado ou anidro, o qual aquecido com a bauxita, sob condições redutoras produz o aluminato de cálcio.

Segundo Prisszkulnik (1972) dois são os cimentos alumino-cálcicos mais frequentemente usados para refratários monolíticos: o cimento cujo elemento essencial é o aluminato monocalcico, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$, com a presença de silicato de cálcio e de óxido de ferro, “cimento fundido”, e o cimento cuja a composição pode ser definida pela fórmula $3\text{CaO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ cuja presença de óxido de ferro e sílica é muito pequena, “super-aluminoso”.

Em virtude de sua natureza química diferente de outros cimentos de pega hidráulica, o cimento aluminoso apresenta propriedades que permitem o seu emprego em diversas aplicações especiais. [...] observou-se que argamassas ou concretos preparados com cimento de aluminato de cálcio e agregado refratário, ou resistente ao calor (tal como tijolos refratários moídos), não fissuravam, nem lascavam durante repetidas queimas, podendo ser resfriados em água, sem perda de estabilidade. (PRISSZKULNIK, 1972)

Prisszkulnik (1972) apud Taylor (1962) cita que o consumo dos cimentos aluminosos baseia principalmente em três propriedades: resistência aos sulfatos e a vários agentes químicos, endurecimento rápido e capacidade de constituir-se em aglomerantes refratários de agregados adequados.

3.2.1. Constituintes

Segundo Prisszkulnik (1972) todos os cimentos consistem essencialmente de aluminato de cálcio ($\text{Ca}_2\text{C}_{12}\text{A}_7$ e Ca_2) associados a quantidade variáveis de compostos derivados de outros óxidos presentes nas matérias primas. Por outro lado, os elementos metálicos presentes são sempre os mesmo, tais como óxido alumínio, cálcio, ferro, silício, titânio e magnésio. A maior variação ocorre na proporção dos óxidos de ferro onde seu teor pode ser bastante reduzido quando o processo de fabricação é a fusão redutora.

A tabela 9 apresenta a composição química de alguns cimentos de aluminato de cálcio de alta pureza, obtido pela fusão de alumina calcinada e carbonato de cálcio em forno elétrico a arco e posteriormente moído em moinho de bolas, com adição de alumina calcinada de uso comercial indicado para fabricação de materiais refratários.

Tabela 9- Cimento CAC comercial

	Análise Química por FRX (%)			
	EL-60	EL-61	EL-70	EL-81
Al ₂ O ₃	61,66	67,83	67,42	82,52
SiO ₂	3,79	0,34	3,04	0,2
FeO	0,39	0,25	0,42	0,47
MgO	0,32	0,26	0,34	0,24
CaO	33,16	31,1	28,1	17,1
Na ₂ O	0,11	0,19	0,13	0,28

Fonte: <http://www.elfusa.com.br>

3.3. Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

O cimento Portland é o produto obtido pela pulverização do clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego. (PRISSZKULNIK, 1972).

Cimentos portland comum, de alto forno, pozolânicos e de alta resistência inicial tem sido empregados na preparação de concretos refratários, porém em escala limitada. (PRISSZKULNIK, 1972).

[...] aquecendo o cimento portland endurecido acima de 450°C, forma-se óxido de cálcio, como produto de desidratação do hidróxido de cálcio, envolvendo um grande aumento de volume, suficiente para desintegrar ou enfraquecer acentuadamente uma argamassa ou concreto de cimento Portland submetido ao fogo, sendo essa expansão volumétrica de aproximadamente 44%. (PRISSZKULNIK, 1972 apud LIVOVIK, 1961).

Prisszkulnik (1972 apud LIVOVIK, 1961) mencionou que concretos preparados com agregados de tijolos refratários britados e cimento Portland comum, fissuravam e perdiam a maior parcela da sua resistência após ciclos alternados de aquecimento acima de 430°C.

Mesmo o emprego de agregados adequados para altas temperaturas à formação de cal livre no concreto ou argamassa após aquecimento em temperatura superior a 430°C impõe restrições ao campo de utilização ou a temperaturas relativamente baixas comparado com o cimento de aluminato de cálcio. Prisszkulnik (1972 apud ROBSON, 1962) relatou a deteriorização de concretos à base de cimento Portland comum e de alto forno, quando resfriados em água, após aquecimento acima de 300°C.

3.3.1. Constituintes

Segundo Taylor (1964) os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Têm ainda, como constituintes menores, impurezas, óxido de sódio, óxido de potássio, óxido de titânio, e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e de sódio constituem os denominados álcalis do cimento. Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem 95 a 96% do total na análise de óxidos.

Segundo Prisszkulnik (1972) a magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, esta usualmente na proporção de 2 a 3%, limitada, pelas especificações, a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%).

4. MATERIAIS E METODOS

O presente trabalho irá estudar o co-produto de resíduo de refratário de tijolos silico-aluminosos. Este resíduo é resultado do processo de reciclagem de tijolos de desmonte de proteções refratárias de processos siderúrgicos. Este resíduo será estudado em substituição total ao agregado natural em argamassa de proteção de proteção passiva de estruturas metálicas.

4.1. Metodologia

4.1.1 Caracterização resíduo

O resíduo foi caracterizado físico e quimicamente. A caracterização física contou com os ensaios de umidade, perda ao fogo, granulometria, massa específica, densidade aparente, umidade. A caracterização química e mineralógica foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X (EDX) e de difração de raios-X (DRX).

4.1.2 Desenvolvimento e avaliação dos compósitos cimentícios

Para o desenvolvimento e avaliação da argamassa de proteção passiva foram realizadas 2 etapas: A primeira foi definida duas composições para corte A e B e posteriormente as variações dessa duas composições C, D, E e F.

Abaixo estão apresentadas as características físico-químicas de algumas matérias primas utilizadas tais como: Citrato de sódio, vermiculita, reciclado silico-aluminoso, micro-silica, cimento aluminoso e argila.

Tabela 10- Citrato de sódio

Propriedades Químicas- Citrato de sódio	
Parâmetro	%
Na ₂ C ₆ H ₈ O ₇	99,29

Fonte: Próprio autor

Tabela 11- Vermiculita

Propriedades Químicas Vermiculita	
Parâmetro	
Densidade	0,28 g/cm ³
Umidade	1,65%

Fonte: Próprio autor

Tabela 12- Reciclado sílico aluminoso

Propriedades Químicas Reciclado	
Parâmetro	%
SiO ₂	41,13
TiO ₂	2,31
Al ₂ O ₃	51,07
Fe ₂ O ₃	1,85
CaO	0,88
MgO	1,53
Na ₂ O + K ₂ O	0,81

Fonte: Próprio autor

Tabela 13- Micro-sílica

Propriedades Químicas Micro-sílica	
Parâmetro	%
PF	2,5
SiO ₂	97,88
Al ₂ O ₃	0,32
Fe ₂ O ₃	0,08
CaO	0,52
MgO	0,26
Na ₂ O	0,03
K ₂ O	0,49
UMIDADE	54,00%
pH	7,34

Fonte: Próprio autor

Tabela 14- Cimento Aluminoso

Propriedades Químicas - Cimento Aluminoso	
Parâmetro	%
Al ₂ O ₃	58,58
Fe ₂ O ₃	1,61
CaO	32,47

Fonte: Próprio autor

Para este compósito (argamassa) foi definidas as proporções na composição de alguns materiais, anteriormente citados, cujas propriedades de refratariedade entre outras já são conhecidas. A composição proposta para as argamassas utilizadas estão apresentadas em percentual na tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 15.

Tabela 15- Descrição e quantidades dos materiais utilizados para confecção dos traços

Material	A		B		C		D		E		F	
	Quantidade	%										
Argila Rosa Comum < 75 microns	100	1,0	600	6	600	6,0	1000	10,0	600	6,0	600	6,0
Cimento aluminoso 51	0	0,0	1000	10	0	0,0	2000	20,0	2000	20,0	0	0,0
Cimento portland CP-V	1500	15,0	0	0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2000	20,0
Citrato de sódio	5	0,1	5	0,05	5	0,1	5	0,1	5	0,1	5	0,1
Sucata de jornal	500	5,0	500	5	500	5,0	500	5,0	500	5,0	500	5,0
Vermiculita	600	6,0	600	6	600	6,0	1000	10,0	600	6,0	600	6,0
Espumante	10	0,1	10	0,1								
Reciclado sílico-aluminoso <600	3800	38,0	3800	38	2500	25,0	5000	50,0	3800	38,0	3800	38,0
Microsilica					100	1,0	100	1,0	100	1,0	100	1,0
Gesso	3500	35,0	3500	35	5700	57,0	400	4,0	2400	24,0	2400	24,0
TOTAL	10015	100,2	10015	100,2	10005	100,1	10005	100,1	10005	100,1	10005	100,1
Água	8490	84,9	7670	76,7	5280	52,8	8800	88,0	7500	75,0	7490	74,9

Fonte: próprio autor

Figura 10- Mistura C



Fonte: Próprio autor

O compósito cimentício foi preparado por meio de um misturador mecânico e posteriormente compactado manualmente nos moldes. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível sendo fibrado em mesa fibratória. Os corpos de provas permaneceram nas primeiras 24 horas de cura, nas formas, sendo desmoldados após este período e deixados ao ar para simulação da ambiente de aplicação da argamassa quando aplicada sobre a estrutura metálica. Foram avaliadas as propriedades após 24h, 3 dias, 7 dias e 28 dias.

Figura 11- Moldagem corpo-de-provas



Fonte: Próprio autor

Foram avaliadas de cada composição as propriedades químicas e físicas do compósito. Os tempos de cura para o estudo das propriedades físicas foram após 24h, 3 dias, 7 dias e 28 dias.

Figura 12- Amostra para caracterizações físicas



A caracterização física contou com os ensaios de fluidez, tempo de pega, resistência à compressão, resistência à flexão, perda ao fogo, granulometria, massa específica, densidade aparente, massa unitária e condutividade térmica. A

caracterização química e mineralógica será realizada pelos ensaios por espectrometria de fluorescência de raios-X (EDX) e de difração de raios-X (DRX).

4.1.2 Avaliação das propriedades térmicas das composições das argamassas

Foram moldados corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm utilizando os traços definidos anteriormente de argamassas confeccionadas com resíduo em atmosfera oxidante. Em seguida, partes das amostras foram queimadas a 600°C e 1000°C com 5 horas de patamar, a uma taxa de aquecimento de 100 °C/hora e posteriormente avaliadas as propriedades químicas e físicas dos corpos de prova para comparação com os testes anteriormente realizados com os corpos de prova sem tratamento térmico.

Figura 13- Amostras para RCTA, RFTA e DMA/PA



Fonte: Próprio autor

Não foi possível a reprodução da curva de temperatura padronizada de acordo com a norma. ABNT NBR 5628:2001 – “Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo”. De acordo como a norma NBR 5628 (2001), Incêndio-Padrão é a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, dada pela seguinte expressão (1):

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log (8t+1) \quad (1)$$

Duas amostras com medidas de 230 x 115 x 63 x 63 mm de cada composição foram moldadas para avaliação da condutividade térmica das composições

Figura 14- Amostra para condutividade térmica



Fonte: Próprio autor

4.2 Caracterização do resíduo

Foi realizada a caracterização inicial do co-produto refratário nos seguintes ensaios: Densidade real, densidade aparente, granulometria, difração de raios-x (DRX), perda ao fogo (PF), umidade, análise termogravimétrica (TGA), Fluorescência de raios-x (AQ).

As amostras foram preparadas a partir do quarteamento de 1kg do co-produto refratário, separando as quantidades de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e posteriormente pulverizadas quando necessário.

Tabela 16- Quantidade de amostra

Ensaio	Quant. média da amostra
AQ e DRX	2 a 30g (pulverizada)
Da/Pa	90g de amostra
Umidade	5g
P.Fogo (PF)	40g

Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Preparação da amostra

O quarteamento do resíduo foi realizado em quarteadores Jones de 20 células (30 mm e 40 mm) gerando as amostras para os ensaios de acordo com a tabela 15.

4.2.2 Preparação de amostras para ensaio de Densidade aparente e porosidade aparente (Da/Pa)

Utilizando-se a Rotap e peneiras de laboratório, foi classificado o material na fração 4,0/2,0 mm. O material retido na peneira 4,0 mm foi britado, classificado e incorporado ao obtido no item anterior. Jateou o material classificado entre 4,0/2,0 mm com ar comprimido.

4.2.3 Pulverização de amostra para DRX, TGA e FRX.

Pulverizou 50 g da amostra em cápsula de tungstênio e em moinho Shatter-Box por um tempo suficiente para permitir que toda a amostra fique com granulometria menor que 75µm.

4.2.4. Métodos de ensaios para caracterização do resíduo

4.2.4.1 Perda ao fogo – Forno mufla

A perda ao fogo foi determinada gravimetricamente em balança analítica e forno mufla. Pesou-se em um cadinho vazio com precisão de 0,0001g (P1) e adicionou aproximadamente 1g da amostra seca no cadinho (P2). Calcinar a amostra 1100°C por 1h em atmosfera oxidante e posteriormente resfriar em dessecador. Pesar novamente o cadinho (P3).

Calcular a porcentagem de perda ao fogo através da seguinte equação (2):

$$PF(\%) = \frac{(P2 - P3)}{(P2 - P1)} \times 100 \quad (2)$$

4.2.4.2 Granulometria

A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a norma ABNT 6946 (1996). Montou-se o conjunto de peneiras ABNT 4,75mm; 2,36mm; 1,70mm 1,00mm; 600um; 212um; 75um, iniciando-se com a peneira mais fina da série, que deve ser montada sobre o fundo. Sobre esta montar as demais peneiras em ordem crescente por abertura de suas malhas, ficando a mais grossa no topo do conjunto. Pesou a amostra de ensaio (m_1) e posteriormente colocada no topo do conjunto fechando o conjunto com uma tampa. Colocar o conjunto montado na ROTAP e peneirar por 1 minuto. Pesar a fração retida em cada peneira com resolução mínima de 0,1 g, inclusive o fundo, e designar cada massa de fração retida por m .

O resultado expresso em porcentagem, com uma casa decimal, calculado pela seguinte equação (3):

$$P = \frac{m}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

P = porcentagem de uma determinada fração retida em uma peneira.

M = massa da fração retida em uma peneira, em gramas.

M1 = massa inicial da amostra de ensaio, em base seca, em gramas.

4.2.4.3 Umidade balança termogravimétrica

A balança termogravimétrica une a funcionalidade de uma balança de precisão com um sistema de aquecimento por lâmpada halogênica. Dessa forma, a umidade do material determinada em tempo reduzido com precisão assegurada.

Ajustada a temperatura do equipamento para a análise em 110°C, após o ajuste da temperatura foi adicionado no mínimo 5 g de amostra no prato, espalhando-a de forma homogeneia em toda superfície do prato.

4.2.4.4 Densidade

A. Densidade aparente e porosidade (grãos)

A densidade aparente foi determinada de acordo com a norma NBR 6220 (2011). Montar o sistema de pesagem da balança hidrostática imergindo o cesto metálico no recipiente com água, acoplar o fio do cesto metálico na balança.

Pesou-se a amostra para determinar a massa seca (m_s) e colocada a amostra posteriormente em um béquer contendo água de forma que a amostra fique totalmente coberta. A amostra foi mantida em fervura por um tempo mínimo de 5 minutos (chapa elétrica). Determinada a massa imersa (m_i) da amostra, pesando em um cesto metálico suspenso por um fio metálico acoplado a balança previamente tarada e água com densidade volumétrica conhecida. Determinada a massa úmida (saturada) (m_u) secando os grãos com um pano e posteriormente transferi-los para o prato superior da balança e determinar a massa úmida saturada (m_u).

Calcular a DMA (densidade massa aparente) e PA (porosidade aparente) através das seguintes equações (4):

$$\begin{aligned}
 VA &= \frac{m_u - m_i}{m_e \text{ líquido}} \text{ (cm}^3\text{)} \\
 DMA &= \frac{m_s}{VA} \text{ (g / cm}^3\text{)} \\
 PA &= \left(\frac{m_u - m_s}{m_e \text{ líquido} \times VA} \right) \times 100 \text{ (\%)}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Onde:

VA = volume aparente em cm³;

DMA = densidade massa aparente em g/cm³;

PA = porosidade aparente em %;

m_s = Massa do corpo-de-prova seco em g;

m_u = Massa do corpo-de-prova saturado em g;

m_i = Massa imersa do corpo-de-prova em g;

m_e = Massa específica ou Densidade, em g/cm³.

B. Massa específica - Picnômetro

Utilizando o princípio de Arquimedes foi determinada a densidade real do agregado moído. Anotou-se a temperatura da água usada no ensaio (aproximadamente 23°C). Pesado o picnômetro vazio (m1) e posteriormente pesado aproximadamente 4 g da amostra em um béquer (m2). Encher o picnômetro de água, secar por fora com um papel macio e pesar (m3). Transferir a amostra para picnômetro vazio com um funil. Após total transferência da amostra, completar o picnômetro com água, secá-lo e pesar (m4).

Calcular a densidade através das seguintes equações (5):

$$Vd = \frac{m_4 - m_3}{m_e \text{ líquido}} (cm^3)$$

$$d = \frac{m_s}{Vd} (g / cm^3) \quad (5)$$

Onde:

Vd = volume deslocado de água;

d = densidade em g/cm³;

me = Massa específica da água, em g/cm³

4.2.4.5 Perda ao fogo - TGA

Foi determinada a perda ao fogo do material por análise Termogravimétrica (TG) executada no equipamento Leco CS-200 em atmosfera oxidante utilizando aproximadamente 3 g de amostra pulverizada.

Gases: Oxigênio Analítico 99,5%; pressão 35 psi +/- 5%. Nitrogênio Analítico 99,9%; pressão 35 psi +/- 5%.

4.2.4.6 DRX e FRX – Fases mineralógicas e Análise química

A avaliação de fases presentes foi realizada utilizando um difratômetro PHILLIPS modelo X'Pert MPD. Para realização da análise utilizou-se um programa com um intervalo de varredura de 5 a 75°, com avanço gradual de 13 0,05° a cada intervalo de 1 s. A configuração do aparelho contou com uma máscara com abertura de 15 mm na saída do tubo, uma corrente no filamento de 40 mA e uma tensão de aceleração dos elétrons de 40 kV.

A análise química do material foi realizada no equipamento MAGIC-PRO PW254 PHILIPS. A amostra foi fundida em cadinhos de platina em forno automático para uma melhor homogeneização da mesma. Posteriormente moldada em formato de pastilha para leitura no equipamento.

4.2.4.7 Resistência à flexão a temperatura ambiente (RFTA)

O ensaio foi realizado nos corpos de provas no formato de barras de dimensões de 160 x 40 x 40 mm³ e que passaram por um processo de tratamento térmico de 600 °C e 1000 °C.

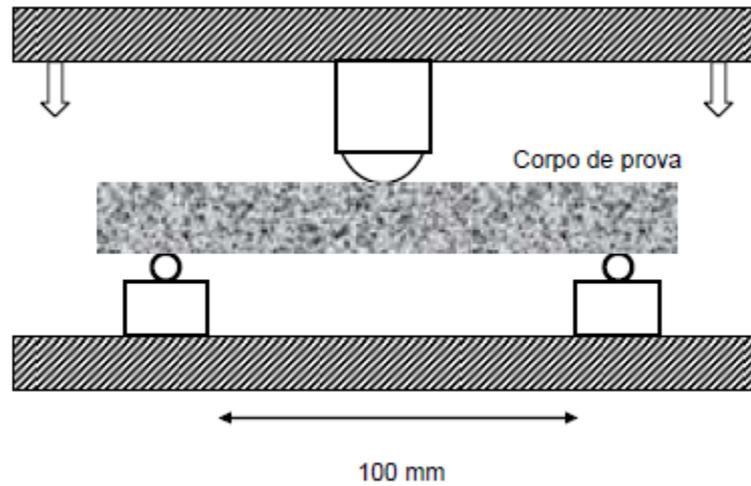
O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica Kratos, modelo KE 3000 MP, com capacidade de 3,0 toneladas, distância entre os apoios de 100 mm e taxa de aplicação de carga de 60 N/s (figura 16). Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 11222 (Materiais refratários densos não conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente). Como o ponto de aplicação de carga ocorreu no meio do comprimento do corpo de prova, foram produzidas duas metades que posteriormente foram utilizadas nos ensaios de resistência à compressão a temperatura ambiente, densidade e porosidade aparente.

Figura 15- Prensa hidráulica Kratos



Fonte: Próprio autor

Figura 16 Esquema do ensaio de resistência à flexão a temperatura ambiente



A figura 17 apresenta o esquema onde normalmente, o corpo de prova se rompe na região muito próxima à metade de seu comprimento. Quando isto ocorreu, o resultado apresentado foi fornecido por meio da tensão necessária para romper o material, de acordo com a equação 6.

$$\sigma_f = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (6)$$

Onde:

F = força aplicada pela prensa para romper a amostra (N).

l = comprimento inicial da amostra (m).

b = espessura inicial da amostra (m).

h = altura inicial da amostra (m).

O objetivo desse teste foi caracterizar as diferentes misturas avaliando a influência da alteração no teor de algumas matérias-primas nos produtos testados e o efeito da temperatura em cada uma das misturas.

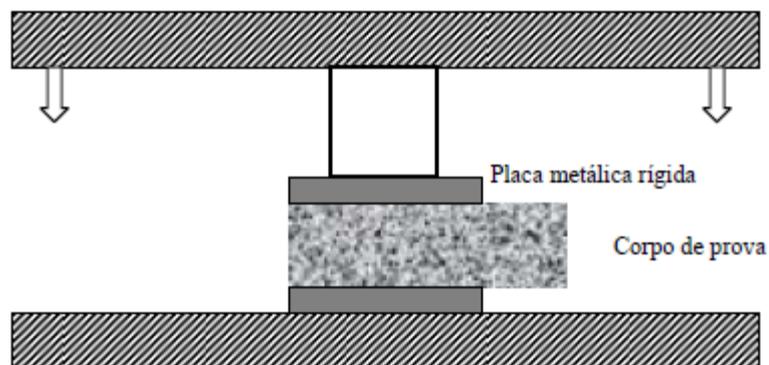
4.2.4.8 Resistência à compressão a temperatura ambiente (RCTA)

Este ensaio foi realizado em uma das metades dos corpos de provas que sobraram do ensaio de RFTA. A amostra foi envolvida na parte superior e inferior (face de maior área) por uma chapa metálica rígida com as dimensões de 45 mm de comprimento e 40 mm de largura.

O ensaio foi realizado em prensa hidráulica Kratos, modelo ECC - 100 MP de 100 toneladas, com uma taxa de aplicação de carga durante ensaio de 800 N/s. O procedimento de realização do teste seguiu a norma ABNT NBR 11222 (Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente).

Na figura 18 encontra-se um esboço do equipamento de ensaio.

Figura 17 - Esquema do ensaio de resistência à compressão a temperatura



Fonte: Próprio autor

O objetivo principal desse teste foi caracterizar as diferentes misturas avaliando a influência da alteração no teor de algumas matérias-primas e o efeito da temperatura na resistência mecânica dos produtos testados.

4.2.4.9 Variação linear permanente

Este ensaio é uma medida da variação dimensional devido à dilatação térmica permanente ao longo do comprimento, largura e espessura do corpo de prova. Avaliou-se as alterações dimensionais ao longo dessas direções do corpo de prova

entre uma amostra que passou pelo processo de cura a 350 °C/ 5 horas (atmosfera redutora – caixa de coque) e pelo processo de queima nas diversas temperaturas analisadas. O resultado foi obtido de acordo com a seguinte equação 7:

$$VLD = \frac{DF - DI}{DI} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

VLD = variação linear dimensional (%);

DF = média das dimensões lineares finais (mm);

DI = média das dimensões lineares iniciais (mm).

Os corpos de provas para este ensaio possuem o formato de barras nas dimensões de 160 x 40 x 40 mm³ (item 3.2.3). O procedimento de realização do teste seguiu a norma ABNT NBR 8385 (Determinação da variação linear dimensional), nas mostras tratadas termicamente nas temperaturas de 600 °C e 1000 °C.

4.2.5.0 Módulo elástico

A determinação do módulo elástico foi realizada utilizando a técnica de ultrassom, em corpos de provas no formato de barras nas dimensões de 160 x 40 x 40 mm³ curados 28 dias. O procedimento para realização do ensaio seguiu a descrição do procedimento interno da Magnesita Refratários S.A..

Figura 18 Equipamento de ultra-som



Fonte: Próprio autor

O módulo elástico foi determinado utilizando a equação 8 abaixo:

$$ME = V^2 \times \rho \times 0,9333 \quad (8)$$

Onde:

ME = módulo elástico (GPa)

V = velocidade sônica (km/s)

ρ = densidade média aparente (g/cm³)

A velocidade sônica foi determinada através da relação 9 abaixo:

$$V_{ps} = \frac{L}{T}$$

(9)

Onde:

V_{ps} = velocidade de pulso sônico (km/s) = V

L = comprimento do corpo de prova (km)

T = tempo de transmissão do pulso sônico (s)

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do resíduo refratário <600µm

A análise granulométrica (tabela 17) demonstrou que o agregado pode ser classificado como agregado miúdo com 100% das frações passantes abaixo de 600µm.

Tabela 17- Análise granulométrica

Diametro(µm)	% passante
600.0	100,00
425.0	97,97
300.0	92,05
212.0	81,07
125.0	55,30
75.00	26,94
45.00	11,93
10.00	3,37

Fonte: Próprio autor

O agregado também apresentou baixa umidade (tabela 18) e pouca variabilidade em diferentes métodos, possivelmente o agregado miúdo não apresenta grande taxa de absorção de umidade do meio. Essa baixa umidade apresentada pelo agregado interfere pouco na densidade aparente dos grãos e reduz à formação de óxidos hidratáveis a temperatura ambiente.

Apresentou baixa porosidade e densidade adequada para tijolos refratários silico-aluminosos que variam em torno de 3,20 g/cm³ (tabela 19). A porosidade normalmente é alterada com o aquecimento dos tijolos refratários devido à formação de novas fases mineralógicas e infiltração de contaminantes nas faces quentes dos tijolos.

Tabela 18- Umidade

Umidade	TGA	Balança termogravimétrica
	0,44%	0,35%

Fonte: Próprio autor

Tabela 19- Densidade

	Densidade g/cm ³
Pulverizado < 600um	3,02

Fonte: Próprio autor

As fases mineralógicas identificadas na DRX foram quantificadas na AQ (tabela 20) confirmando a presença dos óxidos presentes nestas fases. Por meio da AQ, pode definir o agregado como agregado miúdo com a composição química preponderantemente de óxidos de silício, alumínio, magnésio e ferro, os quais haviam sido identificados na DRX: Periclase – MgO, Corundum - Al₂O₃, Mullite - Al₆Si₂O₁₃, Graphite - C, Cristobalite - SiO₂, Magnesiochromite - MgCr₂O₄ Anorthite - CaAl₂Si₂O₈.

A fase grafita não foi avaliada pelo método FRX, devido às amostras serem calcinadas antes da moldagem das pastilhas. Porém a perda ao fogo dá um indício implícito da pequena porcentagem presente de carbono no resíduo, devido à perda ao fogo 1100°C ser menor que 1%, sendo conhecido que a fase grafita tem a perda total abaixo de 600°C.

Tabela 20- Análise química FRX e Difração de raio-x

	FRX (%)	
SiO ₂	25,23	20,87
TiO ₂	2,3	1,72
Al ₂ O ₃	49,9	37,93
Cr ₂ O ₃	0,23	0,5
Fe ₂ O ₃	10,03	18,76
MnO	0,35	0,8
CaO	1,74	4,18
MgO	9,31	13,87
Na ₂ O	0,3	0,17
K ₂ O	0,28	0,41
P ₂ O ₅	0,13	0,22
ZrO ₂	0,09	0,54

DRX	Periclásio - Mulita - Corindon - Cristobalita - Grafita - Anortita – Rutilo	Periclásio - Mulita - Corindon - Cristobalita - Grafita - Anortita – Rutilo
-----	---	---

Fonte: Próprio autor

Houve uma considerável diferença entre os métodos para avaliação da perda ao fogo (tabela 21), primeiro pela granulometria da amostra e principalmente pela sensibilidade do método TGA ser maior que o método gravimétrico comum. Possivelmente essa diferença é devida a absorção de umidade da amostra ao resfriar (método gravimétrico simples) e manuseio do cadinho de pesagem

Tabela 21- Perda ao fogo

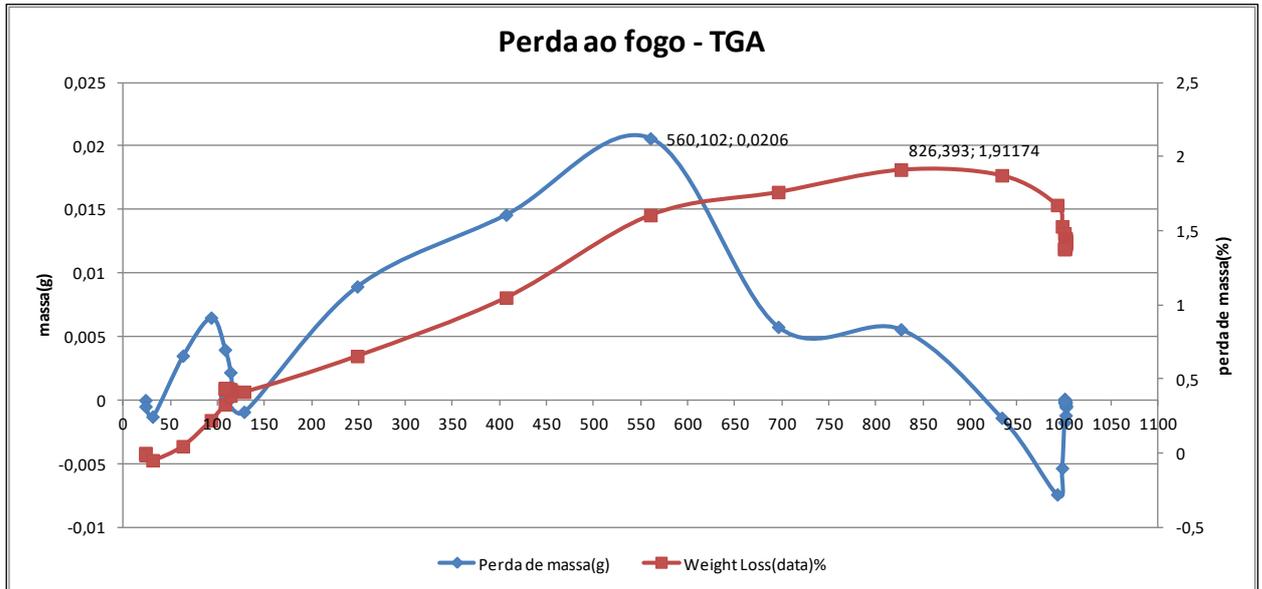
	TGA	Forno 1100°C
Perda ao fogo	0,95%	2,36%

Fonte: Próprio autor

A partir da observação do Figura 19-Perda ao fogo nota-se que o agregado tem perda de massa até aproximadamente 560°C e percentual máximo de perda de massa em 826°C. O agregado não apresentou perda considerável de massa o que leva a crer que possui considerável estabilidade térmica e pouca presença de

material orgânico no mesmo como contaminante. Há uma pequena variação de massa em aproximadamente 100°C, indicando a perda de água.

Figura 19-Perda ao fogo agregado reciclado



Fonte: Próprio autor

5.2 Caracterização das composições com agregados refratários

Foram testadas 5 composições (A,B,C,D,E e F) com diferentes materiais conforme tabela 15 já apresentada. Os primeiros testes foram realizados nas composições A e B para avaliação primária das características de resistência e densidade das misturas. Essas duas composições foram utilizadas como base de corte para as demais composições (C, D, E e F). Abaixo são apresentados na tabela 22 os resultados preliminares dos compósitos cimentícios A e B.

Tabela 22- RCTA E DMA/PA das composições A e B

AMOSTRA	DIAS	RESULTADO RCTA			RESULTADO DMA			RESULTADO PA		
		Mpa	Mediã	sdv	g/cm3	Mediã	sdv	%	Mediã	sdv
A	Cura 1 DIA	0,46			1,26			19,87		
A	Cura 1 DIA	0,47	0,48	0,02	1,25	1,24	0,03	20,66	21,83	2,75
A	Cura 1 DIA	0,50			1,21			24,97		
B	Cura 1 DIA	0,17			0,85			49,87		
B	Cura 1 DIA	0,19	0,18	0,02	0,90	0,88	0,03	44,92	46,14	3,30
B	Cura 1 DIA	0,16			0,90			43,62		
A	Cura 3 DIA	0,60			1,13			34,00		
A	Cura 3 DIA	0,58	0,58	0,01	1,19	1,16	0,03	28,29	30,56	3,03
A	Cura 3 DIA	0,58			1,18			29,39		
B	Cura 3 DIA	0,19			0,80			57,60		
B	Cura 3 DIA	0,18	0,18	0,02	0,86	0,83	0,03	51,75	54,46	2,95
B	Cura 3 DIA	0,16			0,83			54,04		
A	Cura 7 DIA	0,71			0,90			56,51		
A	Cura 7 DIA	0,60	0,64	0,06	0,99	0,96	0,05	46,97	50,01	5,63
A	Cura 7 DIA	0,62			0,99			46,55		
B	Cura 7 DIA	0,25			0,68			67,59		
B	Cura 7 DIA	0,24	0,29	0,08	0,70	0,68	0,02	66,00	67,41	1,33
B	Cura 7 DIA	0,38			0,65			68,65		

Fonte: Próprio autor

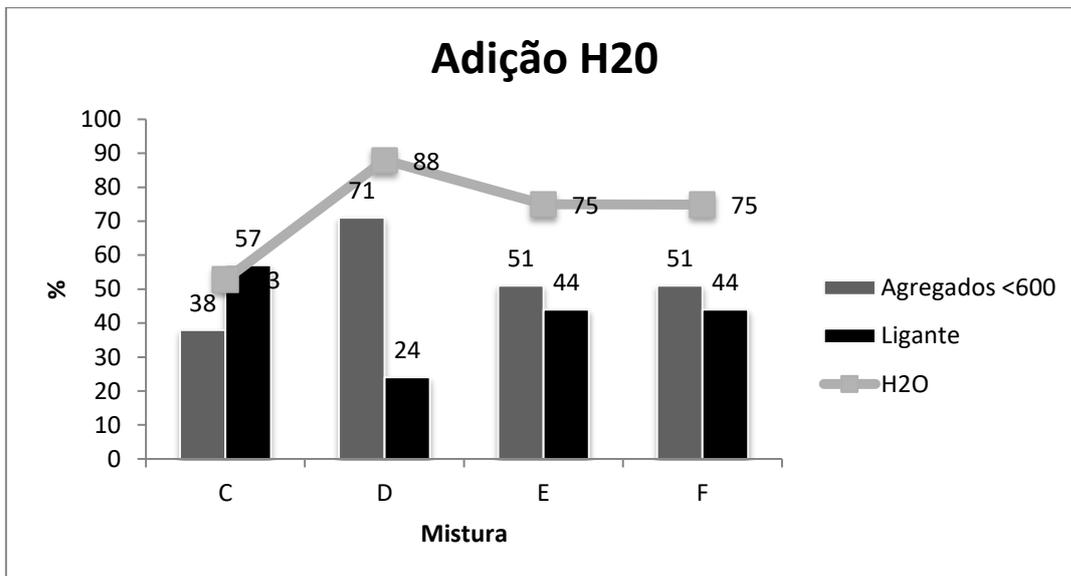
Como pode ser observado as primeiras composições apresentaram baixa resistência mecânica. As amostras apresentaram-se muito friáveis impossibilitando qualquer tipo de cobertura com essas misturas. Essas misturas utilizaram um percentual muito baixo de ligante hidráulico e um espumante para aumento da porosidade do material e consequentemente um abaixamento da condutividade térmica do material. Como essa composição foi um teste empírico de corte para composições C, D, E e F definindo um ponto de adição dos cimento aluminoso e cimento portland. Esses materiais não necessitam ter uma elevada resistência mecânica, porém essa deve ser mínima para se manterem aderidas a estrutura metálica.

As novas formulações foram definidas retirando o espumante e aumentando o percentual de ligante nas 4 próximas misturas. Abaixo nas figuras 19 e 20, são apresentadas algumas relações da adição de água, percentual de agregado e do ligante adicionado com a resistência inicial das composições testadas.

A demanda de água para uma mínima trabalhabilidade, fluidez e aderência do material é apresentada abaixo na figura 19 relacionando ao % de agregados < 600µm e do % de adição de ligante. Observou-se que o aumento do percentual de agregado aumenta a demanda de água da mistura independente do ligante utilizado. Essa demanda de água para os agregados é esperada devido à presença na

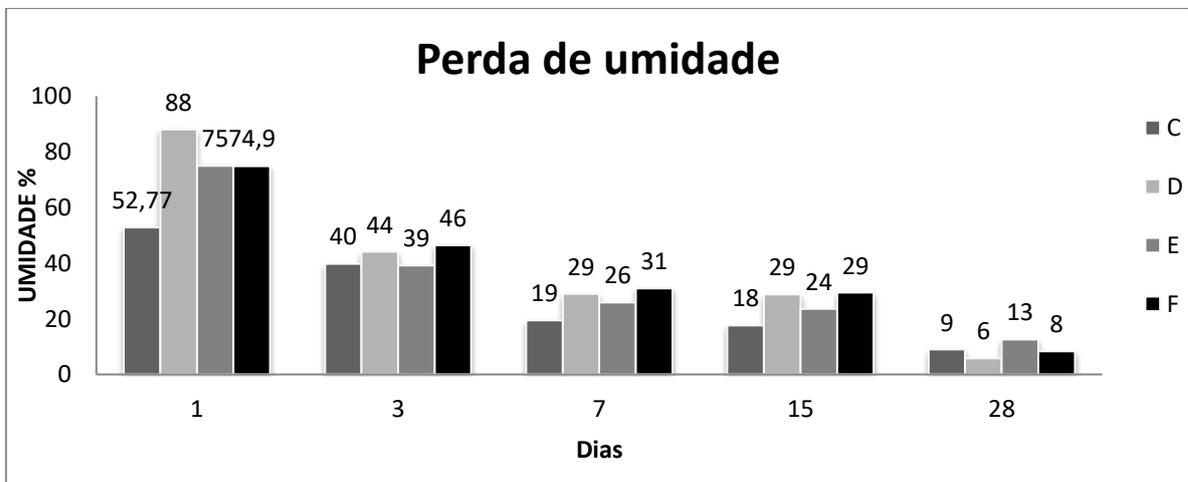
composição de materiais cuja absorção de água é conhecida tais como a argila e a vermiculita, isso pode ser comprovado avaliando a composição % desses minerais na composição D que apresenta o maior percentual de adição de água 88%, vermiculita 10% e argila 10%. Uma maior demanda de água por esses materiais pode ter um efeito adicional ao aumento de porosidade e a diminuição da resistência mecânica verde.

Figura 20- Adição de H2O



Fonte: Próprio autor

Figura 21 Perda de umidade



Fonte: Próprio autor

Taylor (1964) comenta que água absorvida pela mistura é aproximadamente 25% da água não evaporável, ou seja, somente 25% da água adicionada, aproximadamente, é mantida no compósito. Conseqüentemente as misturas que deveriam reter mais água em suas estruturas seriam as misturas D, E, F. Essa retenção de água pode ocasionar o aumento da porosidade, reações explosivas devido à liberação brusca de H₂O em períodos mais curtos da cura do material, sendo ideal utilizar um material com um % reduzido de adição de água.

Após 28 dias há uma considerável redução da água evaporável em todas as composições, sendo indício de baixa retenção de água não ligada nos poros da estrutura e uma menor possibilidade de aumento da condutividade térmica devido a esse efeito.

A tabela 23 apresenta os resultados encontrados no processo de mistura e moldagem das composições. A composição E foi a que melhor apresentou resultados de pega, fluência e a aderência (qualitativa). Conforme mencionado anteriormente o teor de água do concreto influencia no tempo de pega: um elevado teor de água favorece o aumento do tempo de pega (por gerar o hidrato mais solúvel), enquanto a falta de água possibilita a redução do tempo de pega (por favorecer a nucleação do hidrato menos solúvel e mais estável). O caso mais extremo aconteceu na mistura C a qual apresentou pega acelerada, sabidamente devido ao alto percentual de gesso adicionado a massa, cuja formação dos hidratados é muito rápida.

Tabela 23-Teste de aderência, tempo de pega e fluência livre

	C	D	E	F
Tempo de pega (min)	25,00	80,00	105,00	120,00
Fluência 15 batidas (mm)	125,00	121,00	134,00	128,00
Teste de aderência em placas metálicas	Boa aderência	Boa aderência	Boa aderência	Boa aderência

Figura 22- Aderência, fluidez e tempo de pega



Fonte: Próprio autor

Tabela 24- Granulometria das misturas secas

Aberturas	% passante			
	C	D	E	F
+ 4,75mm	0,00	0,40	0,00	0,00
4,75 / 2,36mm	1,07	0,88	1,47	1,37
2,36 / 1,70mm	2,01	1,88	1,87	1,66
1,70 / 1,00mm	5,79	8,48	4,67	5,12
1,00 mm/ 600 µm	5,38	6,41	5,50	5,01
600 µm / 212 µm	26,62	31,58	30,69	27,76
212µm / 75 µm	47,78	22,99	24,98	21,13
- 75 µm	10,62	26,84	30,38	37,38

Fonte: Próprio autor

Os materiais usados foram definidos para manter uma granulometria da mistura abaixo de 600 µm para os agregados miúdos. A tabela 24 apresenta os valores retidos nas peneiras de abertura 4,75mm – 75µm onde os valores apresentados

condizem com as granulométrias das materias primas utilizadas, os valores acima de 600 µm foi pela adição da sucata de jornal cujo granulometria e forma não é características dos agregados para argamassa ou concretos. A granulometria dos agregados é importante para compactação e uniformidade do compósito final após moldagem ou projeção, O uso de granulometrias finas é mais eficiente, devido à sua melhor distribuição na matriz dos concretos. As quatro composições não apresentaram diferenças consideráveis em suas granulométricas secas.

A análise química, DRX, perda ao fogo, aderência, tempo de pega foram analisados dos corpos de prova moldados resíduos das análises de RCTA,

Tabela 25- AQ, DRX e Perda ao fogo

Parâmetro	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
PF	11,82	11,97	14,38	14,98	14,32	14,93	13,23	14,63
SiO2	30,75	30,31	37,39	37,34	31,35	31,80	35,89	35,66
TiO2	1,26	1,30	2,00	2,05	1,84	1,82	1,43	1,41
Al2O3	24,81	24,65	42,52	42,33	39,92	39,77	28,18	27,88
Cr2O3	0,15	0,39	0,12	0,19	0,36	0,25	0,25	0,29
Fe2O3	1,80	1,95	2,51	2,53	2,16	2,10	2,45	2,48
MnO	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	0,04	0,04
CaO	36,44	36,56	9,97	10,12	20,10	20,09	27,31	27,80
MgO	3,43	3,52	3,68	3,66	2,81	2,81	2,98	2,99
Na2O	0,17	0,13	0,22	0,18	0,26	0,16	0,21	0,16
K2O	0,99	0,98	1,21	1,23	0,96	0,96	1,04	1,08
P2O5	0,20	0,20	0,17	0,19	0,17	0,17	0,20	0,21
ZrO2	0,00	0,00	0,17	0,16	-	0,06	0,01	0,01

DRX	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
	CaSO4!2H2O - Na2Ca5(SO4)6! 3H2O - Cristobalita - Mulita - CA2 - Quartzo - Caulinita	CaSO4!2H2O - Corindon - Mulita - Cristobalita - Cristobalita - Quartzo - Caulinita -	Mulita - Quartzo - Cristobalita - Caulinita - Corindon - Gelenita - Etringita	Mulita - Cristobalita - Quartzo - Caulinita - Gelenita - Corindon - Etringita	CaSO4!2H2 O - Quartzo - Mulita - Cristobalita - CaSO4 - Etringita - Corindon - Caulinita	CaSO4!2H2 O - Mulita - Cristobalita - Corindon - Etringita - Caulinita - Quartzo - CaSO4	CaSO4!2H2 O - Calcita - Mulita - Cristobalita - Corindon - Etringita - Portlandita - Caulinita - CaSO4	CaSO4!2H2 O - Calcita - Mulita - Periclásio - Portlandita - Quartzo - Corindon - Etringita - Cristobalita - Caulinita

Fonte: Próprio autor

Na tabela 25 são apresentados os resultados de AQ e DRX, observa-se fases e percentuais de óxidos minerais os quais podemos considerar como atuantes principais na propriedade de refratariedade dos matérias cerâmicos e estabilidade

térmica das composições. A presença de alguns silicatos de alumínio e aluminatos de cálcio além da presença do CaO (Cal), são importantes nas fases de hidratação dos cimentos portland e aluminoso. A resistência inicial e pega hidráulica das formulações também depende da presença desses óxidos para a formação inicial de algumas espécies responsáveis pelos fenômenos anteriores.

Diversas fases hidratadas são formadas pela reação da água com estes aluminatos de cálcio. Quatro hidratos predominantes são produzidos na pega do cimento aluminoso: CAH10 ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), C2AH8 ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), C3AH6 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e AH3 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) [27]. O tipo e a quantidade de hidratos formados dependem das fases mineralógicas do CAC, da razão cimento/água e da temperatura da reação.

A principal importância da avaliação do DRX e AQ é relativo à presença de MgO, pois a presença do mesmo em grande quantidade acarreta a formação de compostos hidratáveis. Quando a hidratação ocorre em um meio poroso como os concretos refratários, existe uma tendência de acomodação do volume adicional inicialmente gerado pela formação de brucita $(\text{MgOH})_2$ e posteriormente a formação de Magnesita (MgCO_3) na estrutura, preenchendo os poros do material. Devido ao crescimento dos cristais de hidróxido, tensões de compressão se desenvolvem na estrutura do material. Caso estas tensões superem a resistência mecânica do corpo, este se rompe e rapidamente se desintegra na forma de pó. Esse controle da presença de MgO é muito importante na avaliação da matérias primas utilizadas na composição da argamassa evitando o efeito de expansão da estrutura e trincas no produto.

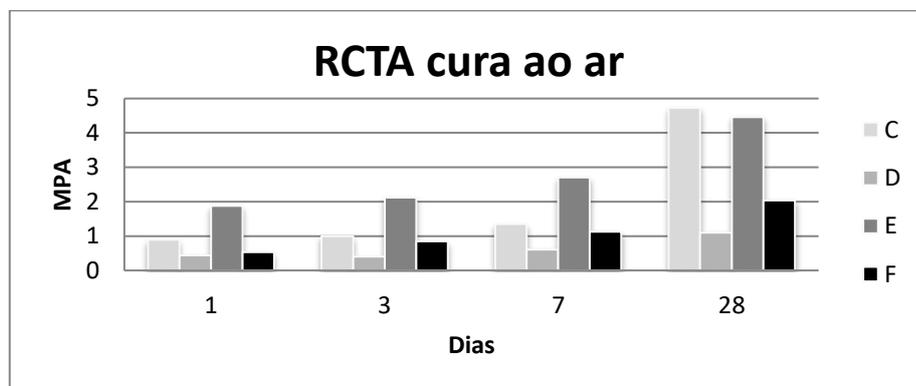
O tempo de pega (trabalhabilidade) também é influenciado pela presença da magnésia. De uma forma geral, o aumento de pH do sistema pode acelerar o endurecimento do ligante com isso acarretando problemas na aplicação do material. Essa avaliação também deve considerar a presença de compostos alcalinos como P e Na e K, cuja presença também tem efeito sobre o pH da mistura. Nas quatro misturas avaliadas não foram apresentadas consideráveis quantidades desses óxidos.

A presença das fases caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)₂ e muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)₂ presentes na argila podem ocasionar uma expansão e perda de massa devido à decomposição e posterior eliminação da hidroxila em forma de vapor dessas fases, principalmente entre 500 e 600 °C esse efeito de expansão térmica da argila pode ocasionar uma contração do material.

5.2.1 RCTA RFTA e Densidade

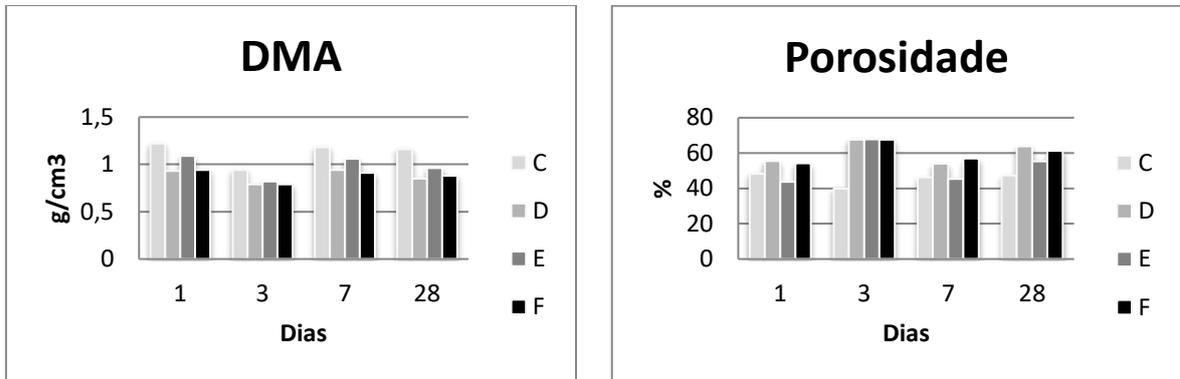
O RCTA foi avaliado em corpos de prova curados ao ar nos períodos de 24h a 28 dias de envelhecimento. Na figura 25 são apresentados os valores da resistência mecânica nas misturas C, D, E e F. Todos as composições apresentaram valores crescentes de resistência mecânica em relação a resistência inicial, sendo que duas composições tiveram maiores resistências e duas com menores resistências. Nas composições C e E obtivemos resultados com variação consideravelmente maior em relação à resistência inicial e a final e valores até 4 vezes maiores do que a composição D. Já foi comentado que o percentual de adição de água poderia interferir na resistência mecânica verde das composições, sendo a composição D a de maior percentual de água adicionada.

Figura 23 RCTA cura ao ar



Fonte: Próprio autor

Figura 24- Gráficos de DMA/PA

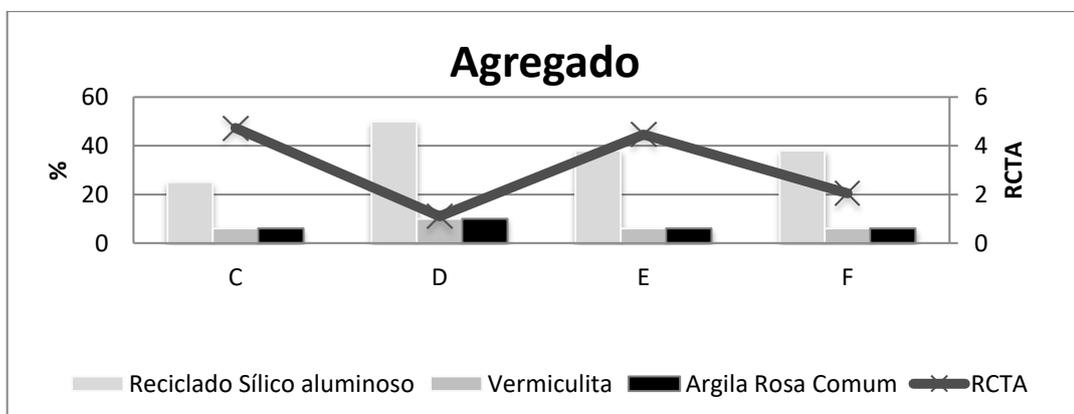


Fonte: Próprio autor

Conforme os resultados obtidos de densidade e porosidade apresentados na figura 26, não há diferenças consideráveis de densidade e porosidade entre as formulações. A adição de % iguais das matérias-primas, que provavelmente alterariam a densidade e porosidade da estrutura, justifica essa uniformidade dos resultados, tais como a vermiculita e jornal moído (reductor orgânico de densidade). Todos os compósitos apresentaram porosidades maiores que 45% em 28 dias, valor tido como referencial para materiais isolantes de baixa condutividade térmica.

Correlacionando a densidade e porosidade com a resistência mecânica, pode ser observado que as composições (C e E) com as menores porosidades e maiores densidades foram as que tiveram melhores valores de RCTA.

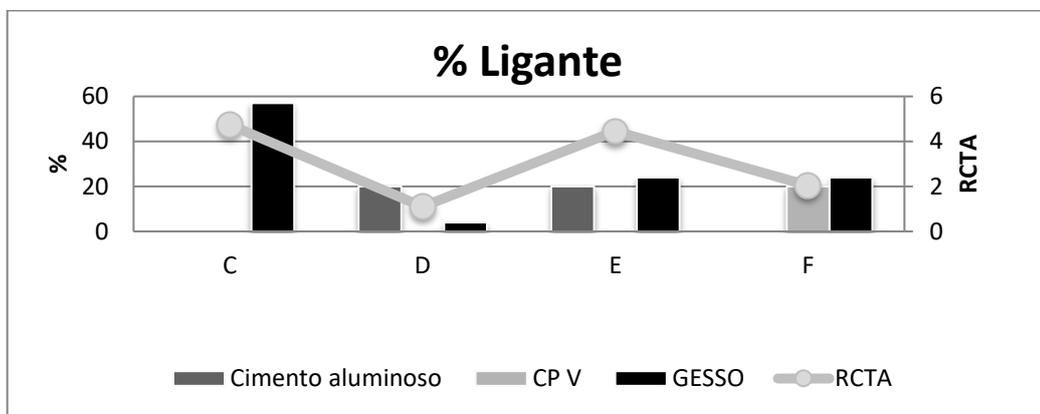
Figura 25- % Agregados x RCTA



Fonte: Próprio autor

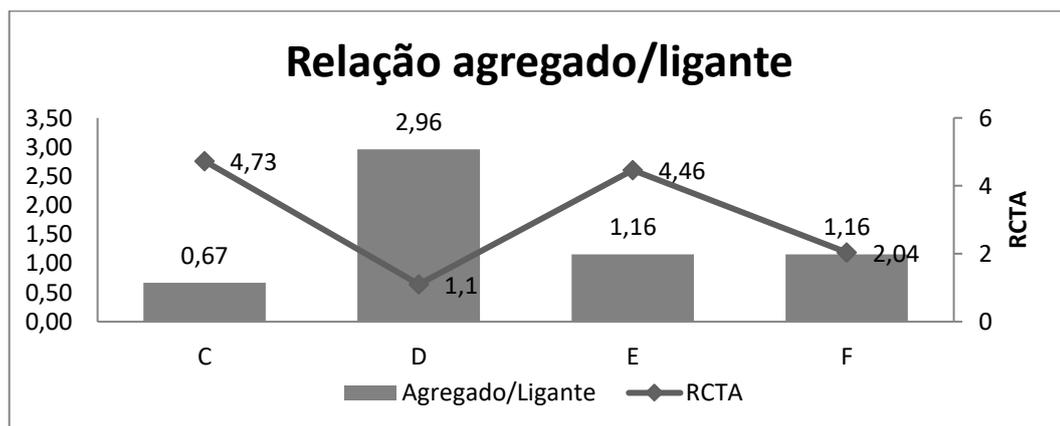
A relação apresentada na figura 27 entre o percentual de adição de agregados e da resistência mecânica cria um indicio preliminar de que a variação abaixo de 60% de adição de agregados não interfere na resistência mecânica das composições. As composições foram definidas com percentuais variáveis de vermiculita, reciclado aluminoso e argila, mas não demonstram sensibilidade em relação essas variações, como por exemplo, a composição E e F com mesmos % tiveram diferentes valores de resistência mecânica.

Figura 26- % ligante x RCTA



Fonte: Próprio autor

Figura 27- Agregado/ligante x RCTA



Fonte: Próprio autor

As figuras 28 e 29 apresentam a relação de agregados e dos ligantes em relação a resistência mecânica verde. Utilizando as comparações realizadas no gráfico 5 pode ser inferido que o percentual de adição do ligante tem forte influência da resistência mecânica das composições, indicando que algumas configurações entre os ligantes

também influencia nesta propriedade. As composições C foi a que teve maior percentual de adição de ligante com maior resistência seguida da composição E, que embora tenha o mesmo % de ligante que a F, apresentou melhor resistência que a mesma. A configuração gesso + cimento portland V proporcionou uma resistência inicial menor que a configuração gesso + cimento aluminoso. É conhecido que o cimento aluminoso tem maior resistência inicial do que o cimento portland conforme relatado por Taylor (1964).

A figura 29 demonstra a relação % agregado por % ligante para as resistências adquiridas pelas composições C, D, E e F. A composição C que já foi identificada com melhor RCTA apresenta a menor relação agregado/ligante 0,67 e a composição com maior relação 4,73 foi a que teve menor resistência mecânica. As composições E e F com relações agregado/ligante próximas, tiveram as resistências provavelmente relacionada ao efeito da configuração do ligantes citada anteriormente.

Tabela 26- Módulo de elasticidade

Composição	ME (Gpa)			Média	SD
C	2,70	2,68	2,76	2,71	0,04
D	0,76	0,50	0,60	0,62	0,13
E	1,60	1,45	1,63	1,56	0,10
F	1,10	1,13	1,20	1,14	0,05

Fonte: Próprio autor

Foi avaliado o módulo elástico das composições após 28 dias encontrando os valores apresentados na tabela 26, onde podemos avaliar de modo indireto pela modulo elástico a rigidez do material avaliado. A leitura por meio de ultra-som também possibilitou avaliação da inexistência de descontinuidade tais como trincas e espaços vazios devido a vibração para moldagem dos corpos de prova e a uniformidade da conformação na estrutura física dos corpos de prova para o ensaio de condutividade térmica.

Avaliando os resultados da tabela 26 que indica que a composição C e E são as composições que apresentaram maior ME e rigidez, confirmando a melhor resistência entre as composições avaliadas.

5.2.2 Ensaio após Queima

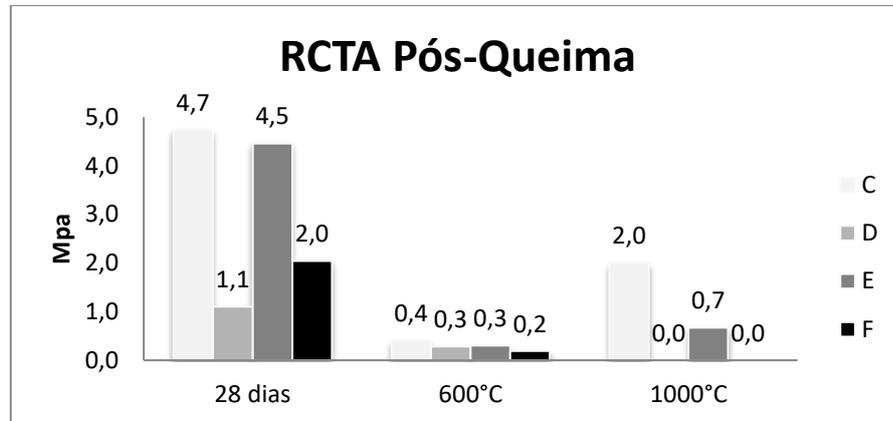
Os corpos de prova foram queimados em 600°C e 1000°C em fornos elétricos para avaliação da resistência, densidade, porosidade e variação linear.

Os gráficos de RCTA demonstram que houve considerável perda de resistência mecânica quando as composições foram queimadas, principalmente em 600°C, onde os corpos de prova C, D, E e F perderam praticamente toda resistência mecânica. Isto pode ter ocorrido devido ao enfraquecimento das ligações de aderência hidráulica dos cimentos com os agregados, em temperaturas menores que 1000°C, sendo insuficiente para formação de ligações cerâmicas que poderiam aumentar essa resistência. A aderência cerâmica normalmente em concretos ou argamassas inicia em torno de 800°C, mas como houve a adição do resíduo refratário com maior refratariedade o que pode ter ocasionado uma expansão irregular dos corpos de prova, tendo um efeito negativo na resistência das composições e também a não formação das ligações cerâmicas.

Como observado em temperaturas em torno de 1000°C ainda não foram conseguidas melhores resistências, conforme justificado anteriormente e observado na figura 31, sendo necessária temperatura acima de 1000°C para a formação de ligações cerâmicas nas 4 composições testadas.

Novamente as duas composições que obtiveram melhores resultados foram a C e E, com resultados um pouco melhor em temperaturas maiores (1000°C). Como não houve formação de ligações cerâmicas perceptíveis nesses resultados de resistência, o efeito da resistência se deve às ligações de aderência hidráulica dos ligantes. As configurações gesso + cimento aluminoso e gesso proporcionaram uma melhor performance das composições E e C respectivamente.

Figura 28 RCTA após queima

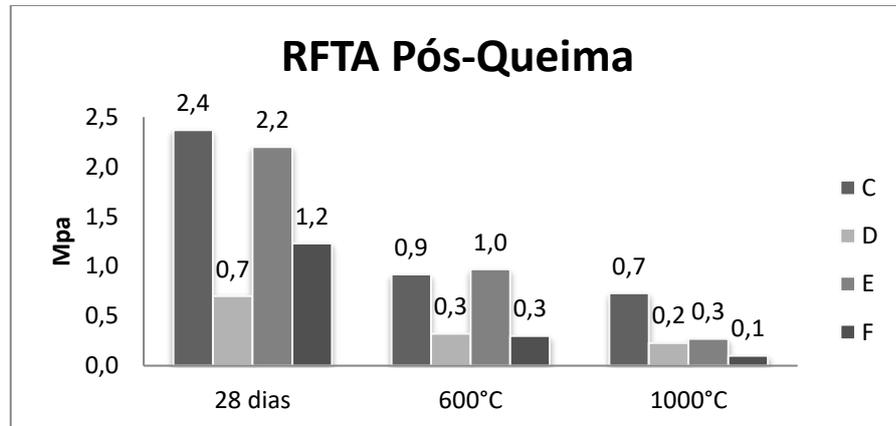


Fonte: Próprio autor.

Esse efeito é aplicado também à resistência a flexão após a queima. Observou-se na figura 31 que também houve uma diminuição da resistência com o aumento da temperatura. Porém mantendo uma resistência a flexão um pouco melhor das composições C e E.

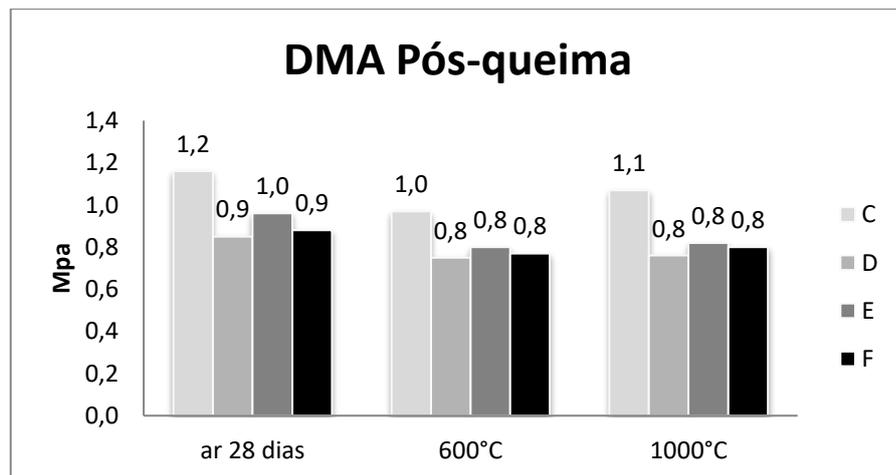
Embora a perda da resistência tenha ocorrido em todas as composições, já era esperado um desempenho baixo nos parâmetros de resistência mecânica das formulações criadas, devido à alta porosidade das composições e altas percentuais de água adicionados. Conceitualmente esses materiais não são projetados para grandes esforços mecânicos, principalmente devido à necessidade de uma baixa densidade e grande porosidade para evitar grande aumento do peso total nas estruturas metálicas da construção após a aplicação.

Figura 29- RFTA após queima



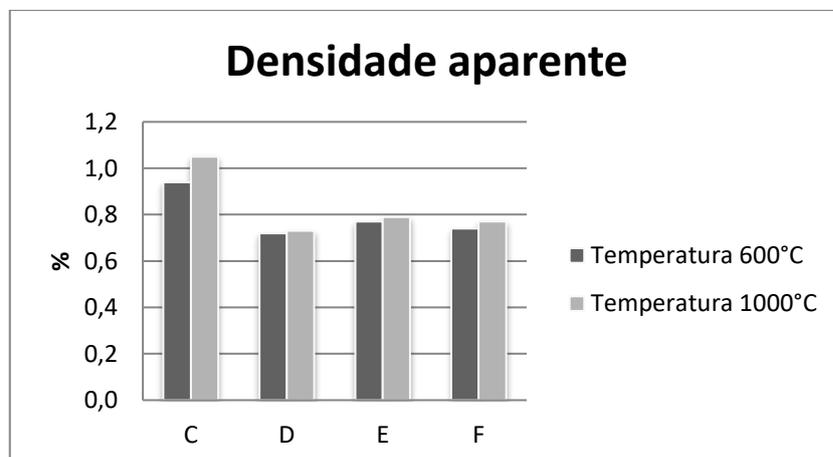
Fonte: próprio autor

Figura 30-DMA após queima



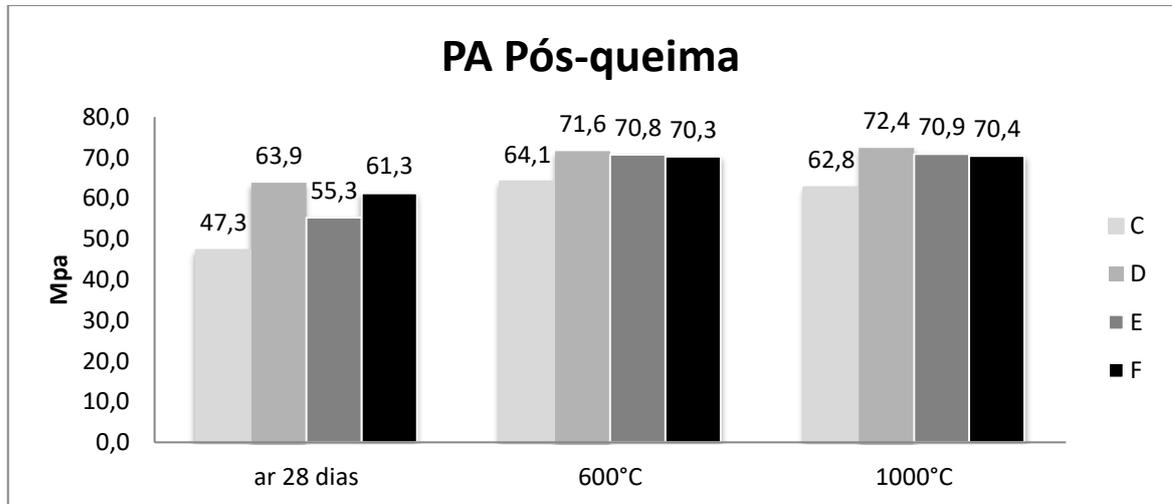
Fonte: próprio autor

Figura 31- Densidade após queima



Fonte: próprio autor

Figura 32- Porosidade após queima



Fonte: próprio autor

Nos parâmetros de densidade não houve, conforme figuras 30 e 31, grandes modificações nos resultados entre a estrutura queimada e sem queima. De modo geral a perda de massa em todas as composições conforme tabela de perda ao fogo ficou em torno de 11% a 15% em média, e conforme a figura 32, o VLD manteve uma variação, em todos casos, abaixo de 5%. O impacto da variação de volume possivelmente foi suprimido pela perda de água do material, equilibrando a razão m/V e justificando a proximidade dos resultados de densidade após queima.

Já a porosidade conforme a figura 32 houve considerável aumento dos poros em todas as composições, possivelmente devido à desidratação dos corpos de prova e do efeito da queima do jornal moído, que foram liberados com vapor de água e CO₂ durante a queima das peças. Esse aumento de porosidade, conforme mencionado anteriormente, relaciona diretamente ao abaixamento da condutividade térmica dos compósitos nas temperaturas avaliadas.

As composições sofreram contração de suas estruturas nas duas temperaturas avaliadas. Na figura 33 a composição C foi a que teve uma maior contração a 1000°C, sendo o comportamento das outras composições muito parecidas entre si, variando em torno de 1% a 2% a 600°C e entre 2% e 3% a 1000°C.

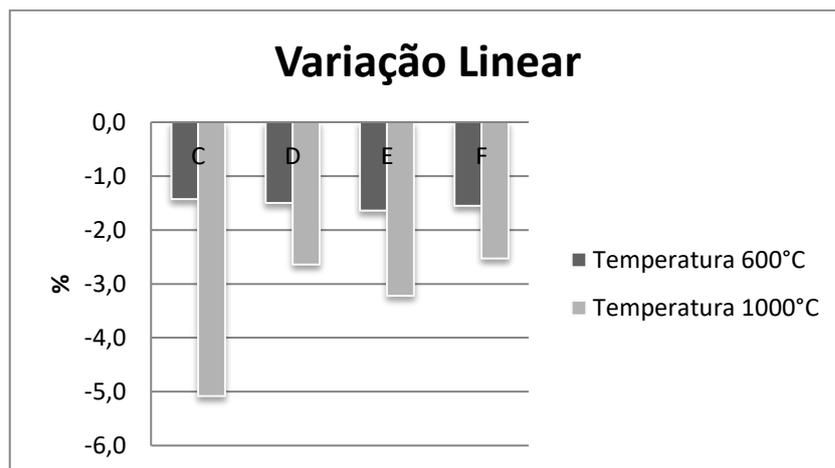
A variação de volume de compósitos cimentícios é esperada, Em temperatura

ambiente tem-se a perda de água por evaporação e entre 600°C e 800°C contração devido a variações na estrutura dos hidratos formados. Alguns fatores podem ter ocasionado essa contração dos corpos de prova testados:

- Percentual de água adicionado e umidade dos componentes adicionados;
- Quantidade de ligante;
- Composição química dos ligantes;

Confrontando as possíveis causas de contração, mencionados acima podemos sugerir que as maiores contrações foram devido à presença do gesso, composição C e E. Considerou-se que a composição (D com 88% H₂O) com maior quantidade de água não sofreu grande variação de volume em relação as demais com menor teor de água. As composições D e F apresentam os mesmos percentuais de ligante, porém menor teor de adição de gesso, variando o tipo de cimento. As composições C e E tiveram os maiores valores de adição de gesso tendo também as maiores retrações. Possivelmente a água disponível para evaporação (não ligada) de todas as composições tiveram teores parecidos, minimizando a percepção desse efeito.

Figura 33- Variação linear VLD



Fonte: Próprio autor

5.2.3 Comparação com os resultados Pyrocrete

Foram comparadas cinco propriedades das composições proposta (C, D, E F) na tentativa de correlacionar os valores encontrados com a descrição no catálogo técnico do produto: condutividade térmica, resistência a compressão e flexão, variação linear e densidade. Foram comparados os valores de 28 dias em todas as composições considerando que em 28 dias as propriedades dos compósitos praticamente estabilizaram. A tabela 27 apresenta os valores do catálogo técnico do produto comercial Pyrocrete e a conversão para as comparações devidas.

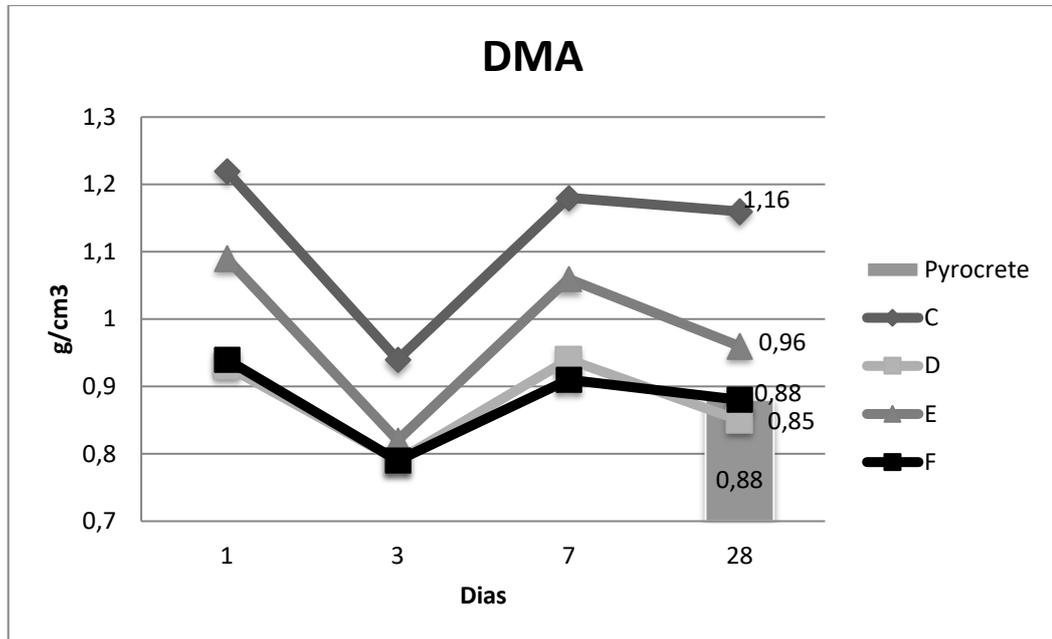
Tabela 27- Valores referência Pyrocrete

Valores Catálogo técnico Pyrocrete	Conversão para comparação
Densidade (média) ASTM E 605 (1) 55 lbs/ft ³ . = 880 kg/m ³	0,88 g/cm ³
Resistência a compressão ASTM E 761 817 psi = 57,44 kg/cm ²	5,38 Mpa
Curvatura Média (resistência) ASTM D 790 502 psi = 35,3 kg/cm ²	3,46 MPa
Condutividade fator "k" ASTM C 177 0,87 BTU in/ hr ft ² oF para 75 F	0,1052 w/(m.k)
Encolhimento - < 0,5%	0,50%

Fonte: Catálogo pyrocrete

A figura 34 apresenta as densidades dos compósitos curados ao ar com desenvolvimento de 24h a 28 dias. Esses resultados já foram comentados anteriormente onde demonstram que as composições não apresentaram consideráveis diferenças de densidade entre si e que estão próximos ao do Pyrocrete (0,88 g/cm³). As composições que mais se aproximaram dos valores de densidade do Pyrocrete foram a D e F, e a composição E intermediária entre F e C. A composição com maior valor de densidade foi a C.

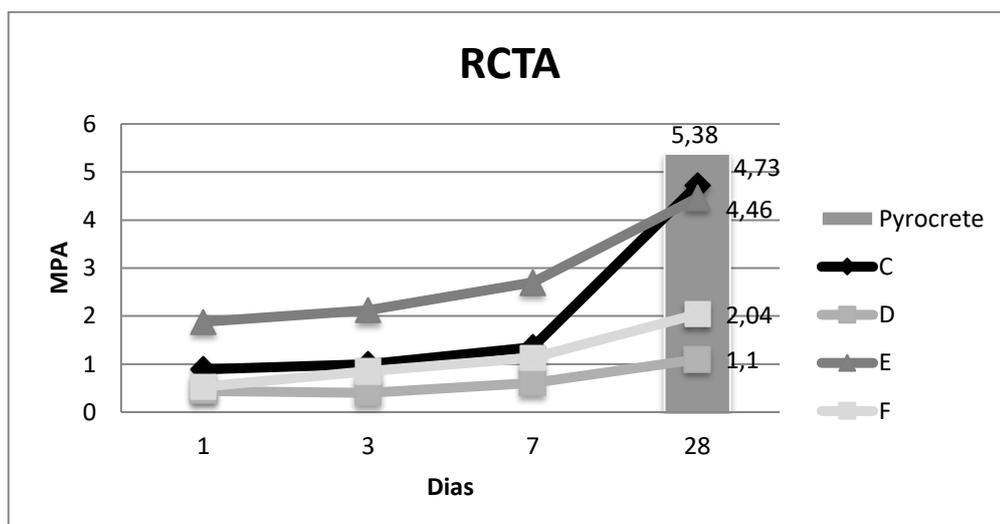
Figura 34- DMA composições x Pyrocrete



Fonte: Próprio autor

Em relação ao RCTA os valores encontrados na composição C e E foram próximos ao do Pyrocrete (5,38 MPa), sendo que as composições E e F apresentarem valores até 5 vezes menores do que o Pyrocrete. Os valores comparativos estão apresentados na figura 35.

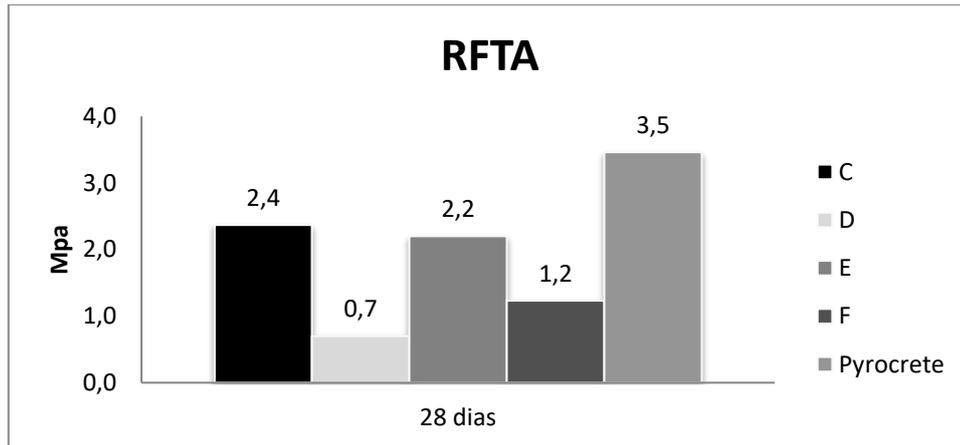
Figura 35- RCTA x Pyrocrete



Fonte: Próprio autor

Era esperado que os valores de RFTA também apresentassem as mesmas características do RCTA. Sendo que os valores foram melhores para a composição C e E e menores para a composição D e F. Na figura 36 foi comparado esses resultados entre as composições C,D, E e F e o Pyrocrete (3,5 MPa).

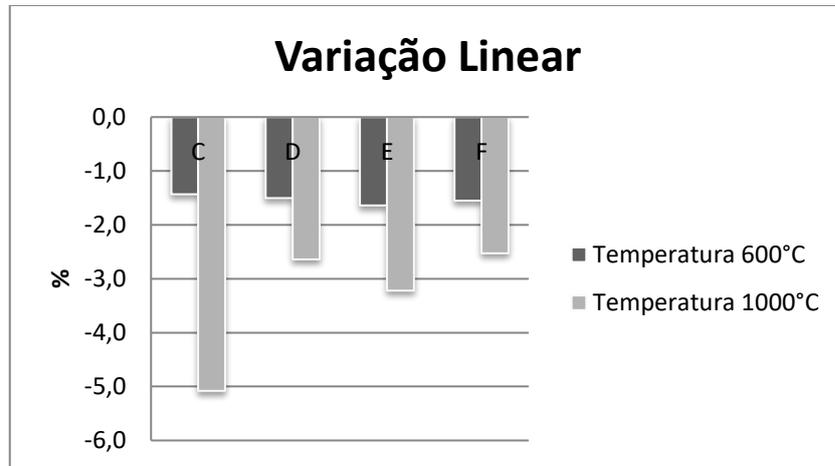
Figura 36- RFTA x Pyrocrete



Fonte: `Próprio autor

As comparações da variação linear dimensional (VLD) foram feitas entre as composições conforme a figura 37 abaixo, porém não possível comparar ao valor de referencia do Pyrocrete (<0,5%) devido a não saber se foram analisadas as medições durante o aquecimento ou após a queima e resfriamento total do corpo de prova e também a temperatura da realização do teste. Essa retração apresentada no Pyrocrete não é comum em compósitos cimentícios em temperaturas acima de 600°C Conforme Taylor (1964) relata variações entre de 1 a 5% de retração em compósitos cimentícios tratados em temperaturas entre 600°C e 1000°C, confirmando o comportamento apresentado pelas composições testadas neste estudo.

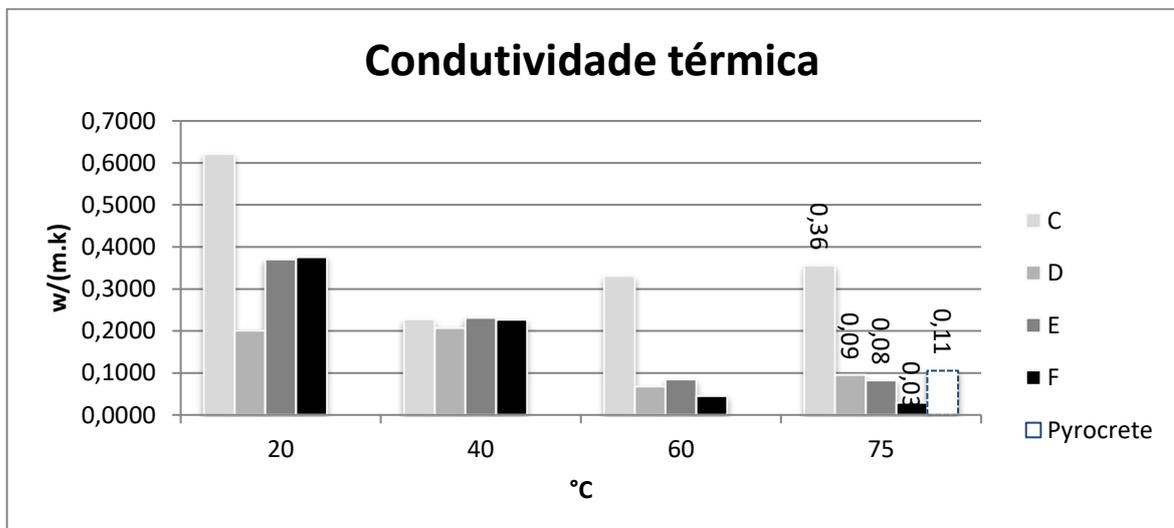
Figura 37- Variação linear x Pyrocrete



Fonte: Próprio autor

Anteriormente foram comentados alguns fatores que afetam a condutividade de um material, tais como a porosidade e percentual de água nos poros da estrutura. Os resultados apresentados na figura 38 demonstram que as composições D, E e F apresentaram valores menores que o produto Pyrocrete e que conforme apresentado anteriormente nos resultados de porosidade que essas composições são as que apresentaram as menores porosidades, reafirmando a relação porosidade e condutividade térmica.

Figura 38- Condutividade Térmica x Pyrocrete



Fonte: Próprio autor

6. CONCLUSÕES

Foram testadas 6 composições de argamassas com uso de reciclado refratário silico aluminoso com granulometria < 600um. As composições testadas foram definidas com a variação do percentual de reciclado, de gesso, cimento portland e cimento aluminoso. As propriedades físicas das composições foram medidas em diversos tempos de envelhecimento e temperaturas de tratamento térmico, isso possibilitou a avaliação do efeito do envelhecimento e do tratamento térmico nas propriedades das composições e comparar com o produto Pyrocrete em algumas propriedades.

Também foram avaliados aspectos relacionados a características físico-químicas do reciclado de refratário silico aluminoso, sendo a estabilidade térmica e a presença de baixos percentuais de MgO como ponto de atenção na seleção e uso de resíduos refratários após o uso.

As etapas de formulação e caracterização reológica dos compósitos em temperaturas intermediárias tiveram como principal objetivo garantir boas propriedades das argamassas e principalmente seu comportamento frente a variação de temperatura.

Adicionalmente, verificou-se o forte efeito do teor dos ligantes e agregados na resistência mecânica, indicando que uma das possibilidades de controle envolve a seleção do tipo e da quantidade correta de ligante em relação aos agregados.

Após comparação de resultados e composições químicas apenas duas formulações apresentaram melhores propriedades frente às variáveis impostas aos corpos de prova. As formulações C e E tiveram melhores resultados de resistência tanto a frio quanto a quente, embora apresentem maior densidade em relação às formulações D e F, a variação volumétrica e comumente observada em compósitos cimentícios não sendo ponto de preocupação nas composições testadas.

Uma importante propriedade avaliada foi a porosidade das composições, pois como comprovada, tem grande influência na condutividade térmica dos materiais. Todas as composições apresentaram porosidade maior que 45% que já é um bom indício da reduzida condutividade térmica destes compósitos.

A condutividade foi avaliada como parâmetro definitivo, mas considerando os outros resultados apresentados e discutidos neste trabalho. Apenas uma formulação (formulação C) apresentou resultados maiores de condutividade térmica em relação ao produto comparado, sendo já esperado esse efeito devido à porosidade e densidade apresentada pela mesma.

Comparando a resistência mecânica, variação volumétrica, densidade e porosidade das composições com a especificação do produto Pyrocrete pode-se definir que o melhor desempenho apresentando foi a formulação E, onde embora apresenta-se valores em alguns casos menor do que o referencial, foi a que no conjunto melhor se aproximou da performance prevista para os materiais de proteção passiva em caso de incêndio.

O efeito da adição de resíduos refratários silicos aluminos em argamassas de proteção passiva pode ser avaliado neste estudo indicando uma possibilidade viável do uso de resíduos como agregado destes produtos diminuindo ou até eliminando a destinação destes resíduos a aterros. O uso desses resíduos futuramente em outros materiais poderá ser uma opção sustentável de reciclagem.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos nesta dissertação, as principais possibilidades para a continuidade neste assunto são:

Estudo da aplicação por projeção da argamassa;

Avaliação da espessura para aplicação da argamassa e os efeitos na proteção da estrutura metálica.

Estudo das propriedades do material em testes de simulação de condições de incêndio.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: agregados: terminologia**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10004**: Resíduo sólido: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 6946**: Determinação granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e refratários não-conformados. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 6220**: Materiais refratários densos conformados Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimentos. NBR 14432. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

API - PUBLICATION AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE. **2218: Fireproofing practices in petroleum and petrochemical processing plants**. Washington, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – Estudo técnico - **ET 41**. São Paulo, 1995. rev.3

CIUDAD, Aleix et al. **Improvement of passive fire protection in a gypsum panel by adding inorganic fillers: Experiment and theory**. Applied thermal engineering, 2011.

CORPO DE BOMBEIRO DO ESTADO DE SÃO PAULO – Norma de procedimento técnico **NPT 008**: Resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo, 2012.

FERREIRA, G., et al.. **Environmental analysis for identifying challenges to recover used reinforced refractories in industrial furnaces**. Journal of Cleaner Production, 2014.

FREITAS, Claudia Maria de Melo. **Caracterização e desenvolvimento de microestruturas de matrizes de concretos refratários de baixo teor de cimento**. 1993 vol. 1. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas UFMG.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

LASZO, C. **Valor Sustentavel**, [s.l.], Ed Qualitymark, 2008.

LIMA, DANIELE et al. **Reciclagem de Refratários**: Solução Sustentável. Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 66, p. 370-375, 2010.

MORALES, Gilson et al. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011

PARENTE, Roberto Cruz. **Perfil analítico da vermiculita por Roberto Cruz Parente e Ulceno Luiz de Oliveira**. Brasília, Departamento Nacional da produção mineral, 1986.

PRISZKULNIK, Simão et al. **Concretos Refratários**. 1972. 129f. Trabalho acadêmico – Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

SÁ, R. G. et al. **Recycling of spent refractories from metallurgical processing: management and technological approach**. In: UNITECR 2007, Dresden. Anais... Dresden: Sep. 2007.

SCHACKOWET, Adilson et al. **Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent**. Construction and Building Materials, v.57, p.190–197, 2014

SILVA, G. F. B. L. Siderurgia e meio ambiente In: **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Ed. Mourão. M. B, 2007 p. 359-400, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

SONOGLIO, Rafael Diego, **Avaliação do potencial de reutilização de resíduos refratários em massas refratárias**. 2011. 32f. Trabalho acadêmico – Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul.

TAYLOR, H.F.W. **The chemistry of cements** .London: Academic Press, 1964.Vol.1.

MATIAS, C., JOLIFF, Y., FAVOTTO ,C.. **Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test**. Composites Part B: Engineering, p.37-57, Jun. 2014.

SANTOS, C. P. F., et al. **Characterization and uses of bentonite and vermiculite clays for adsorption of copper (II) in solution**. Ceramicas, v. 308, 2002.

PANNONI, Fabio Domingos. **Proteção de estruturas metálicas frente a fogo: fundamentos, legislação e materiais.** In: III SEMINÁRIO DO USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL - CDEMEX/NEXEM, 2003, Vitória, p.11,2003.

PETZOLD, A., ROHRS, W.L. **Refractory concrete for high temperatures.** Elsevier Publishing Company, 1970.

.