

ESTUDO DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO PRODUZIDO COM MATERIAS ALTERNATIVOS

Korina Sophia Brugnara(IC) e Alfonso Pappalardo Júnior (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie/CNPq

RESUMO: Um dos maiores problemas da engenharia civil desde que se começou a construir é a poluição do meio ambiente, seja ela pelo processo de produção dos materiais que a regem, como o cimento Portland, ou pela má reciclagem de resíduos. Entre os focos dessa pesquisa está à procura de um novo material mais sustentável que o cimento convencional e que possa futuramente substituí-lo. A base desse material que se procura é um alumínio-silicato com ativação alcalina recém redescoberto chamado Geopolímero. Este material tem como precursor metacaulim ou qualquer alumínio silicato, e como ativador uma mistura de água, hidróxido de cálcio e sílica ativa. Somente com essa composição o geopolímero evitaria mais de 80% de gás carbônico produzido na fabricação do cimento Portland convencional. Para aumentar esse potencial sustentável ainda mais, se decidiu substituir a sílica ativa, que compõe os traços mais convencionais, por sílica verde, que é adquirida através de moagem de vidros ou reciclagem de resíduos da indústria de refratários. Porém ser sustentável e possível substituto do cimento não é o suficiente para se basear as novas construções. Por esse motivo o outro objetivo da pesquisa é a definição dos limites que esse material pode atingir, comparando-o com o cimento convencional e com o geopolímero composto por sílica ativa.

Palavras-chaves: Sustentabilidade; Geopolímero; Sílica verde

ABSTRACT: One of the biggest issues of civil engineering, since we've begun to build, is the pollution of the environment, whether it be by the production of the materials that reign; for example: The Portland cement; or by poor waste recycling. One of the focuses of this research is the quest for a new and more sustainable material than the conventional concrete and the possibility to replace it eventually. The basis of this material, which is sought out, is the aluminum silicate with the newly rediscovered alkaline activation that is called geopolimer. The material has the metakaolin or the aluminum silicate as precursor, and it has the mixture of water, calcium hydroxide and silica fume as activator. Only along with these compositions, the geopolimer can prevent more than 80% of the carbon dioxide produced in the conventional manufacture of the Portland cement. Thinking to increase this sustainable potential even more, it was decided to replace the silica fume that makes up the traits more conventional by green silica that is obtained by grinding glass or recycling of refractories industry. However, being sustainable and the cement substitute is not enough to build new buildings. By this reason, the other objective of the research is to define the limits that this material can reach, comparing it with the conventional cement and the geopolimer composed of silica fume.

Keywords: Sustainability; Geopolymer; Green silica.

1.0 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil usa como base para a maioria de suas construções atuais o cimento Portland. A fabricação do cimento Portland requer a queima do clínquer (argila e calcário) a cerca de 1450 °C com um gasto de energia excessivo e a produção, segundo o professor da Universidade de São Paulo Vanderley John (BERNARDES, 2013), de 610 kg de gás carbônico para cada tonelada de cimento Portland. Em escala nacional, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2012), foram produzidos em 2011 cerca de 60 milhões de toneladas de cimento sendo que esse valor tem um acréscimo alto a cada ano, podendo atingir 36 milhões de toneladas de gás carbônico geradas em um ano. Tudo isso pode ser diminuído em proporção se for substituída ou reduzida a quantidade de uso do cimento Portland.

De 1972 até 1979 a companhia CORD (SA), fundada pelo Prof. Joseph Davidovits, pesquisou sobre uma possível inovação: os alumino-silicatos. Essas pesquisas resultaram em 1979 na criação do conceito Geopolímero, ligante composto por precursor alumino-silicato ativo por uma solução alcalina (DAVIDOVITS, 2005). Esse conceito geopolímero teria a capacidade de mudar desde de fatos históricos até a concepção dos materiais de construção civil usados atualmente. O geopolímero (que recebeu esse nome pois as ligações de seus elementos químicos se parecem com a de um polímero), passou a ser analisado então para possíveis construções futura, por ter uma composição simples e de baixo impacto ambiental, podendo reduzir em 80% a emissão de gás carbônico (EDITOR, 2014, Artigo postado pelo instituto Geopolymer Institute), por não necessitar de altas temperaturas para a preparação de seus componentes em contraste com a produção de cimento Portland como citado acima. Esta porcentagem equivale a aproximadamente 28.8 milhões de toneladas (escala nacional de produção) de gás carbônico.

Com todos os problemas ambientais que estão ocorrendo atualmente o cimento geopolímero é uma opção viável, mas mais cara que o cimento Portland. O preço de um saco do cimento geopolímero é por volta de R\$10,00/kg a R\$ 7,00/kg (preço fornecido pela empresa Wincret Designer Concrete Products Ltda), porém este preço é reflexo do pouco conhecimento e a falta de mercado existente no Brasil. Materiais como o metacaulim, acabam sendo importados ou fabricados pelas próprias empresas por causa da baixa qualidade do metacaulim produzido por empresas brasileiras, e também por não ter um mercado amplo as empresas que produzem o geopolímero são forçadas a aumentar o preço para assim poderem ter lucro com essa venda.

Em uma conversa informal com a Engenheira Eliana Furuya da empresa Wincret Designer Concrete Products Ltda (WDCP), que trabalha com geopolímero, se discutiu o fato

de que com a evolução do geopolímero no Brasil o preço do geopolímero poderia cair muito dando excelentes resultados para a engenharia civil e também para o meio ambiente.

Além de produzir um geopolímero, que já é muito benéfico para o meio ambiente, também se teve a ideia de substituir a sílica ativa (material que compõe parte do geopolímero). A sílica ativa é produzida através da produção de ferro silício ou silício metálico. Segundo a FEAM (2010), esse processo causa impactos ambientais negativos, como produção de gases e de materiais particulados.

A substituição da sílica ativa por outra fonte de sílica seria de extrema importância e um reforço na ideia de se produzir algo que seja o mais sustentável possível. Com isso no começo do trabalho se optou por duas fontes de sílica alternativas: o vidro e a casca de arroz, porém a casca de arroz foi retirada do cronograma, por dificuldades durante o processo de produção do geopolímero com pó de vidro.

O vidro é um material que demora mais de cinco mil anos para decompor no meio ambiente. Sua composição química tem como principal elemento a sílica. Sua reciclagem é muito fácil, pois não causa poluição, porém apenas dois formatos de vidros podem ser reciclados: cacos e grãos. O formato pó de vidro é um problema para empresas de refratários que não tem opções de reciclagem do mesmo. Por isso a alternativa de reciclagem deste na argamassa geopolimérica e no concreto geopolimérica seria um grande feito para o meio ambiente e também iria diminuir os custos para os beneficiadores que precisam atualmente pagar pelo descarte deste resíduo (ABRAVIDRO,2010). Resumindo com a produção de um geopolímero de sílica verde, diminuiria muito a produção de gases e resíduos, hoje despejados na atmosfera.

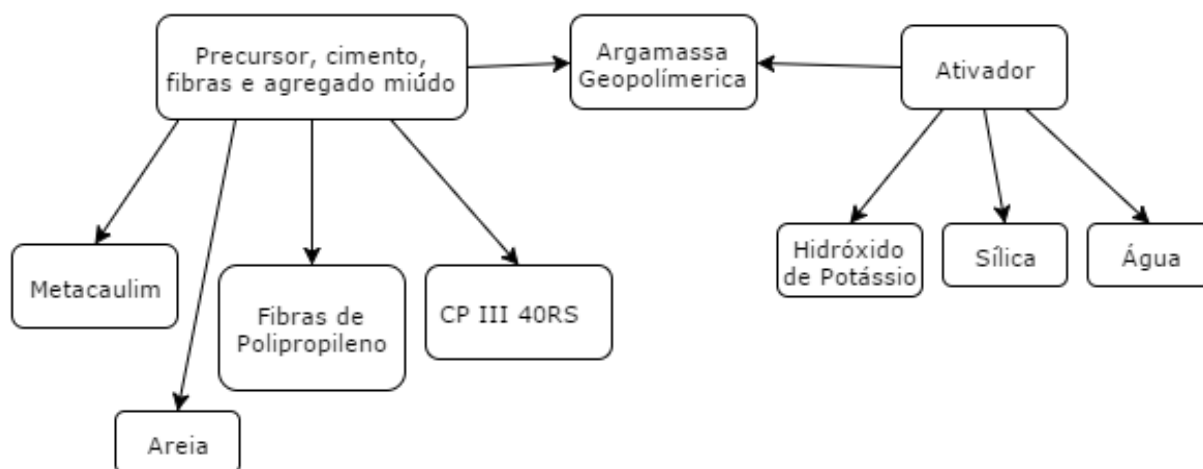
Todos os fatos citados são de extrema relevância para que se pesquise sobre o assunto geopolímero, tendo em vista a padronização das suas características, que ainda hoje não são totalmente definidas. Com essa padronização se criaria maior segurança no uso deste material, possibilitando até criações de normas próprias para o geopolímero, definições de limites de resistência, pega e trabalhabilidade. Seria de extrema importância, nessa padronização, verificar se realmente ele atenderia as expectativas colocadas sobre ele e se conseguiria ser utilizado em grande escala no mercado da engenharia civil.

O foco principal da iniciação foi investigação da resistência a compressão que o geopolímero de sílica verde conseguiria atingir e a comparação entre esta resistência com a resistência do geopolímero produzido pela WDCP e a resistência de compressão de uma argamassa de cimento Portland.

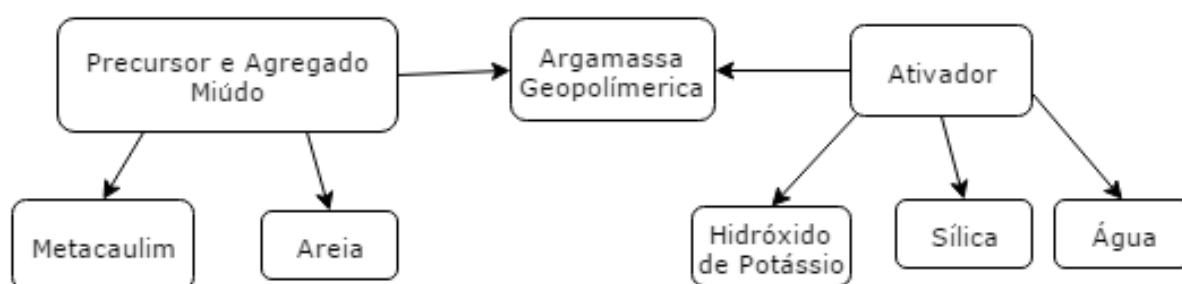
Esse objetivo foi abordado a partir dos ensaios de compressão seguindo a norma NBR 7215, (ABNT,1996).

2.0 REVISÃO TEÓRICA

Os primeiros corpos de prova de argamassa geopolimérica com sílica ativa se basearam nos traços fornecidos pela WDCP, seguindo o esquema apresentado a baixo.



Para produção da argamassa com sílica verde, baseou-se no artigo do professor Alfonso Pappalardo Jr. (2014), onde o professor moeu o pó de vidro para a produção do geopolímero. Para tentar aumentar a reatividade do pó de vidro, reduziu-se a granulometria com o intuito de aumentar a área de contato e, portanto, aumentar a velocidade da reação (FOGAÇA, 2016b). Depois de moer o pó de vidro, utilizando um traço formulado pela WDCP e pelo professor Alfonso Pappalardo, se moldou os primeiros corpos de prova com sílica verde (pó de vidro). O esquema a baixo representa o traço usado na argamassa geopolimérica com sílica verde:



Nota-se no traço da argamassa geopolimérica com a sílica verde, a exclusão do cimento e da fibra de polipropileno. Essa exclusão foi feita para se produzir um geopolímero puro e mais sustentável. Com a adição do cimento, mesmo que em pequena quantidade, a principal característica que é a produção de uma argamassa alternativa mais sustentável, se perderia.

As primeiras tentativas de produção do ativador falharam, pois, o pó de vidro não reagia completamente sedimentando-se no fundo do ativador. Com isso pesquisou-se alguma alternativa para melhorar a reação dos componentes químicos do ativador e a performance da sílica verde.

A primeira ideia para solucionar este problema foi pesquisar o método de produção da sílica ativa e seu produto final. Como citado anteriormente a sílica ativa é um produto do processo de fabricação do silício metálico ou do ferro silício. Segundo o TECNOSIL (2010), no processo de fabricação do silício metálico, o quartzo (matéria prima de silício metálico) passa por um processo de aquecimento em forno elétrico. O que se imaginou foi que talvez reproduzindo o aquecimento no pó de vidro ajudaria a eliminar as impurezas e melhorar a sua reatividade. Para se confirmar esse fato se perguntou informalmente a professora de química da Universidade Presbiteriana Mackenzie (Mackenzie), Dra. Maura Rossi a melhor maneira de tirar as impurezas da sílica verde, e nessa conversa a professora confirmou que elevando a temperatura, poderia sim ser um caminho para eliminar impurezas e melhorar o ativador.

Sabendo-se que a temperatura de fusão para reciclagem de um vidro é de 1000 °C a 1200 °C (BARROS, 2010), se aqueceu o vidro a 850 °C. Apesar de não chegar no ponto de fusão de reciclagem do vidro, o pó de vidro, por ter uma granulometria muito baixa acabou se fundindo, voltando a ser uma peça única. Para se chegar a um valor de aquecimento onde o pó de vidro não se fundisse, se conversou informalmente com laboratorista Flavio Domitilio (laboratório de vidros do Mackenzie) ele indicou que ao invés de aquecer a 850°C, o ideal seria aquecer a 300°C, pois com a granulometria tão pequena, segundo testes feitos anteriormente por ele, o pó de vidro se fundiria somente com temperaturas maiores que 400 °C. Com o mesmo intuito de aquecimento do pó de vidro, também se teve a ideia de aquecer o ativador em banho maria por 10 horas, assim o ativador além de eliminar possíveis impurezas nesse tempo também aumentaria a velocidade de reação (FOGAÇA, 2016a) entre a sílica verde o KOH e a água.

Após a produção dos primeiros ativadores, passou-se a produzir os primeiros corpos de prova. Para a moldagem, tempo de mistura mecânica e rompimento desses corpos de prova, se seguiu a norma NBR 7215 (ABNT,1996).

No processo de mistura mecânica os materiais citados pela norma foram trocados por materiais que fazem parte do geopolímero. Exemplo: A água descrita pela norma foi substituída pelo ativador (parte líquida do geopolímero) e o cimento foi substituído pelo metacaulim.

Para se preparar os moldes de cinco centímetros de diâmetro e dez centímetros de altura, seguiu-se todas as orientações da norma NBR 7215, 1996 (ABNT,1996) estancando e untando os moldes antes da argamassa ser misturada. Preencheu-se os moldes com quatro camadas de mesmo tamanho, sendo que a cada camada foram dados 30 golpes uniforme aplicados com o soquete padrão, e ao termino se colocou um pequeno vidro na face superior do corpo de prova. A desforma foi feita após 20 a 24 horas de cura em ambiente aberto.

Para o cálculo de resistência a compressão, se ensaiou no mínimo três corpos de prova. A base de cada corpo de prova era medida com um paquímetro, calculando-se com esse valor a área da seção transversal. A resistência a compressão obtida era sempre calculada através da carga máxima lida na máquina de ensaio sobre a área da seção transversal. Com os resultados se calculou a média aritmética e o desvio relativo máximo (DRM), que é dado pela fórmula $DRM = \frac{|\text{valor individual mais afastado da média} - \text{média aritmética}|}{\text{média aritmética}}$. Caso o DRM fosse maior que 6% o recomendado pela norma NBR 7215, (ABNT,1996) é que se refaça o ensaio ou caso se tenha mais de três corpos de prova, se exclua o valor mais distante da média aritmética e se recalcule a média aritmética e o DRM. Todos os procedimentos descritos no ensaio de resistência a compressão são baseados na norma NBR 7215 (ABNT,1996).

Mesmo moldando corpos de prova, o ativador não chegou a estar homogêneo como desejado. Por esse motivo continuou-se a pesquisa sobre as propriedades do pó de vidro. Os ensaios escolhidos para se descobrir algumas das características do pó de vidro, foram a análise termogravimétrica e a difração por raio x (DRX). Segundo a professora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ruth Campomanes Santana (2009), o ensaio termogravimétrico é a relação da perda de massa por temperatura, sendo que cada variação pode significar reações de desidratação, oxidação, combustão ou decomposição.

Esse ensaio foi escolhido para avaliar se a variação de temperatura altera a massa do pó de vidro, o que significaria que o pó de vidro sofre algumas das reações citadas acima por SANTANA (2009). Os resultados e comentários sobre o assunto constam nos capítulos de metodologia e resultados e discussão.

O outro ensaio escolhido foi o DRX, que foi definido pelo Professor Doutor Henrique Kahn (2016) da Universidade de São Paulo (USP) como um ensaio que corresponde a uma das principais técnicas de caracterização de matérias cristalinos. Segundo a tese de mestrado da aluna da USP Juliana Livi Antoniassi (2010), o DRX representa a interação entre o feixe incidente de raios X e os elétrons dos átomos do material, que mudam a trajetória do raio X mantendo o mesmo comprimento de onda e radiação incidente. Porém isso só acontece se os átomos estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina. Juliana Livi Antoniassi (2010) ainda faz outra observação interessante na qual ela cita que cada plano cristalino possui diferente densidade de átomos e elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas de raio x sejam diferentes, podendo-se assim detectar os componentes que estão em forma cristalina dentro do material. Esse ensaio foi selecionado para que pudessemos identificar os possíveis componentes químicos em estado cristalino no pó de

vidro. Os resultados e comentários sobre o assunto seguem no capítulo de metodologia e resultados e discussão.

3.0 METODOLOGIA

Em aulas da Universidade Presbiteriana Mackenzie, se produziu uma argamassa normal de cimento Portland-II-32-E, obtendo-se os seguintes resultados para o tempo de 28 dias:

Tabela 1: Ensaio a resistência a compressão, argamassa de cimento Portland

Corpos de prova	Resist. a compressão (MPa)
CP1	37,4
CP2	37,4
CP3	38,4
CP4	47,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Tendo como fonte a NBR 7215 (ABNT,1996), se calculou a média aritmética de 40,2 MPa. Com isso, usando a formula de desvio relativo máximo descrita na revisão teórica, se achou o DRM= 18,16%. Excluindo a amostra que ficou com resistência mais distante da média aritmética (conforme e pedido pela norma) e recalculando a média aritmética se encontrou o valor de 37,7 MPa e o DRM= 0,79%. Com o DRM menor que 6% essa amostra foi aceita.

Para os ensaios de argamassa geopolimérica usou-se o traço fornecido pela empresa WDCP, que foi representada em um esquema de sua composição na revisão teórica. Seus componentes e marcas mais detalhados seguem a baixo:

Precursor: Cimento CPMII 40 RS (produtora CSN), metacaulim (produtora Geopol), três tipos de Areia (números das peneiras 120, 40 ou 50 e 16) e Fibra Polipropileno 8mm.

Ativador: Sílica ativa (produtora Unaprosil), hidróxido de potássio (proveniente da empresa Pan-Americanas S.A. indústrias químicas), hidróxido de potássio adicional (proveniente da empresa Pan-Americanas S.A. indústrias químicas) e água destilada (H₂O).

No dia 15/07/2014 moldou-se seis corpos de prova (CP) com a argamassa da WDCP. O cálculo para a produção dessa argamassa consta na Tabela 2, com os fatores de conversão para precursor (FP) e fator de conversão para o ativador (FA) fornecidos pela empresa WDCP. Esses corpos de prova foram ensaiados no dia 22/07/14 (sete dias). Obteve-se então os seguintes resultados de resistência a compressão (Tabela 3), ensaiados conforme NBR 7215 (ABNT,1996).

Tabela 2: Cálculo dos CP's utilizando traço da WDCP

Volume CP	196,250 cm ³	Volume de 6 CPs	1177,500 (cm ³)
Peso específico (δ)	2,208 g/cm ³	Massa de precursor (MP)	V*FP=916,100 g
FP	0,778 g/cm ³	Massa do ativador	V*FA= 260,230 g
FA	0,221 g/cm ³		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

Tabela 3: Resistência a compressão dos corpos de provas ensaiados com sete dias.

Corpos de Prova	Resistencia a Compressão (MPa)
1	34,632
2	40,234
3	50,924
4	50,025
5	33,453
6	59,700

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

$$\text{Média aritmética} = \frac{59,700+50,025+50,924+40,234}{4} = 50,221 \text{ MPa}$$

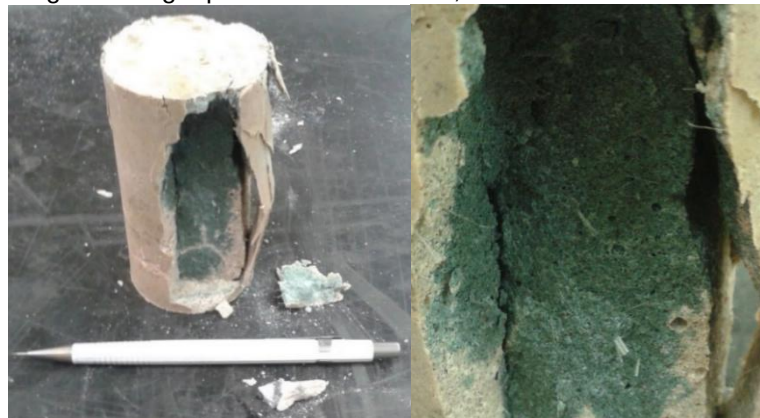
$$\text{Desvio relativo máximo} = \frac{40,234-50,221}{50,221} * 100 = 19,88\%$$

Com o desvio relativo máximo muito alto, tira-se o valor mais discrepante do ensaio 40,234 MPa e calcula-se de novo.

$$\text{Média aritmética 2} = \frac{59,700+50,025+50,924}{3} = 53,550 \text{ MPa}$$

$$\text{Desvio relativo máximo 2} = \frac{59,700-53,550}{53,550} * 100 = 11,485\%$$

Fotografia 1: CP de argamassa geopolimérica da WDCP, com foco na estrutura do CP.



Fonte: Fotografada pelo autor (2014)

Mesmo retirando o valor de 40,234 MPa, o desvio relativo máximo ficou maior que 6% (valor limite que consta na norma NBR 7215 (ABNT,1996) e, portanto, o ensaio teria que ser desconsiderado. Como não se tem uma norma para concreto nem argamassas geopolimérica, manteve-se o resultado como média do que se espera desse material ainda pouco conhecido e se moldaram mais três corpos de prova que foram ensaiados com 28 dias (Tabela 4).

Tabela 4: Resistência a compressão dos corpos de provas ensaiados com 28 dias.

Corpos de Prova	Resistencia a Compressão (MPa)
1	71,300
2	70,500
3	71,560

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

$$\text{Média aritmética 2} = \frac{71,30+70,50+71,56}{3} = 71,12 \text{ MPa}$$

Desvio relativo máximo 2 = $\frac{70,5-71,12}{71,12} * 100 = 0,87\% < 6\%$, aceito.

Após a primeira coleta de dados do geopolímero sem matérias alternativos, se começou a pesquisa da composição de um geopolímero trocando a sílica ativa por sílica verde. Para as primeiras tentativas de formulação com a sílica verde usou-se o traço de argamassa geopolimérica mostrado no esquema descrito na introdução. A Tabela 5 mostra esse traço com as porcentagens de cada material já definidas.

Tabela 5: Traço da argamassa geopolimérica e seus componentes.

Traço da argamassa geopolimerica	%	Traço do Ativador	%
Metacaulim (MK)	17,600	Sílica Ativa	27,430
Ativador	22,200	Hidróxido de Potássio (KOH)	17,740
Areia	60,200	KOH adicional	17,100
		Água	37,430

Fonte: Wincet Designer Concrete Products Ltda (2014)

Com o traço definido, para a produção do pó de vidro, se escolheu garrafas de vinho de mesma tonalidade para se manter composição química. Todas as garrafas foram limpas, os rótulos retirados e qualquer outro material que não fosse vidro descartado. As garrafas passaram por processo de moagem em moinho de bolas, durante aproximadamente 24 horas, atingindo uma granulometria abaixo da peneira 200.

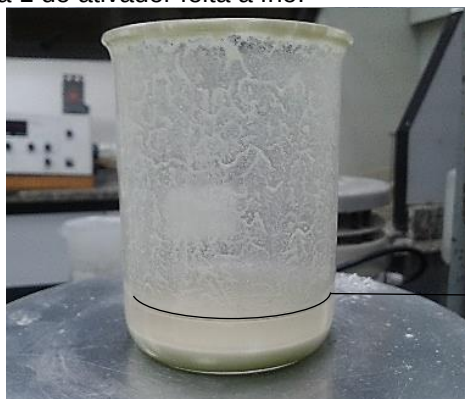
Para começar os ensaios se optou pela preparação do ativador. De início usou-se o traço da Tabela 5, adicionando sempre a água primeiro, o KOH, a sílica verde e por último o KOH adicional. Apesar de seguir a mesma sequência e usar os mesmos materiais da WDCP (substituindo somente a sílica ativa por verde), a homogeneidade do ativador não ficou como esperada, como é mostrado na Fotografia 2.

Seguindo essas conclusões descritas na revisão teórica sobre o processo de fabricação da sílica verde e outras informações colhidas em campo, para tentar melhorar a pureza da sílica verde aqueceu-se o ativador. Foram feitas três dosagens iguais e cada uma colocada a uma temperatura diferente com um agitador magnético que misturava o líquido constantemente por 10 horas. Uma das amostras (2) teve que ser descartada por variação brusca do aparelho, o que gerou a evaporação total desta amostra.

Amostra 1 - Misturada a frio (Fotografia 2) manteve uma cor mais amarronzada e sedimentou a sílica quase que completamente no fundo. Líquido fluido esverdeado mais aquoso.

Amostra 3- Quando estava quente (70 C°) o sedimento no fundo era menor, mas ao voltar a temperatura ambiente voltou a sedimentar igual a amostra 1. Cor mais esverdeada que a amostra 1 sendo que a consistência estava mais densa (provavelmente por perda de água no processo), Fotografia 3.

Fotografia 2: Amostra 1 do ativador feita a frio.

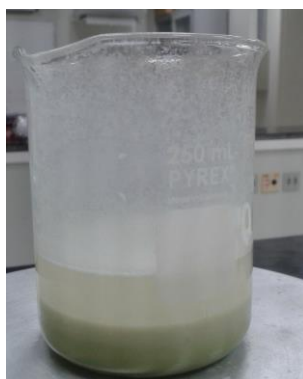


Linha da água

Fonte: Fotografada pelo autor (2015)

Com os resultados negativos apresentados, se tentou aquecer o pó de vidro diretamente em um forno cerâmico. Levando em consideração a temperatura de fusão citadas na revisão teórica, se aqueceu o pó de vidro a 850°C por 30 minutos. Como citado na revisão teórica, o pó de vidro por ter uma área de contato grande acabou se fundindo (Fotografia 4).

Fotografia 3: Amostra 3



Fonte: Fotografada pelo autor (2015)

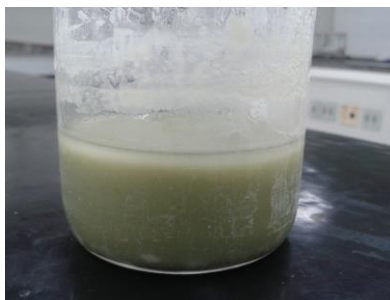
Fotografia 4: Pó de vidro após passar pelo forno a 850°C



Fonte: Fotografada pelo autor (2015)

O laboratorista Flavio Domitilio, em uma conversa informal no laboratório de vidros do Mackenzie, citada na revisão teórica, indicou que se aquecesse o pó de vidro a 300°C durante 6 horas. Desta vez o pó de vidro não se fundiu, continuando com seu aspecto granulométrico igual. Com esse pó de vidro que passou pelo aquecimento do forno e o mesmo traço da Tabela 5, se produziu amostra 4 (Fotografia 5). A amostra 4 permaneceu em banho maria por 10 horas a 90°C com um agitador mecânico, e foi calculada em quantidades com o propósito de moldagem de quatro corpos de prova.

Fotografia 5: Amostra 4



Fonte: Fotografada pelo autor (2015)

Dados: Volume de um CP= $196,25\text{cm}^3$, Peso específico= $\frac{2,4\text{g}}{\text{cm}^3}$ e Ativador = 22,2% massa total.

Para se achar o volume para quatro CP's, multiplicou-se o volume do molde ($196,25\text{cm}^3$) por quatro. Multiplicando esse volume pelo peso específico, se obteve a massa total do traço que ao multiplicar pela porcentagem do ativador (22,2%) se teve como resultado a massa do ativador. A massa do ativador e dividida em quatro partes, sendo cada parte dividida conforme as porcentagens indicadas na Tabela 6.

Tabela 6: Tabela de cálculo da amostra 4

Volume 4 CP's	785,000	cm^3
Massa total +10%	2072,400	g
Massa de ativador	460,073	g
Silica verde (27,73%)	127,578	g
KOH (17,74%)	81,617	g
KOH extra (17,10%)	78,672	g
H ₂ O (37,43%)	172,205	g

Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

Apesar da homogeneidade não ter ficado ótima, moldou-se quatro corpos de prova com a amostra 4 utilizando o traço da argamassa da Tabela 5. Sendo a porcentagem de metacaulim 17,6% e a de areia 60,2%, multiplicando cada porcentagem pela massa total temos 364,74g de metacaulim e 1247,58g de areia. As granulometrias das areias escolhidas, baseadas na normal da NBR 7217 (ABNT, 1987), são de 0,6, 0,3, 0,15 de abertura da malha. Para cada granulometria de areia, optou-se por adicionar respectivamente 30%, 40% e 30% da massa total de areia o que dá 374,28g de areia com 0,6 de abertura da malha, 499,03g de areia 0,3 de abertura da malha e 374,28 de areia com 0,15 de abertura da malha.

Com a argamassadeira pequena, se misturou a argamassa conforme a norma NBR 7215 (ABNT,1996) descrita na revisão teórica. Ao começar a misturar os componentes da argamassa, percebeu-se que a mistura estava com pouca água. Provavelmente por ter ficado em banho maria por 10 horas a 90°C , o ativador perdeu água deixando a mistura seca. Com esse erro de reposição de água, ao invés de se conseguir fazer quatro CP's, só se conseguiu fazer dois. Ou seja, a porcentagem de ativador adicionada foi dobrada passando de 22,2% para 44,4%. Somando essa porcentagem com o metacaulim (17,6%) e a areia

(60,2%) temos 122,2%. Reformulando o traço para que a soma seja 100%, temos o ativador com 36,33%, o metacaulim com 14,40% e a areia com 49,26%. Dentro do ativador a água que era 37,43% passou a ser 18,715% com a evaporação. Com isso somando a porcentagem de 44,83% de KOH e a porcentagem de 27,73% de sílica temos o total no ativador de 91,275%. Refazendo os cálculos como se 91,275% fosse 100% e redistribuindo os valores chegamos que a água foi alterada de 18,715% para 20,73% de água, o hidróxido de cálcio passou de 44,83 a 49,66% e a sílica verde passou de 27,73% para 30,717 %.

Com todas essas mudanças o tanto de KOH e sílica verde duplicou para a quantidade de água, areia e metacaulim. Se recalculou os valores conforme indicado na Tabela 7.

Com a reformulação moldou-se dois corpos de prova no dia 29/01/2016. Esses corpos de prova tiveram o resultado com quatorze dias de em média 25MPa.

Tabela 7: Traço reformulado

Traço Geral	Quantidade	Traço ativador	Quantidade (g)
Volume 2 CP's	392,500 cm ³	KOH (49,66%)	186,94
Massa +10%	1036,20 g	Sílica (30,72%)	115,65
Ativador (36,33%)	376,450 g	H ₂ O (20,73%)	78,04
Metacaulim (14,40%)	149,210 g		
Areia (49,26%)	510,430 g		

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Tabela 8: Tabelas de comparação entre traços, antes e depois da reformulação.

Formulação anterior	Quantidade (g)		Formulação pós erro	Quantidade (g)
Areia 0,6	374,280		Areia 0,6	153,130
Areia 0,3	499,030		Areia 0,3	204,170
Areia 0,15	374,280		Areia 0,15	153,130
Metacaulim	364,742		Metacaulim	149,210
Ativador	460,037		Ativador	376,450
Sílica verde	127,580		Sílica verde	115,650
KOH total	160,290		KOH total	186,940
H ₂ O	172,210		H ₂ O	78,040

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Por esse novo traço ter sido recalculado na hora, e apenas dois corpos de prova terem sido ensaiados, se decidiu ensaiar mais corpos de prova com o traço mostrado na Tabela 10, sendo feitos duas vezes o mesmo traço, com o ativador feito em banho maria e outro na hora a frio, sendo que os dois traços foram feitos com o pó de vidro sem passar pelo forno. A escolha de fazer o mesmo traço a quente (amostra 7) e a frio (amostra 6) foi para perceber se realmente o banho maria surtia efeito no ativador.

Além de ensaiar de novo o mesmo traço já testado, também se formulou um traço sem sílica verde (Tabela 9, amostra 5), para verificar se a resistência de 25MPa acontecia somente pela reação do metacaulim com o KOH. Tirando a sílica verde ficamos com as porcentagens de 49,66% de KOH e 20,73% de água. Redistribuindo da forma que a soma seja 100%, calcula-se os valores de 70,55% de KOH e 29,45% de água.

Tabela 9: Amostra 5, traço ativador sem sílica verde

Volume 4 CP's	785,0cm ³
Massa +10%	2072,40g
Ativador	752,83g
KOH	531,12g
H ₂ O	221,71g

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Tabela 10: Amostra 6 e 7, traço CP's quente e frio

Traço Geral	Quantidade	Traço ativador	Quantidade (g)
Volume 4 CP's	785,0 cm ³	KOH (49,66%)	373,90
Massa +10%	2072,4 g	Sílica (30,72%)	231,27
Ativador (36,33%)	752,9 g	H ₂ O (20,73%)	156,08
Metacaulim (14,40%)	298,43 g		
Areia (49,26%)	1020,86 g		

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

A amostra 7 do ativador feito a quente em banho maria por 10 horas a 90°C com ativador mecânico, teve a água reabastecida durante seu aquecimento, para que o problema do primeiro ensaio não se repetisse e a água não evaporasse. No próprio Becker se marcou a linha d'água, e conforme a linha do ativador se distanciava da linha marcada, recolocava-se água até se preencher o nível de início.

A amostra 7 ficou mais homogênea que as outras. Apesar de se dividir em camadas a parte de sílica verde não assentava, não ficava dura e não colava no fundo. Apenas com algumas mexidas o líquido voltava ao formato homogêneo sem divisões. Os nove corpos de prova moldados das amostras 5,6 e 7, foram ensaiados com 14 dias tendo, como resultados os valores mostrados nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 11: Amostra 5, traço com ativador composto de KOH e H₂O

Traço sem sílica verde, apenas H ₂ O e KOH no ativador	
Corpos de Prova	Resistencia a compressão (MPa)
CP1	0,797
CP2	0,912
CP3	0,660

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Tabela 12: Amostra 6, traço com ativador feito a frio

Traço onde o ativador foi feito a frio	
Corpos de Prova	Resistencia a compressão (MPa)
CP1	3,556
CP2	2,721
CP3	2,517

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Tabela 13: Amostra 7, traço onde o ativador passou por banho maria.

Traço onde o ativador passou por banho maria	
Corpos de Prova	Resistencia a compressão (MPa)
CP 1	25,727
CP2	25,408
CP3	22,646

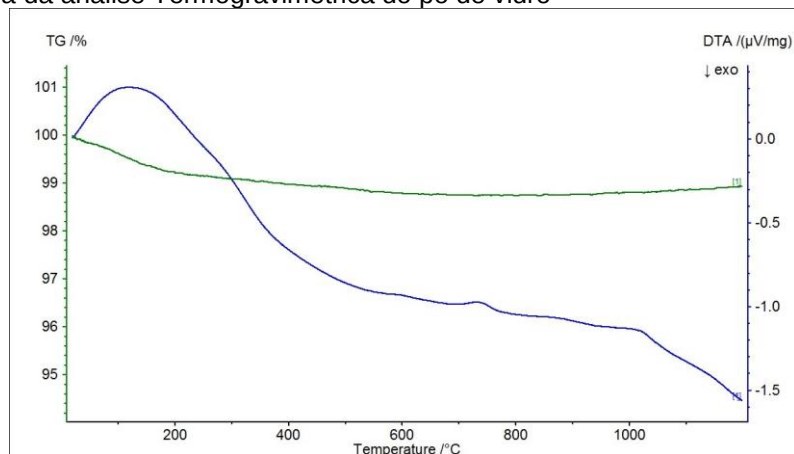
Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

$$\text{Média aritmética} = \frac{25,727 + 25,408 + 23,646}{3} = 24,927 \text{ MPa}$$

$$\text{Desvio relativo máximo} = \frac{24,927 - 23,646}{24,927} * 100 = 5,13 \%, \text{ aceito pela NBR 7215 (ABNT, 1996)}$$

Além dos ensaios a cima, também se realizou uma análise Termogravimétrica (TGA) do pó de vidro, que gerou a curva da Ilustração 1 (curva verde, a curva analisada, tem como eixos a temperatura (x) por massa (y)).

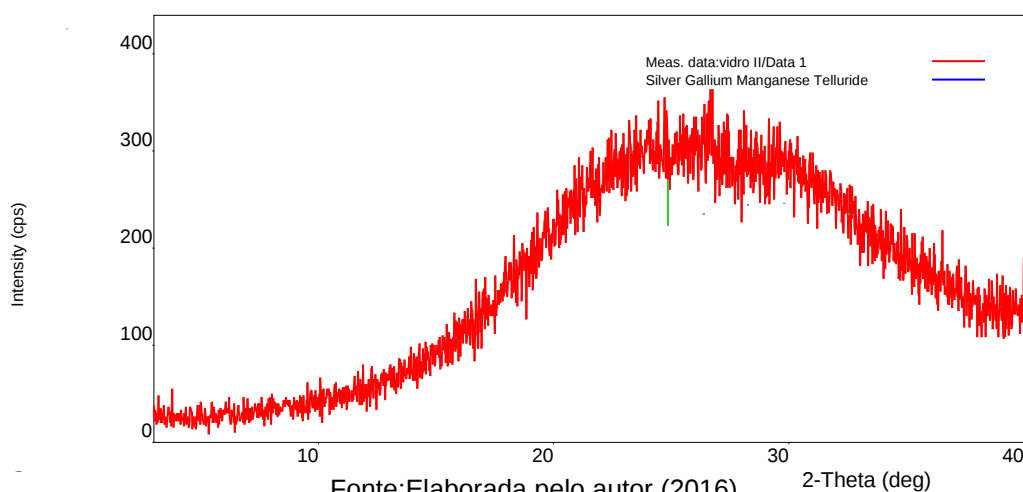
Ilustração 1: Curva da análise Termogravimétrica do pó de vidro



Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

Ao mesmo tempo que foi realizado o ensaio acima, também se realizou o ensaio de difração por raio x (DRX). Realizando este ensaio foi possível detectar o estado da sílica no pó de vidro e outros componentes químicos que poderiam estar possivelmente atrapalhando na reação com o KOH e da água. A Ilustração 2 nos mostra o resultado do ensaio de DRX feito no laboratório de materiais do Mackenzie.

Ilustração 2: Resultado do DRX



Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com todos os dados coletados pode-se comparar argamassa geopolimérica com sílica ativa, sílica verde (a quente e a frio), sem sílica e argamassa de cimento Portland. Pode-se

também analisar o efeito do aquecimento do pó de sílica e seus possíveis componentes químicos cristalinos.

Analisando o gráfico do ensaio termogravimétrico, é possível verificar que mesmo aquecendo o pó de vidro a 1200 graus não há perda de massa significativa, o que nos mostra que não há reações no pó de vidro quando este passa por um processo de aquecimento. A confirmação desse fato foi fornecida pela amostra 7 que mesmo sendo feita com pó de vidro sem ter passado pelo forno teve como resultado uma média 24,927 MPa igual a amostra 4 de 25 MPa.

Após concluir que aquecimento não era a solução, ainda se discutiu (em uma conversa informal) com o professor Antônio Hortêncio Munhoz Junior, coordenador do curso de engenharia de materiais do Mackenzie, o porquê do fracasso na tentativa de eliminar possíveis impurezas do pó de vidro. O professor Hortência disse que dependendo dos materiais componentes do vidro e como eles estão ligados entre si, o aquecimento realmente pode não fazer efeito nenhum. O aquecimento é focado em eliminar elementos que se liguem com o carbono formando um gás e evaporando, o que pode não ser a realidade dos elementos que o pó de vidro contem.

Para tirar essa dúvida se fez o DRX que resultou na Ilustração 2. Com eles podemos ver somente os materiais cristalinos como citado na revisão teórica, o que foi também uma tentativa de verificar se a sílica contida no pó de vidro estava ou não em estado amorfo. Com o DRX notou-se que a sílica está toda em estado amorfo, não tendo aparecido nenhum pico do material no gráfico da Ilustração 2

Ilustração 2. São poucos os elementos químicos cristalinos no pó de vidro e também são poucas as quantidades no total da composição do pó de vidro. Entre os materiais achados estão: prata, gálio, magnésio e tellúrio. Mesmo sabendo alguns elementos, sem saber a composição do todo dos elementos fica muito difícil de analisar e pensar em métodos para extrair as impurezas do pó de vidro.

Portanto com o ensaio termogravimétrico e o DRX se concluiu que aquecer o pó de vidro não é a solução mais eficaz para melhorar a reatividade do mesmo no ativador, e que são necessários mais ensaios focados em caracterizar e quantificar os elementos químicos que compõe o pó de vidro, pois assim se teria uma ideia de se estes materiais realmente influenciam na reação do ativador e se existe alguma maneira de eliminá-los. Mesmo sem saber a exata composição do pó de vidro e qual melhor maneira de melhorá-lo, a pesquisa seguiu com foco no aquecimento do ativador em banho maria. Olhando a Tabela 12 e a Tabela 13 da metodologia, pode-se notar claramente que o banho maria tem um efeito muito positivo

para a resistência, chegando a uma diferença de mais de 20 MPa entre as amostras passadas em banho maria e não passadas.

Como citado por FOGAÇA (2016a) e discutido na revisão teórica, realmente com o banho maria, a interação entre a água, KOH e a sílica verde acontece em um período menor e com mais eficiência. Esse período é provavelmente, o tempo em que o ativador está passando pelo processo de aquecimento. Por isso ao produzir o ativador a frio, o corpo de prova passa por um processo de cura muito lento, sendo perceptível pela água que o corpo de prova solta (Fotografia 6), a moleza da argamassa e a baixa resistência. Com esse processo mais lento o corpo de prova chega aos 14 dias sem estar com a cura completa o que acarreta na redução da resistência.

Fotografia 6: Comparação entre as amostras 6 e 7



Fonte: Fotografada pelo autor (2016)

Após o rompimento dos corpos de prova das duas amostras (Fotografia 7) pode-se perceber a diferença na consistência interna da argamassa. Enquanto a amostra 7 estava totalmente curada, a amostra 6 chegava a estar mole.

Como conclusão final temos a comparação da resistência de todos os corpos de prova (Tabela 14), o que nos mostra que o geopolímero com sílica ativa bate de longe todos os outros. Mesmo a argamassa produzida com cimento portland não chega a uma resistência tão grande quando a do geopolímero da WDCP. Em uma comparação entre a resistência da argamassa geopolimérica com sílica verde e da argamassa com cimento portland, esta não fica para trás. Com 14 dias de cura a argamassa de sílica verde a quente já chega no valor de 25 MPa, o que é considerado uma resistência boa para este tempo. Além do mais com essa resistência já seria possível construções de casas e pequenos edifícios.

Fotografia 7: Amostras 6 e 7 após o rompimento,



Fonte: Fotografada pelo autor (2016)

Logicamente é perceptível que a diferença entre argamassas de geopolímero com sílica ativa e verde ainda é muito grande. Por esse motivo é essencial a continuação da pesquisa, tendo a certeza que é possível atingir resultados mais expressivos. Mesmo assim para um primeiro teste esses resultados são de extrema importância e mostram que o geopolímero pode sim entrar para a área da engenharia civil, como um substituto das argamassas com cimento Portland e futuramente dos concretos de cimento Portland.

Os outros dois traços só foram feitos para a compreensão da melhor maneira de se produzir o geopolímero com sílica verde e a confirmação da reatividade da sílica verde no ativador. Sendo assim, não há necessidade de comparar suas resistências com as outras.

Tabela 14: comparação entre todas as resistências

Tipo de argamassa	Media da resistencia a compressão (MPa)	Tempo de cura
CPII-E-32	37,7	28
Geopolimero WDCP	71,12	28
Geopol. sem sílica	0,77	14
Geopol. ativador frio	2,93	14
Geopol. ativador quente	24,93	14

Fonte: Elaborada pelo autor (2016)

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

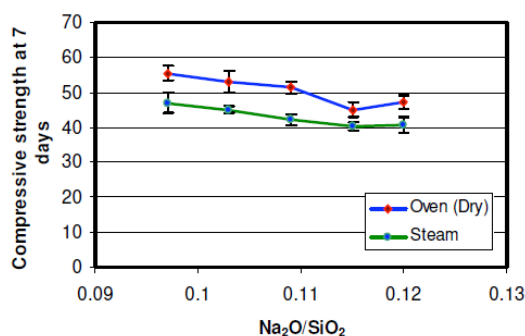
Concluindo o trabalho de mais de um ano, pode observar as possíveis falhas e sucesso, ambos citados nos capítulos anteriores. É de extrema importância a análise dos insucessos e como podemos redirecionar a pesquisa de forma que isso não ocorra novamente. É importante ressaltar que os próximos passos nesta pesquisa necessitam de uma atenção maior na parte química do problema. Tenho como primeiro passo a se seguir a estratificação de todos os componentes químicos presentes no pó de vidro. Com essa resposta pode-se estimar melhor a relação sílica, KOH presente na argamassa (chamado módulo de sílica) e também encontrar maneiras de melhorar a reatividade desse pó de vidro.

Um ensaio muito importante a se fazer seria o ensaio de fluorescência de raio X, que é definido segundo Edgar Adrian de Oliveira (2008) como uma técnica não destrutiva que identifica os elementos da amostra e estabelece a proporção de concentração de cada elemento na amostra, o que é exatamente a incógnita da pesquisa. Este ensaio foi

apresentado pelo professor Alfonso Pappalardo Jr (2014), e seus resultados são mostrados na Tabela 15. Pelo pó de vidro ter sido talvez de outra coloração, e o ensaio feito na Europa, seria interessante reproduzi-lo no Brasil com garrafas selecionadas de uma coloração só.

Também importante e já citado a cima é o modulo de sílica. Segundo RANGAN (2005), o modulo de sílica dos óxidos $\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}\right)$ de um geopolímero devem estar entre 3,57 e 5,00. No trabalho, Rangan ainda complementa essa afirmação com um gráfico de resistência a sete dias, variando conforme o modulo de sílica dos óxidos (Ilustração 3). Estes fatos nos mostram que é importante uma pesquisa mais profunda sobre a relação entre esses dois elementos, além do mais a amostra 7, que teve melhor resultado entre todas, teve após 28 dias afloração do excesso do hidróxido de cálcio. Com essa afloração pode-se perceber que a relação entre sílica, KOH e água não estava excelente, o que pode ter comprometido nos resultados de resistência. Talvez com o melhor estudo do modulo de sílica e componentes químicos do pó de vidro, se chegue em um traço mais próximo a máxima resistência que essa argamassa pode nos dar.

Ilustração 3: Gráfico comparação entre a resistência a compressão e a alternância da relação entre os óxidos



Fonte: RANGAN, 2005

Tabela 15: Comparação da sílica verde com a sílica cinza (ativa)

ANÁLISE QUÍMICA XRF SÍLICA VERDE (ECOSÍLICA)		ANÁLISE QUÍMICA SÍLICA CINZA (ELKEM)	
ÓXIDOS	%	ÓXIDOS	%
SiO ₂	72,2	SiO ₂	98
Al ₂ O ₃	2,84	Al ₂ O ₃	0,2
Fe ₂ O ₃	0,38	Fe ₂ O ₃	0,1
CaO	10,4	CaO	0,3
MgO	0,82	MgO	0,1
TiO ₂	0,05	SO ₃	0,1
Na ₂ O	14,5	Na ₂ O	0,1
K ₂ O	0,7	K ₂ O	0,2
P ₂ O ₅	0,02	P ₂ O ₅	0,03

Fonte: PAPPALARDO JR, 2014

REFERÊNCIAS

ABRAVIDRO, **Revista online**: O Vidroplano. Edição 447, Março, 2010.

ANTONIASSI, Juliana Livi. **A difração de raio x com método Rietveld aplicada a bauxita de porto de trombetas, PA**. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7217**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro 1987.

BARROS, Carolina. **Apostila de vidro**: materiais de construções e edificações, 2010. Disponível em: <<https://edificacoes.files.wordpress.com/2011/04/apo-vidros-completa-publicac3a7c3a3o.pdf>>. Acesso em: 27/08/2016

BERNARDES, Júlio **Nova técnica diminui emissão de CO2 na produção de cimento**, 2013. Editorial eletrônico da Agência USP de Notícias. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=134582>>. Acesso em 26/08/2014.

DAVIDOVITS, Joseph. **Extended Biography**,2005. Disponível em: <<https://www.davidovits.info/extended-biography/>>. Acesso em: 29/08/2016.

EDITOR. **Geopolymer Cement for mitigation of Global Warming**,2014. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/applications/global-warming>>. Acesso em: 26/08/2014.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Fatores que alteram a velocidade das reações**, 2016. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/fatores-que-alteram-velocidade-das-reacoes.htm>>. Acesso em: 25/08/2016 (a)

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Superfície de Contato e Velocidade das Reações**, 2016. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/superficie-contato-velocidade-das-reacoes.htm>>. Acesso em: 27/08/2016. (b)

FEAM-FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Relatório Técnico**: Levantamento da Situação ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade. Belo Horizonte, 2010.

KAHN, Henrique. **Difração por raio x**. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf>. Acesso em: 24/08/2016.

OLIVEIRA. Edgar A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Tese (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

PAPPALARDO JR., Alfonso; JALALI, Said; CAMÕES, Aires. **Efeitos da incorporação da ecosílica no desempenho de argamassas produzidas por activação alcalina de metacaulinos**. Portugal, 2014.

RANGAN, B. V.; HARDJITO D. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report GC 1- Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth Australia ,2005.

SANTANA, Ruth Campomanes. **Material de apoio a disciplina de analise instrumental aplicada a polímeros**. Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise_instrumental/aula2b.html>. Acesso em: 24/08/2016

SNIC -SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**, 2012. Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em: 30/03/2014.

TECNOSIL, Empresa de sílica ativa. **Catalogo de sílica ativa**. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/download/catalogo-silica-ativa.pdf>>. Acesso em: 19/08/2016.

Contatos: brugnerak@gmail.com e alfonso.pappalardo@mackenzie.br