



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CINZA VOLANTE NA REOLOGIA DE ARGAMASSA  
DE ASSENTAMENTO. FABRICADO COM RECICLAGEM DE RESÍDUOS**

BELÉM  
2014

**DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CINZA VOLANTE NA REOLOGIA DE ARGAMASSA  
DE ASSENTAMENTO. FABRICADO COM RECICLAGEM DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Linha de Pesquisa: Engenharia de Processos Inorgânicos

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe

**BELÉM**

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

**Biblioteca do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

---

Cardoso, Dilson Nazareno Pereira, 1978 -

Influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento. Fabricado com reciclagem de resíduos/ Dilson Cardoso.  
– 2014

Orientador: José Antonio da Silva Souza;

Coorientadora: Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014

1. Reologia 2 . Argamassa 3. Viscosidade 4. Cinza volante I.  
Título

CDD 22.ed. 531.1134

---

**DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO**

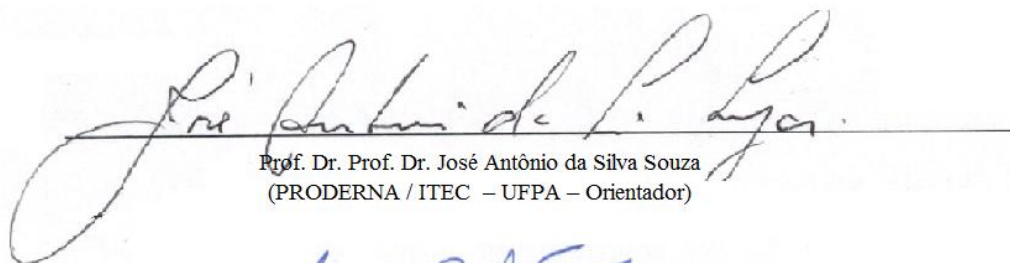
**INFLUÊNCIA DO TEOR DE CINZA VOLANTE NA REOLOGIA DE ARGAMASSA  
DE ASSENTAMENTO. FABRICADO COM RECICLAGEM DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

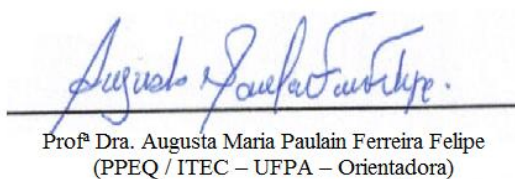
Linha de Pesquisa: Engenharia de Processos Inorgânicos

DATA DA AVALIAÇÃO: 05/02/2014

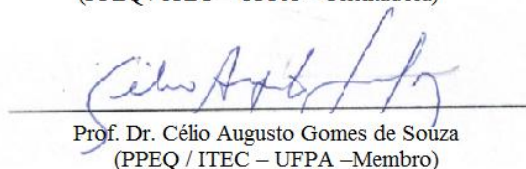
CONCEITO: APROVADO



Prof. Dr. Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza  
(PRODERNA / ITEC – UFPA – Orientador)



Prof.ª Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe  
(PPEQ / ITEC – UFPA – Orientadora)



Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza  
(PPEQ / ITEC – UFPA – Membro)



Prof. Dr. Reimar de Oliveira Lourenço  
(DETQI-CCET-UFMA – Membro Externo)

*“Embora muito se perca, muito permanece; e embora não sejamos mais fortes como em tempos passados movendo céus e terras; o que somos, somos, uma só têmpera de corações heroicos, debilitados pelo tempo e o destino, mas fortes em ímpeto para lutar, buscar, encontrar, e não hesitar. Pois a nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda.”*

**-Alfred Lord Tennyson - adaptado de Ulisses e Confúcio –**

*“Feliz é o Homem que acha sabedoria, e o Homem que adquire entendimento”.*

**-Proverbios3:13-**

*“saber não é o bastante, é preciso aplicar. Querer não é o bastante é preciso fazer”.*

**-Bruce Lee-**

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Dilson Ferreira Cardoso e  
Nayza Pereira Cardoso e a minha querida e  
amada esposa Isabela Cardoso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao **ALTÍSSIMO SENHOR JESUS CRISTO**, criador dos céus e da terra por me dar forças para lutar e nunca desistir dos meus propósitos e objetivos.

Aos meus orientadores Prof<sup>o</sup>. Dr. **José Antônio** e a Prof<sup>a</sup> Dra **Augusta Maria** pelos incentivos, paciência, dedicação, confiança, colaboração e amizade que foram fundamentais à realização deste trabalho.

Aos meus companheiros do laboratório de reologia **Silvane Gonçalves, Keylla Castro, Isabela Cristina, André Mileo, Otacilio Dias, Denise de Mello, Jailson Silva, Edgar de Souza e Ronaldo Marques**, aos meus colegas de trabalho, **Aluizio Lins, Wilson de Nazaré e Matheus Braga** que, além de suas contribuições, transformaram meu ambiente de trabalho em um local agradabilíssimo.

Ao **Jiu-Jitsu brasileiro**, arte marcial em que na sua prática sempre me ajudou a manter o foco em meus objetivos dando-me calma e paciência em momentos difíceis.

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

## RESUMO

As argamassas podem ser consideradas como um conjunto de partículas sólidas em suspensão (agregado miúdo), aglomerantes e água (pasta de cimento). Sendo assim, seu comportamento reológico durante a cura pode ser influenciado por fatores como a granulometria, composição e teor de água incorporado. Este trabalho estudou as características reológicas de seis composições de argamassas, em função do teor de cinza volante, como material de atividade pozolânica, em substituição parcial do cimento. A argamassa estudada utilizou como base agregado o resíduo da construção civil (RCC), devidamente caracterizado por difratometria e fluorescência de raios-X. Formularam-se composições de argamassas para os ensaios reológicos com adição de resíduo de construção civil (RCC) nas proporções de 95, 90, 85, 80, 75 e 70%; cinzas volantes (CV) 0, 5, 10, 15, 20 e 25% e 5% de Cimento Portland Comum (CP II- E 32), sendo que em cada amostra foi incorporado 35% de água. Utilizou-se o viscosímetro modelo VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV<sub>1</sub> – Haake a temperatura de 28°C. Para avaliar o tempo de cura do material programou-se uma taxa de cisalhamento constante 53,4 s<sup>-1</sup> em 1h e 45min, sendo avaliado o torque em intervalos de 15min. Para a elaboração das curvas de fluxo e curvas de histerese, utilizou-se a taxa de cisalhamento entre 0 e 600 s<sup>-1</sup> no intervalo de tempo de 120s. Os resultados mostraram que a incorporação de cinza volante foi o principal fator para aumento do torque no tempo de cura das argamassas e mudança do comportamento de reópetico para tixotrópico, nos traços analisados. Os dados experimentais das formulações propostas ajustaram-se ao modelo reológico de Herschel-Bulkley.

Palavras chave: Reologia, Argamassa, Viscosidade, Cinza volante.



## ABSTRACT

The mortars may be considered as a set of solid suspended particles ( aggregate ) , water and binders ( cement slurry ) . Thus, rheological behavior during cure can be influenced by factors such as particle size , composition and content of corporate water. This study investigated the rheological properties of six mortars , depending on the content of fly ash as a pozzolanic activity material, partial replacement of cement. This type of cement used as an aggregate base construction of the residue ( RCC ) which was characterized by diffraction and fluorescence X- rays. Were formulated for the mortars with addition of rheological tests residue construction (RCC) in proportions of 95 , 90, 85 , 80, 75 and 70% fly ash (CV ) 0, 5, 10, 15, 20 and 25 % to 5 % of ordinary Portland Cement (PC - II and 32) , and in each sample was incorporated 35 % water. We used the model VT 550 viscometer with sensor type coaxial cylinders SV1 - Haake temperature of 28 ° C. To evaluate the curing time of the material has scheduled a constant shear rate  $53.4 \text{ s}^{-1}$  for 1h and 45 min , with rated torque at intervals of 15min . For the development of flow curves and hysteresis curves , we used the shear rate between 0 and  $600 \text{ s}^{-1}$  in the time interval of 120 s . The results showed that the incorporation of fly ash is the main factor for increased torque on the curing time of mortar and behavior change reópetico for thixotropic , the traits analyzed . The experimental data of the proposed formulations are adjusted to the rheological model of Herschel - Bulkley .

Keywords: Rheology, Mortars, Viscosity, Fly ash

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mecanismo de formação das cinzas volantes durante a combustão do carvão mineral. Fonte: KNUDSEN, 2001.....	27
Figura 2: Partículas esféricas de Cinza Volante (CV).....	28
Figura 3: Partículas pleosferas contendo partículas .....	29
Figura 4: Efeito filer das cinzas volantes.....	32
Figura 5: Componentes do tensor tensão para um sistema de coordenadas cartesianas.	37
Figura 6: Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação;(B) Deformação por cisalhamento; (C) deformação por alongação .....	38
Figura 7: Deformação de um fluido. ....	40
Figura 8: Reograma dos diversos tipos de fluidos (1)- fluido newtoniano, (2)- fluido ou plastico de Bingham, (3)- fluido Pseudo-plastico e (4)- fluido dilatante .....	43
Figura 9: Curva de escoamento para um fluido de Bingham .....	48
Figura 10: Rejeito da Construção Civil (RCC). ....	57
Figura 11: (a) britador de mandíbulas; (b) moinho de disco e (c) moinho de bolas (USIMAT – LEQ/UFPA).....	58
Figura 12: Peneiras granulométricas (USIMAT – LEQ/UFPA). ....	58
Figura 13: Cinza Volante (CV). ....	60
Figura 14: Misturador mecânico de movimento planetário, marca SOLDTEST com capacidade de 130 Litros. ....	62
Figura 15: Viscosímetro rotacional modelo Haake VT 550.....	63
Figura 16: Conjunto cilindro coaxial copo SV e Spindle SV1. ....	63
Figura 17: Difração de raios –X do resíduo de construção civil. ....	65
Figura 18: Análise granulométrica Rejeito de construção civil (RCC).....	67
Figura 19: Análise granulométrica da cinza volante .....	68
Figura 20: Modelo newtoniano para fluido de calibração OP 400.....	68
Figura 21: Análises reológicas (torque versus tempo) para cada traço. ....	69
Figura 22: Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para o Traço 1 com 0% de CV.....	70
Figura 23: Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para Traço 6 com 25% de CV. ....	71
Figura 24: Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para Traço 6 com 25% de CV. ....	72

Figura 25: Histerese reológica para os traços 1,5 e 6. ....	73
Figura 26: Histerese reológica para os traços 1 e 2. ....	74
Figura 27: Histerese reológica para os traços 2 e 3. ....	74
Figura 28: Histerese reológica para os traços 3 e 4. ....	75
Figura 29: Histerese reológica para os traços 4 e 5. ....	76
Figura 30: Histerese reológica para os traços 5 e 6. ....	77
Figura 31: Perfil das curvas de fluxo para os Traço 1 a 6 para os modelos reológicos propostos.....	79
Fluxograma 1: Classificação do comportamento dos fluidos. Fonte: MACOSKO, 1994. ....	43
Fluxograma 2: Fluxograma Experimental.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixa dos principais Óxidos, presentes nas cinzas volantes.....	31
Tabela 2: Equações que relacionam a tensão e a taxa de .....	49
Tabela 3: Proporção dos materiais usados nos traços. ....	61
Tabela 4: Programação para a elaboração das curvas Torque vs Tempo.....	64
Tabela 5: Fluorescência de raios-X. ....	65
Tabela 6: Composição mineral do RCC.....	66
Tabela 7: Análise Granulométrica do Rejeito da Construção Civil(RCC).....	66
Tabela 8: Análise Granulométrica da Cinza Volante(CV).....	67
Tabela 9: Modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley para os traços 1 a 6 das argamassas. ....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM - American Society for Testing and Materials.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

CV- Cinza Volante

RCC-Rejeito da Construção Civil

Norsk Hydro SA- Norwegian aluminium and renewable energy company

K - Índice de consistência ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

n - Índice de comportamento do fluido (adimensional)

$\eta_p$ - Viscosidade plástica do fluido

$\gamma$  -Taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )

$\tau_0$ -Tensão limite de escoamento (Pa)

$\tau$ -Tensão de cisalhamento (Pa)

Tyler – Escala granulométrica

$R^2$ - Fator de correção

#- Mesh

$D_{50}$ - Diâmetro médio da partícula

CR- Controlled Ramp

a/ag – Relação água aglomerante

Laboratório de caracterização mineral (LCM)

(C-S-H) - Silicato de Cálcio Hidratado

UFPA- Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1 Gerais</b> .....	18
<b>2.2 Específicos</b> .....	18
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>3.1 Argamassa</b> .....	19
<b>3.2 PropriedadeS das argamassas</b> .....	20
3.2.1 Elasticidade .....	20
3.2.2 Retenção a água.....	20
3.2.3 Plasticidade.....	21
3.2.4 Consistência .....	21
3.2.5 Adesão Inicial.....	22
3.2.6 Trabalhabilidade.....	22
<b>3.3 Cimento</b> .....	23
<b>3.4 Cinza Volante</b> .....	26
<b>3.5 Utilização das cinzas volantes em concretos e argamassas</b> .....	31
<b>3.6 Agregados</b> .....	33
<b>3.7 Reologia</b> .....	34
3.7.1 Tensão e Deformação.....	36
3.7.2 Deformação .....	38
<b>3.8 Classificações reológica dos fluidos</b> .....	42
3.8.1 Fluidos Não-Newtonianos Dependentes do Tempo.....	45
3.8.2 Fluidos Não-Newtonianos Independentes do Tempo .....	45
3.8.3 Fluidos Pseudoplásticos .....	45
<b>3.9 Reologia das argamassas</b> .....	46
<b>3.10. Influencia de parâmetros nas propriedades reológicas</b> .....	50
3.10.1 Morfologia das partículas.....	50
3.10.2 Influência da adição de agregados na reologia das Argamassas.....	52
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	55
<b>4.1 Materiais</b> .....	55
4.1.1 Beneficiamento do RCC.....	57

	15
4.1.2 Caracterização química do RCC .....	59
4.1.1 Cimento Portland.....	59
4.1.2 Cinza Volante (CV).....	60
4.4.3. Preparo das Amostras.....	60
4.4.4 Análises Reológica.....	62
4.4.5 Calibração.....	64
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Caracterização da matéria prima (RCC) .....</b>	<b>65</b>
5.1.1 Espectrofotometria de fluorescência de raios-X .....	65
5.1.2 Difração de raios -X .....	65
5.1.3 Análise granulométrica do RCC .....	66
5.1.4 Análise granulométrica da CV .....	67
<b>5.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES REOLÓGICAS .....</b>	<b>68</b>
<b>6 CONCLUSÕES: .....</b>	<b>80</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
ANEXO A .....	93
ANEXO B .....	95
ANEXO C .....	96

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo das características reológicas das argamassas são considerados complexo, por apresentar características de sistema particulado (fase sólida e fase fluida),isto é, uma natureza multifásica. Devido a isso sua formulação apresenta diferentes fatores que influenciam em seu comportamento reológico como: granulometria, teor de sólidos, quantidade de água adicionada na mistura e a sua composição a partir do qual a mesma é fabricada.

Em principio as argamassas são constituídas pela mistura, em proporções adequadas de três componentes básicos: ligantes, agregados e água. Para além destes componentes, é usual a adição de aditivo químico em pequenas quantidades para modificar algumas características específicas para o uso (HEWLETT, 2001).

O desenvolvimento de composições para argamassas, relativamente ao teor de cada um dos seus componentes, é feito em função da sua aplicação final, sobretudo se são elaboradas para reboco, assentamento de pavimentos e revestimentos de juntas e de reparação (COUTINHO, 1997).

Em qualquer material fabricado a partir do cimento Portland, o tempo de trabalho é determinado pela reação química entre o cimento e a água. Nesta reação forma-se inicialmente uma camada de produtos hidratados que se mantém durante um período de repouso, após o qual se inicia o endurecimento do material. Se não existisse esse período de trabalho, durante o qual é possível manusear, aplicar e compactar o material, muitas utilizações normais dos materiais cimentícios não seriam possíveis (NEVILLE, 1975, COUTINHO, 1997, YOUNG, 1998).

Nos anos que antecederam, diversos estudos e pesquisas foram realizadas com a finalidade de tornar a cinza volante aproveitável, na indústria da construção civil do estado do Pará, tendo como base de apoio a UFPA. Dentre esses trabalhos destacam-se:

– Os trabalhos de Tancredi (2010), que pesquisou a viabilidade da adição de cinza volante nas propriedades do concreto em substituição ao cimento Portland, o que mostrou ser viável o aproveitamento do resíduo.



– Nos estudos de Rocha Júnior (2011), estudaram-se as características, físicas, químicas e mineralógicas das cinzas volantes tendo como finalidade sua utilização na síntese de Zeólitas, com aplicação na adsorção de  $\text{Cu}^{+2}$  e  $\text{Cd}^{+2}$ , obtendo bons resultados.

– Siqueira (2011) estudou a produção e o desempenho de argamassas, fabricadas a partir da incorporação de cinzas volantes, que forneceu valores de desempenho satisfatórios quando comparados com dados de literatura.

Assim este trabalho tem por objetivo a avaliação das propriedades reológicas de seis formulações de argamassa compostas por diferentes teores de resíduo da construção civil (RCC) e Cinza volante (CV) como material pozolânico, em substituição parcial do cimento Portland de acordo com o tempo de trabalho, determinado pelos efeitos de cura do material.

O estudo reológico das argamassas está relacionado com a melhoria do espalhamento e penetração nos poros dos substratos. Um dos requisitos básicos para sua aplicação é que elas devem apresentar, características ótimas de viscosidade aparente, como tensão de escoamento ideal para que a mesmas venham suportar o peso da placa cerâmica (lajota), além do seu próprio peso sem que ocorra escorregamento após a sua aplicação. O estudo é relevante para o desenvolvimento de novos produtos e para se compreender, os fenômenos que estão envolvidos em seu comportamento, pois para sua utilização nos processos de assentamento e revestimento é necessário se avaliar suas características no estado fresco, pois é neste momento é que se verifica a sua maior ou menor aptidão para ser aplicada as superfícies com determinada facilidade sem que ocorra a perda de sua homogeneidade e além disso, essas mesmas características influenciarem de forma direta no produto quando no estado endurecido.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAIS**

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação das características reológicas de seis formulações de argamassas dentro de um intervalo de tempo específico, determinado pelos efeitos de cura do material, em função da incorporação de rejeito da construção civil (RCC) como carga e cinza volante (CV) como aglomerante, em substituição parcial do cimento.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

a) Analisar a influência da incorporação de material pozzolânico na cura da argamassa tendo como base a utilização de resíduo sílico aluminoso da indústria da construção civil.

b) Avaliar o comportamento reológico da mistura composta para a argamassa com o tempo, e sua influencia na trabalhabilidade.

c) Avaliar suas características reológicas como tixotropia, reopexia e o modelo reológico nas características em que foram propostos os ensaios.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ARGAMASSA

A argamassa pode ser considerada uma mistura homogênea complexa de materiais orgânicos (polímeros) ou inorgânicos (agregado miúdo), e produtos especiais a ela incorporados chamados de aglomerantes (cimento Portland), que se tornam ativos na presença de água, além de materiais especiais chamados de aditivos, que podem variar as suas características físicas e químicas de acordo com a sua utilização. A mistura destes constituintes em proporções estudadas deve ser homogênea de acordo com o tipo de argamassa pretendida (SABBATINI 1984).

Segundo Warren (1999), a argamassa pode ser caracterizada como uma rocha artificial, em que em sua constituição estão presentes outras rochas com menor granulometria. Esse sistema está agregado a um ligante que mantém a forma geométrica do conjunto em que foi colocado e confere sua solidez.

Fisicamente as argamassas distinguem-se por apresentarem características plásticas e adesivas quando aplicadas em uma superfície e por tornarem-se rígidas e resistentes após um período de tempo. Estes fatores determinam seus principais empregos na construção civil (GASTALDINI e ISAIA, 1999).

A norma NBR 13529 (ABNT, 1995) define argamassa para revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento. Nesta mesma norma são definidos outros termos usuais envolvendo o revestimento executado à base de cimento e cal. Neste contexto encontram-se definições como:

– Adições: materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração na proporção.

– Argamassa de cal: argamassa preparada com cal como único aglomerante.

– Argamassa de cimento: argamassa preparada com cimento como único aglomerante.

– Revestimento: é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera comum a uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final.

De acordo com Ribeiro *et al.*(2002), as aplicabilidades das argamassas, estão ligadas de forma direta com os aglomerantes que são empregados a ela, bem como a granulometria da areia e a quantidade de água adicionada na mistura.

Uma argamassa de qualidade deve ser elaborada e produzida para obter o melhor desempenho e durabilidade. Deve-se ter como enfoque algumas propriedades, tais como: baixo custo de mercado, plasticidade, aderência no estado fresco e endurecido, ausência de fissuras, resistência à abrasão, compressão e boa trabalhabilidade (SCANDILARA, 2010).

## **3.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS**

### 3.2.1 Elasticidade

De acordo com SABBATINI (1984), a elasticidade é a propriedade que a argamassa possui em se deformar quando já no estado endurecido, sem que ocorra ruptura da sua estrutura quando a ela for solicitado um esforço. Portanto a elasticidade é uma propriedade que pode indicar a ocorrência de fissura no revestimento, influenciando sobre o grau de aderência da argamassa a sua base. (CINCOTTO *et al.* 1995).

### 3.2.2 Retenção a água

A retenção de água é a capacidade que a argamassa possui quando se encontra no estado fresco de manter constante sua trabalhabilidade ou consistência, quando a ela ocorrem solicitações que causem perda de água, essas perdas podem ser

por hidratação do cimento, por evaporação ou por sucção do substrato (CINCOTTO *et al.* 1995).

### 3.2.3 Plasticidade

É a propriedade que a argamassa possui em continuar deformada mesmo após a redução das tensões de deformação. Segundo Cincotto *et al.* (1995), a plasticidade e a consistência, quando influenciadas por fatores como teor de aglomerante, teor de ar incorporado e intensidade de mistura, caracterizam a trabalhabilidade do produto.

De acordo com Cascudo *et al.* (2005), para se chegar a uma plasticidade adequada para cada aplicação e finalidade, a argamassa deve possuir uma quantidade ótima de água, sendo que esta função está ligada a proporcionalidade em que os materiais estão distribuídos na mistura.

### 3.2.4 Consistência

Segundo Cincotto *et al.* (1995), é a propriedade que a argamassa apresenta em resistir a deformação quando a mesma encontra-se no estado fresco, essa característica classifica as argamassas em :

- Secas - a pasta preenche os vazios entre os grãos;
- Plástica – a pasta atua como lubrificante, isto é, forma uma fina película na superfície dos grãos dos agregados;
- Fluidas – os grãos que constituem o sistema ficam imersos na pasta.

De acordo com Selmo (1989), a consistência, é determinada de forma direta pelo conteúdo de água, essa propriedade é influenciada por fatores como: natureza e quantidade do aglomerante, granulometria da areia, relação aglomerante/areia, relação água / aglomerante.

O comportamento reológico das argamassas pode ser avaliado atualmente por equipamentos sofisticados (viscosímetros rotacionais), fornecendo parâmetros que

são de fundamental importância nessa avaliação como (viscosidade e tensão de cisalhamento) (BAUER *et al.* 2005).

### 3.2.5 Adesão Inicial

De acordo com Rosello (1976), a adesão inicial deve-se, em princípio, às características reológicas da pasta aglomerante; a baixa tensão superficial, sendo função inversa do consumo de aglomerantes, o que propicia a sua adesão física ao substrato, assim como aos próprios grãos do agregado miúdo.

Para Cincotto *et al.*, (1995), adesão inicial da argamassa no estado fresco ao substrato é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/revestimento quanto ao desempenho decorrente da aderência.

### 3.2.6 Trabalhabilidade

De acordo com Tattersall, (1991), trabalhabilidade é uma palavra que se refere às propriedades das massas cimentícias quando no estado fresco, indicando a capacidade de ser trabalhada. Para Sabbatini (1984), esta propriedade está ligada a consistência, e pode-se dizer que a trabalhabilidade é a maior ou menor facilidade de se manusear a argamassa. Uma observação importante é que uma argamassa é trabalhável quando ela possui característica homogênea quando assentada, não aderindo a ferramentas quando aplicada e continuar plástica o tempo suficiente até o fim da aplicação, não ocorrendo também o fácil endurecimento quando está em contato com superfícies que absorvam água e não segregando ao ser transportada.

Segundo Cascudo *et al.* (2005), quantificar e prescrever características de trabalhabilidade é uma tarefa bastante complexa, uma vez que ela não depende somente das características que são intrínsecas do material, mas também do profissional que irá manipular o material e das propriedades do material em que ela será aplicada.

Devido às muitas limitações encontradas para analisar os fatores de trabalhabilidade, diversas metodologias de ensaios mais objetivos foram desenvolvidos ao longo do tempo. Além disso, a natureza composta dessa propriedade e a sua

dependência do tipo de construção e dos diversos métodos de lançamento, adensamento e acabamento das superfícies são os motivos em que nenhum método de ensaio único pode ser projetado para medir essa propriedade (CASTRO, 2007).

Entre os diversos tipos de métodos desenvolvidos para medir a trabalhabilidade estão: a mesa de consistência (NBR 7215/96), o ensaio de penetração *Kelly Ball* (ASTM C 360/92), o ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67/98), o consistômetro de Ve-Be (DNER –ME 094/94) e o fator de compactação (ACI Standart 211.3). Embora esses métodos de ensaios sejam muito úteis para a avaliação da qualidade dos concretos e argamassas, eles são em grande parte, medidas qualitativas, sendo baseados em escalas definidas empiricamente (SAAK *et al.* 2004).

### 3.3 CIMENTO

De acordo com a literatura, o cimento Portland é definido como um cimento tipo hidráulico, produzido através do clíncker que é pulverizado, consistindo essencialmente de silicatos hidratados de cálcio, e contém usualmente uma ou mais formas de sulfato de cálcio como forma de adição (BAUER *et al.* 2005).

Na produção de uma pasta, concreto ou argamassa, o primeiro critério a se escolher é quanto ao tipo de cimento a ser empregado, mesmo quando um ou mais materiais cimentícios suplementares são incorporados à mistura, isto porque a sua desempenho em termos de reologia e de resistência torna-se um item crítico à medida que a resistência à compressão desejada aumenta (AÏTCIN, 2000).

Alguns tipos de cimento Portland possuem um bom desempenho em termos de resistência mecânica, mas um péssimo comportamento reológico, o que dificulta o lançamento e o adensamento do material produzido; outros apresentam um ótimo desempenho em termos de reologia, porém seu desempenho quanto à resistência mecânica deixa a desejar. Assim, devido à grande variabilidade nas propriedades químicas e físicas do cimento, deve-se esperar que diferentes cimentos apresentassem diferentes características, na presença de um mesmo aditivo (CASTRO, 2007).

Os principais constituintes das matérias-primas do cimento Portland são a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). As matérias primas, dosadas de acordo com a composição desejada, são misturadas e sujeitas a temperaturas, em fornos tipos rotativos, da ordem de 1400 a 1650°C, onde por reação química a mistura se converte em clínquer de cimento, o qual é arrefecido, sendo em seguida cominuído e reduzido a pó. É normal adicionar-se ao clínquer pulverizado uma pequena quantidade de gesso (4-5%) com a função de controlar a pega, obtendo-se assim o cimento (TAYLOR, 1972).

O cimento Portland apresenta quatro constituintes principais, o silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), normalmente representado por  $\text{C}_3\text{S}$ , o silicato de cálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), representado por  $\text{C}_2\text{S}$ , o aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), designado por  $\text{C}_3\text{A}$  e a aluminoferritetetracálcica ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que é representada como  $\text{C}_4\text{AF}$ . No entanto, o teor de cada constituinte no cimento Portland pode variar dentro de uma gama bastante larga dependendo das matérias primas utilizadas. O silicato tricálcico varia entre 20 e 65%, o silicato bicálcico entre 10 e 55%, o aluminato tricálcico entre 0 e 15% e o aluminoferratotetracálcica pode ocorrer entre 5 e 15% do peso total de cimento. As fases  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  constituem cerca de 75% do peso deste cimento (SMITH, 1996).

Embora os estudos de hidratação se refiram aos componentes puros do cimento, na realidade esses componentes não existem nessa forma mas sim como soluções sólidas contendo alumina, magnésio, sódio e outros elementos dopantes da rede cristalina.

Devido o cimento Portland ser constituído por diversos constituintes, a sua hidratação é um processo complexo, que ainda não se encontra totalmente consolidado teoricamente, sabe-se somente que esse processo consiste numa série de reações químicas individuais, que acontecem em paralelo e sucessivamente (JOLICOEUR e SIMARD 1998). O progresso da hidratação e a sua cinética são influenciados por fatores como:

- Composição do cimento e presença de íons estranhos à rede cristalina;



- Distribuição granulométrica das partículas de cimento, especificamente a área superficial;
- Relação água / cimento;
- Temperatura;
- Presença de adjuvantes.

De acordo com a literatura o processo de hidratação de uma pasta de cimento Portland, à temperatura ambiente, é caracterizada por diferentes estágios, (COUTINHO, 1997; SMITH, 1996; TAYLOR, 1972). Estes estágios podem ser caracterizados como:

- Período de pré-indução:

Imediatamente após o contato do cimento com a água, ocorre uma rápida dissolução de espécies iônicas, presentes no cimento, para a fase líquida. A duração deste período não ultrapassa alguns minutos e este período de hidratação rápida parece ser desacelerado pela formação de uma camada de produtos de hidratação à superfície dos grãos de cimento. Desta forma é criada uma barreira entre o material não hidratado e a fase líquida, a película que se forma é instável e semipermeável.

- Período de indução ou dormente:

Após o período anterior de rápida hidratação, a velocidade de reação decresce para valores muito baixos durante um período de algumas horas. Durante este estágio os minerais do cimento hidratam de uma forma extremamente lenta. Este é o período durante o qual o material permanece trabalhável e no qual se torna fundamental conhecer as suas propriedades reológicas.

- Período de aceleração:

A partir deste momento a reação de hidratação acelera novamente sendo controlada pela cinética de nucleação e crescimento dos produtos da reação. Este período pode ocorrer de 3 a 12 horas após a mistura e coincide com o início da pega. A pega consiste na perda progressiva da consistência pastosa da pasta de cimento. O instante em que a pasta inicia essa perda corresponde ao início da pega e quando deixa

de ser deformável, transformando-se numa massa rígida, é o final da pega e o começo do endurecimento correspondente ao período seguinte.

– Período de pós-aceleração:

Neste período a taxa de hidratação decresce gradualmente à medida que a quantidade de material não hidratado diminui e a reação passa a ser controlada pela velocidade de difusão. Embora a velocidade de difusão seja muito baixa, verifica-se uma reação mensurável que persiste mesmo após meses de cura. A este processo corresponde o fim da pega e início do endurecimento ou cura do material.

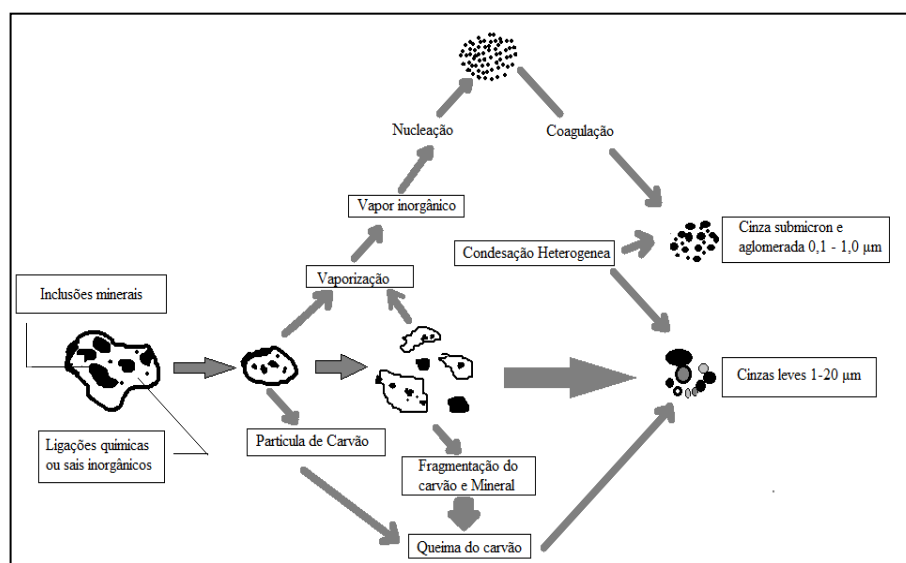
### 3.4 CINZA VOLANTE

A obtenção cinza volante ocorre pela queima do carvão mineral em usinas termelétricas e contém alto teor de sílica e alumina. O seu mecanismo de formação ocorre durante a etapa de combustão do carvão pulverizado, quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno. A matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais, tais como as argilas, o quartzo, e o feldspato, fundem-se a alta temperatura. O material fundido é rapidamente transportado para zonas de temperatura mais baixa, onde se solidifica em partículas esféricas de vidro. Parte da matéria mineral aglomera formando cinza de grelha, mas a maior parte dela é arrastada pela corrente de exaustão do gás e é chamada de cinza volante (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O processo de formação das cinzas volantes, esta intimamente ligada a um mecanismo complexo, que ocorre durante a combustão do carvão mineral e as condições em que ocorrem essa combustão. Muitos fatores alteram a produção das cinzas, criando vapores, fumos e partículas com geometrias maiores com diversas composições em sua constituição (GUPTA *et al* 1998).

Os constituintes sólidos que estão presentes no carvão mineral tem a capacidade de formarem cinzas durante a sua combustão, estes constituintes estão muitas vezes presentes como partículas minerais inclusas isto é, estão dispersas no combustível sem apresentar ligações químicas com a matriz. A Figura 1 apresenta o mecanismo de formação das cinzas volantes, através de uma distribuição bimodal

relacionada a granulometria (tamanho) das cinzas , a partir do modelo proposto por (KNUDSEN, 2001).



**Figura 1:** Mecanismo de formação das cinzas volantes durante a combustão do carvão mineral. Fonte: KNUDSEN, 2001.

A primeira etapa do processo, refere-se a formação de partículas de cinza com diâmetros superiores a  $1\mu\text{m}$ , essa etapa engloba a fragmentação do carvão mineral, seguida pela união dessas partículas com auxílio dos vapores orgânicos gerados.

A segunda etapa corresponde as sub-etapas de nucleação, condensação e coagulação dos vapores dos sais alcalinos que estão presentes no carvão, gerando assim partículas submicrométricas (BAXTER, 1993).

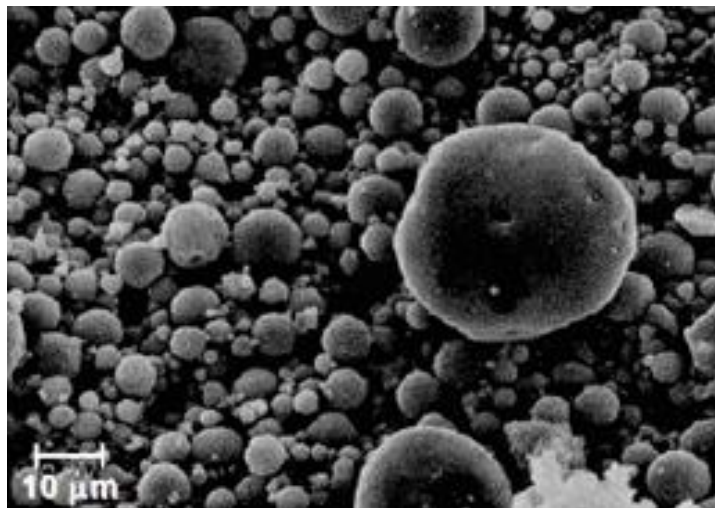
A caracterização das cinzas volantes em termos de composição mineralogia, superfície e reatividade química é de fundamental importância no desenvolvimento de várias aplicações tecnológicas. Elas possuem, fisicamente a forma de pó, isto é são constituídas de partículas finas. (MATTIGOD *et al.* 1990).

Normalmente, suas dimensões variam no intervalo de  $1\mu\text{m}$  a  $150\mu\text{m}$  de diâmetro devido a essas características granulométricas não há necessidade que ocorra a operação cominuição para o seu uso (EROL, 2000).

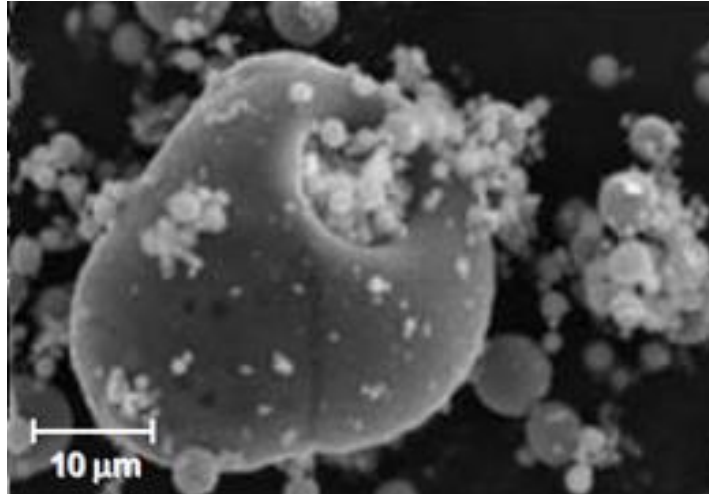
De acordo com a norma ASTM C618, as cinzas volantes são classificadas em duas categorias: cinzas volantes Classe C e Classe F. A cinza volante é um material complexo formado pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas. As cinzas volantes são compostas principalmente por silicatos ( $\text{SiO}_2$ , 35-60%), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10-30%), óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 4-20%) e de cálcio ( $\text{CaO}$ , 1-35%).

As cinzas volantes são constituídas de partículas esféricas Figura 2, que são basicamente de dois tipos, sólidas e ocas (cenosferas ou pleosferas), de acordo com a Figura 3. São essencialmente vítreas (80% em constituição), apresentando finura elevada. Alguns tipos de cinza volante apresentam partículas com geometrias irregulares. A maioria das partículas possui um diâmetro que está compreendido no intervalo de  $1\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ , podendo apresentar uma elevada ou uma baixa granulometria do que as do cimento. O diâmetro médio que as cinzas volantes apresentam esta no intervalo de  $7\mu\text{m}$  e  $12\mu\text{m}$  (JOSHI e LOHITA, 1997), o que é semelhante a do cimento.

Segundo os trabalhos de Alonso e Wesche, (1991), as superfícies específicas, calculadas pelo método de Blaine, apresentam variação entre  $250\text{m}^2/\text{Kg}$  a  $550\text{m}^2/\text{kg}$



**Figura 2:** Partículas esféricas de Cinza Volante (CV).  
**Fonte:** AZEVEDO, 2002



**Figura 3:** Partículas pleosferas contendo partículas cenosféricas de Cinza Volante (CV).  
Fonte: AZEVEDO, 2002.

Segundo Jalali, (1991) e Neville, (1995), apesar de não haver um acordo quanto a forma mais eficaz de medir a granulometria das cinzas, é consensual que a maioria das partículas finas possuem uma intensa atividade pozolânica. Como a maioria das reações químicas ocorrem com maior área específica é explicável que a atividade pozolânica seja dependente da área disponível para que ocorra a reação.

As cinzas volantes que apresentam a forma esférica possuem vantagem em relação ao teor de água incorporado, pela facilidade de hidratação das partículas e indica que esse material apresenta uma elevada reatividade com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1995).

As propriedades químicas de cinzas volantes são influenciadas pelas propriedades do carvão mineral e das técnicas utilizadas para manuseio e armazenamento. Existem basicamente quatro tipos de carvões minerais, que variam de acordo com o seu poder calorífico, a sua composição química, teor de cinzas geradas e origem geológica. Os quatro tipos de carvão são antracite, betuminoso, sub-betuminoso e linhite. Além de serem classificadas em uma forma seca ou úmidas, as cinzas volantes são classificadas de acordo com o tipo de carvão que foi derivada (AHMARUZZAMAN, 2010).

As características pozolânicas das cinzas volantes estão intimamente relacionadas com o teor de  $\text{SiO}_2$ , a sílica amorfa que reage com a cal livre e água dá origem a quantidades suplementares de C-S-H. Para uma cinza volante ser inativa em relação as características pozolânicas elas devem possuir o teor de  $\text{SiO}_2$  inferior a 35%, esses tipos de cinzas volantes são inviáveis para serem incorporadas em concretos e argamassas (ALONSO e WESCHE, 1991).

Segundo Aitchin, (1998) e Malhotra, (1999), nem todas as cinzas volantes são viáveis e adequadas para serem usadas nos concretos e argamassas, no entanto, é possível intervir nas suas características, melhorando determinadas características técnicas de separação, suspensão e moagem, que podem beneficiar o desempenho das cinzas, transformar cinzas não conformes em cinzas aptas para aplicação em concretos e fazer com que cumpram os requisitos normativos, nomeadamente em relação à finura e ao teor de sólidos.

**Tabela 1:** Faixa dos principais Óxidos, presentes nas cinzas volantes.

CINZA VOLANTE	TEOR (%)	TEOR (%)
elementos	0,09	0,941
Na <sub>2</sub> O	0,46	1,836
MgO	22,71	16,399
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51,71	42,53
SiO <sub>2</sub>	0,08	0,194
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,65	-
S	0,94	1,61
K <sub>2</sub> O	2,75	19,005
CaO	0,86	0,897
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,073
MnO	5,93	7,081
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,35	-
PF	10,74	-
C.Orgânicos	40,09	
CO <sub>2</sub> total	1030(ppm)	
Cl (ppm)	-	0,056
SO <sub>3</sub>	-	9,208
ZnO	-	0,014
Rb <sub>2</sub> O	-	0,011
SrO	-	0,046
BaO	-	0,095
Rb <sub>2</sub> O	-	0,011

\* Fonte: Coletânia Habitare (1999).

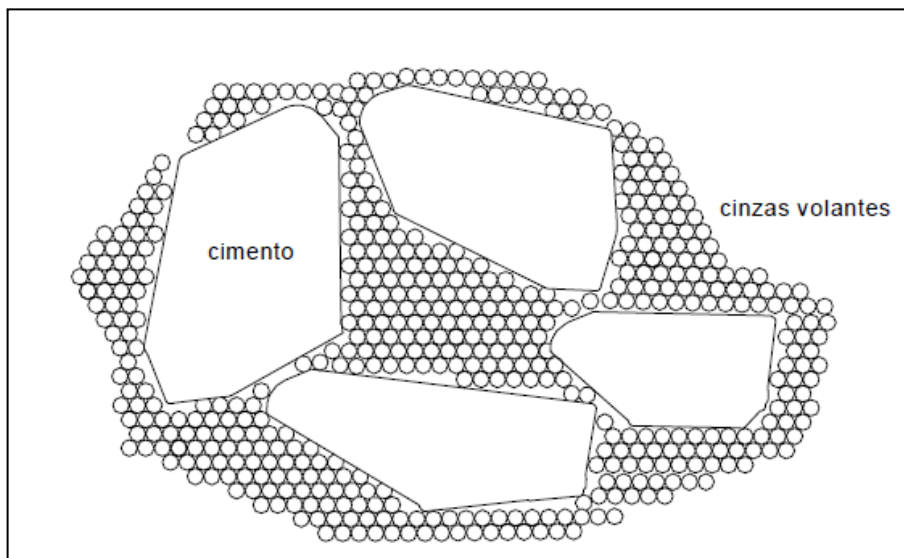
\*\* Fonte: TANCREDI 2010 (Análise da cinza volante realizada no Instituto de GeoCiências da UFPA ).

### 3.5 UTILIZAÇÃO DAS CINZAS VOLANTES EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

O uso de cinza volante como adição mineral na produção de argamassas pode dar-se em misturas binárias ou ternárias, combinadas com outras pozolanas, ou ainda misturas com cinzas de ambas as categorias. Considerando o concreto no estado fresco as cinzas volantes possuem um papel muito importante, uma vez que ela melhora a coesão e a trabalhabilidade, diminuindo a exsudação e a segregação e aumentando o tempo de pega. Já no estado endurecido, a cinza volante contribui para a diminuição da temperatura devido às reações de hidratação que se apresentam inicialmente de forma mais lenta (AZEVEDO, 2002).

As cinzas volantes influenciam na grande maioria das propriedades do concreto endurecido, nomeadamente a resistência mecânica e a durabilidade. É possível enumerar dois dos efeitos fundamentais associados à incorporação em argamassas: o efeito físico (efeito *fíler*) e o efeito químico (efeito pozolânico).

O efeito *fíler* é caracterizado pelo preenchimento com partículas de cinzas volantes nos vazios existentes entre as partículas de cimento, de dimensão superior, como mostra a Figura 4. Assim, é garantida uma maior compacidade e densidade da pasta, mesmo antes do desenvolvimento das ligações químicas quando da hidratação do cimento.



**Figura 4:** Efeito fíler das cinzas volantes  
Fonte: AZEVEDO, 2002.

O efeito pozolânico é devido à presença de compostos siliciosos ou sílico-aluminosos que por si só apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, mas que, na presença de água, ficam aptos a se relacionarem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes (AZEVEDO, 2002).

Os eventuais ganhos de resistência e durabilidade serão manifestamente consequência da maior ou menor efetivação destes dois efeitos. De um modo geral, as cinzas volantes contribuem para a diminuição das características mecânicas dos corpos de provas nas primeiras idades. No entanto, quando são atingidas idades mais



avançadas, os corpos de prova com cinzas volantes podem apresentar resistências mecânicas semelhantes ou até mesmo superiores às determinadas em corpos de controle, sem adição de cinzas. Devido ao fato de a reação pozolânica ser lenta, mas prolongada, verifica-se uma recuperação dos níveis de resistência nos corpos com cinzas ao longo do tempo, caso estes sejam curados devidamente, uma vez que, a reação pozolânica só ocorre na presença de água. (ACI COMMITTEE 232, 1996).

### **3.6 AGREGADOS**

Na elaboração das massas cerâmicas a escolha dos agregados é de fundamental importância, pois no estado fresco eles desempenham um papel fundamental na determinação da trabalhabilidade das misturas das argamassas e concreto e do custo, quando no estado endurecido eles podem influenciar na durabilidade do material, na estabilidade dimensional e na resistência mecânica, nesse sentido é de extrema importância se conhecer macroscopicamente sua forma e sua textura superficial, buscando melhorar e aumentar a junção entre a pasta de cimento, melhorando também a resistência mecânica de acordo com o seu uso (CASTRO, 2007).

Segundo Methta e Monteiro (2008), fatores como a composição mineralógica dos agregados afeta a resistência, a compressão, dureza, modulo de elasticidade e durabilidade que por sua vez, interferem nas propriedades dos concretos e argamassas quando no estado endurecido.

No processo de formulação das massas cimentícias (concretos e argamassas), deve-se empregar uma granulometria adequada e constante, pelo contrario pode resultar na variação da trabalhabilidade que ao serem corrigidas, podem variar a quantidade inicial de água na mistura, podendo ocasionar diferentes pontos de resistências nos corpos de prova (NEVILLE 1995).

De acordo com Silva (2000), o fator de forma das partículas dos agregados influencia de forma direta nas pastas de cimento, mais especificadamente no estado fresco do que no estado endurecido, esse fato é explicado devido ao entrelaçamento mecânico, a ligação da matriz pasta de cimento e agregado.

No caso do agregado miúdo utilizado nas argamassas, sua forma e textura têm efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura; enquanto no concreto a lamelaridade e a forma do agregado graúdo geralmente tem um efeito que é observado na trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1995).

Para Castro (2007) a quantidade e o tipo de agregado desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, em particular para a produção de concreto de alto desempenho, com baixa relação água/aglomerante. Os agregados possuem um efeito principal na reologia do concreto, aumentando consideravelmente tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento.

Historicamente a utilização de agregados dispersos na massa de cimento aconteceu por razões econômicas, já que estes empregavam um menor custo que o cimento, no entanto, a sua adição acrescentou outras vantagens, nomeadamente técnicas, pois em geral o agregado é mais resistente que a matriz de cimento e confere ao conjunto maior estabilidade e durabilidade (NEVILLE, 1975). Numa monomassa, a areia tem como principal função reduzir a retração e melhorar a resistência mecânica (MASCARENHAS, 2003).

### **3.7 REOLOGIA**

O termo reologia se origina da palavra *rhein* que significa “escorrer” e *logia* que significa “ciência”, ou seja, reologia é definida como a ciência que estuda o modo pelo qual a matéria se deforma ou escoar, quando submetida a forças externas (MACHADO, 2002). A reologia analisa a resposta de um material provocada pela aplicação de uma tensão ou de uma deformação, é o ramo da física que estuda a mecânica dos corpos deformáveis os quais podem se encontrar no estado sólido, líquido e gasoso (TATTERSAL e BANFILL, 1983).

Definida por Newton e Hooke no século XVII, foi somente em 1920, quando a criação e descoberta de materiais como borrachas sintéticas, plásticos, cerâmica, tinta e fluidos biológicos e que a reologia passou a ter importância industrial, quando surgiu a necessidade de ser estudada mais profundamente por áreas como a Física, Matemática e Química dos coloides (TANNER, 1988).

Como ciência, a reologia tem importância para o entendimento da relação estrutura/propriedade dos materiais, tendo em vista que a variação das propriedades reológicas está intimamente relacionada às mudanças na estrutura, caso sejam mantidas as condições de teste. Já na indústria, o conhecimento do comportamento reológico de matérias-primas e produtos é importante para o projeto de equipamentos e controle dos processos (NASCIMENTO, 2008).

Na prática a reologia está mais interessada em fluidos que apresentam um comportamento complexo, cujas propriedades de escoamento são mais complicadas em termos industriais, do que as de fluidos que apresentam um comportamento simples (líquidos ou gases), muito embora possam existir materiais que apresentem um comportamento simples sobre condições restritas de ensaios, os mesmos poderiam apresentar um comportamento totalmente diferente e complexo quando submetidos a outras condições (TATTERSAL e BANFILL, 1983).

Segundo Van Wazer *et al.* (1966), em materiais que apresentam um comportamento multifásico é difícil relacionar as curvas de escoamento, pois elas sempre são usadas para medidas envolvendo escoamento laminar, condições em que a velocidade de escoamento varia só na direção da altura da lamina líquida considerada e não nas duas direções perpendiculares a altura, sempre considerando um meio contínuo, o que se torna complicado para sistemas particulados no qual são compostos por partículas grandes na fase dispersa. No caso a solução encontrada em relação a descontinuidade foi o uso de instrumentos de maiores dimensões, para caracterizar seus escoamentos.

A reologia de suspensões compreende o estudo do comportamento de fluxo de suspensões de sólidos, utilizando principalmente, a determinação da viscosidade aparente e a tensão de escoamento. O principal objetivo da reologia segundo Barnes *et al.* (1989), e o estudo da deformação e fluxo da matéria, que envolvem fenômenos como elasticidade, plasticidade e viscosidade.

### 3.7.1 Tensão e Deformação

Tensão e deformação são duas variáveis em que a relação entre elas formam as bases conceituais de reologia. (GABAS *et al.* 2012).

Segundo Bretas e D'Ávila (2000), vários tipos de força atuam sobre um fluido, quando o mesmo encontra-se em movimento. Essas forças surgem devido ao seu movimento (força de convecção), a ação da gravidade (força de campo), aos gradientes de pressão e as interações moleculares próprias do fluido (forças de superfície).

Por definição, a tensão é a força por unidade de área e é definida pela equação 1

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

Onde  $\Delta F$  é a força que atua em  $\Delta A$ . Logo a tensão é definida por uma força por unidade de área e usualmente expressa em Pascal ( $\text{N/m}^2$ ), fisicamente pode ser de tração, compressão e cisalhamento. Ao considerar que tanto a força quanto a área na qual esta força é aplicada são grandezas vetoriais, ou seja, a força esta associada a uma dada orientação, nesta sequencia podemos definir a tensão em termos matemáticos com um maior rigor e formalismo (GABAS *et al.* 2012).

Ao associar um escalar a uma direção obtém-se um vetor e, ao associar um vetor (força) a uma direção obtém-se um tensor tensão ( $\bar{\tau}$ ), definido de acordo com a Equação 2:

$$\vec{F} = \hat{n} \times \bar{\tau} \quad (2)$$

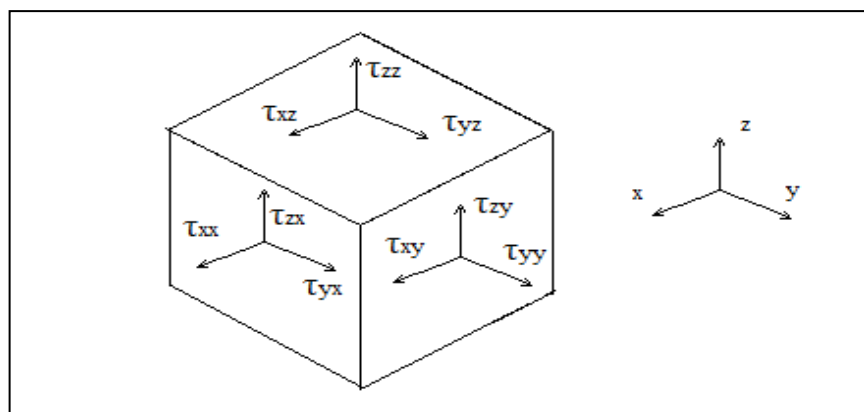
Onde  $\vec{F}$  é o vetor força e  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal a superfície onde a força é aplicada. O tensor tensão representa as tensões em um elemento de fluido sem considerar a pressão hidrostática ou termodinâmica que atua no sistema.

De acordo com Bretas e D'Ávila (2000), cada componente do vetor força está associado a uma direção. Logo nove componentes de tensão distintas são necessárias para descrever completamente a tensão em um material, que são representados pela Equação matricial 3:

$$\tau = \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

As componentes do tensor tensão  $\tau_{ij}$ , com  $i=j$ , ou seja,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  e  $\tau_{zz}$ , são denominadas componentes normais de tensão (tensões normais). Já as componentes  $\tau_{ij}$ , com  $i \neq j$ , são denominados de componentes de cisalhamento (tensões de cisalhamento) e atuam na direção paralela a uma dada face do elemento do fluido.

A Figura 5 representa a distribuição das componentes do tensor tensão para um elemento de fluido em coordenada cartesiana em que o índice “i”, representa geometricamente o paralelismo da componente com determinado eixo, enquanto o índice “j”, faz a representação do plano perpendicular a um determinado eixo onde a componente atua.

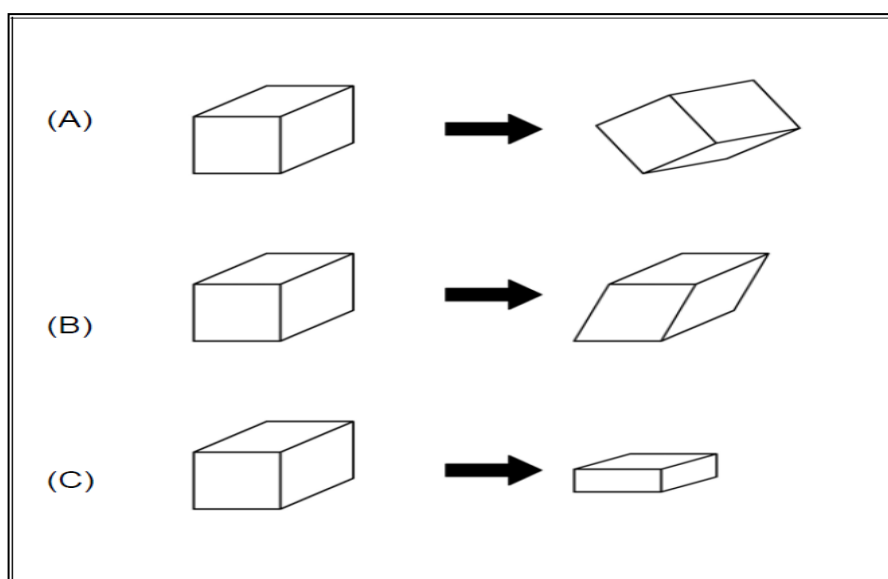


**Figura 5:** Componentes do tensor tensão para um sistema de coordenadas cartesianas Fonte: BRETAS e D'ÁVILA 2000.

### 3.7.2 Deformação

A deformação pode ser conceituada fisicamente como uma modificação da forma primitiva da matéria, pode-se dizer que a deformação esta associada a mudança de posições relativas das partes de um corpo (BRETAS e D'ÁVILA 2000). De acordo com Van Wazer (1966), a deformação de um corpo pode ser arbitrariamente dividida em dois tipos: elasticidade ou deformação espontaneamente reversível, e escoamento ou deformação irreversível.

A deformação espontaneamente reversível (elasticidade) ocorre no nível atômico, o que se observa macroscopicamente é a variação do espaço interatômico para que ocorra o equilíbrio das cargas externas, ocasionando a movimentação de átomos de forma reversível na rede cristalina, ou seja, ocorre a regeneração do arranjo inicial quando a carga externa é retirada. De acordo com Schramm, (2006), o trabalho empregado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retoma a sua forma original, enquanto o trabalho empregado na manutenção do escoamento é dissipado na forma de calor, não podendo ser recuperado mecanicamente, logo se conclui que a elasticidade corresponde à parcela de energia recuperada mecanicamente e o escoamento a parcela de energia que é dissipada na forma de calor.



**Figura 6:** Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação; (B) Deformação por cisalhamento; (C) deformação por alongação  
Fonte: BRETAS e D'ÁVILA, 2000.

A deformação irreversível (escoamento) ou permanente ocorre no nível do cristal (ou do grão) e corresponde a deslocamentos de átomos de suas posições de equilíbrio, os quais permanecem nessas novas posições quando a carga externa é removida. Normalmente, em baixas temperaturas o fenômeno da deformação plástica ocorre praticamente dentro do cristal (transgranular ou intragranular) e em altas temperaturas pode ocorrer basicamente escorregamento dos contornos dos grãos (intergranular) (BRETAS e D'ÁVILA 2000).

Do ponto de vista da reologia, as propriedades mecânicas de todos os materiais são descritos em termos de contribuições elásticas, viscosas e inerciais (VAN WAZER, 1966).

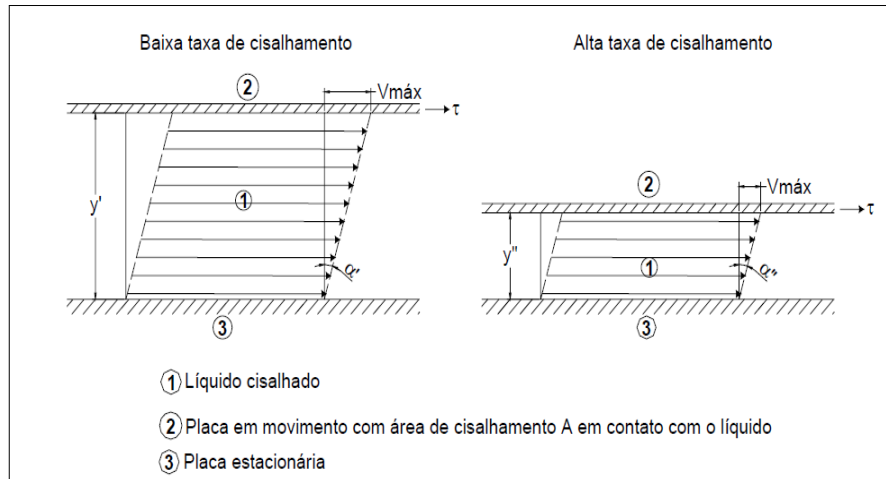
Castro (2007) ressalta que a deformação elástica é constantemente expressa em termos de deformação, definida de maneira elementar como uma deformação relativa. A deformação viscosa é expressa em termos de taxa de cisalhamento. A taxa de cisalhamento corresponde à mudança na velocidade do escoamento com uma distancia medida em determinados ângulos em relação à direção do fluxo. Assim, a caracterização reológica dos fluidos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo ao invés da deformação absoluta do mesmo.

Segundo Pandolfelli *et al.*, (2000). Os fluidos podem ser definidos como matéria ao se deformarem continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento, sendo que, na ausência desta, não haverá deformação. Ao submetê-los a qualquer tensão externa, eles se deformam continuamente até encontrar uma barreira física capaz de impedir seu escoamento logo à caracterização reológica dos fluidos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo ao invés da deformação absoluta do mesmo.

Na camada superior a velocidade de escoamento é máxima de acordo com a Figura 7 e vai diminuindo progressivamente à medida que atravessa o corpo de prova até chegar à zero na camada ligada da placa estacionária (SCHRAMM, 2006).

O gradiente de velocidade na amostra é chamado de taxa de cisalhamento e é definido como uma diferencial da velocidade pela distancia entre as duas placas ( $dv/dy$ ),

representada por  $\gamma$ , de uma maneira geral os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação (FOX e McDONALD, 1998).



**Figura 7:** Deformação de um fluido.

Fonte: SCHRAMM, 2006.

### 3.7.2.1 Viscosidade

De acordo com Schramm (2006), a viscosidade é a resistência de um fluido a qualquer mudança irreversível ao seu elemento de volume, e conclui que para que ocorra a conservação do escoamento, deve ser adicionada energia continuamente ao fluido.

A viscosidade tem por definição a propriedade que mede a resistência do material quando este é submetido ao escoamento. Logo quando maior for a viscosidade do material, maior será a sua resistência ao escoamento e vice-versa (BRETAS E D'ÁVILA 2000).

Para Pandolfeelli *et al.* (2000), a viscosidade pode ser considerada propriedade reológica principal de um fluido, pois é a indicação da facilidade de escoamento de um fluido quando este é submetido continuamente a uma tensão de cisalhamento externa.



Segundo Tattersall (1991), viscosidade é um termo que pode ser usado qualitativamente, assim como o termo consistência, para materiais que possuem a propriedade de resistir a deformação crescente com o aumento da taxa de cisalhamento, quando o termo é usado quantitativamente, ele é definido como a tensão de cisalhamento dividida pela taxa de cisalhamento, quando esta for constante, logo este termo está incorreto quando se tratar de fluidos não-newtonianos, tendo o seu uso restrito apenas para fluidos newtonianos. No caso de fluidos não-newtonianos, a viscosidade pode variar de acordo com as propriedades de cada fluido, com a mudança da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento, surgindo assim diversas classes de fluidos.

Quando um fluido sofre uma deformação ocorre uma interação interna entre as partículas (meios contínuos), mas sabe-se que há diferentes comportamentos para essa interação em diferentes tipos de fluidos. Tomando-se como exemplo básico dois fluidos diferentes escoando num plano inclinado sob as mesmas condições, o tempo de queda provavelmente será diferente para os mesmos, dependendo da resistência interna da interação das partículas. Essa maior ou menor resistência interna das partículas está diretamente ligada à noção de viscosidade. Outra definição clássica para a viscosidade, é relativa à variação da tensão de cisalhamento pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido newtoniano (KIRYU, 2006).

Em termos matemáticos a viscosidade pode ser definida pela relação da tensão de cisalhamento, pelo gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento, a equação 4, mostra que quando menor for a viscosidade de um fluido, menor será a tensão para submetê-lo a uma taxa de cisalhamento.

$$\mu = \frac{\text{Tensão de cisalhamento}}{\text{Taxa de cisalhamento}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

No entanto em sistemas que apresentam um comportamento que diverge do comportamento observado nos fluidos homogêneos, a presença de duas ou mais fases, gera uma ou mais interfaces de natureza diferente, difícil de ser caracterizada. A determinação da viscosidade aparente de uma suspensão requer uma descrição

detalhada das características do campo de fluxo, que é virtualmente impossível de descrever em termos de cisalhamento simples. De fato, o campo de deformação local é afetada pela presença de todos os elementos presentes na suspensão, e só em casos limites tem sido possível encontrar expressões analíticas. (COUSSOT, 2005).

Nos concretos e argamassas, a viscosidade está ligada às pastas e conseqüentemente, ao teor de água, à origem mineralógica, dimensão e forma dos agregados e ao efeito lubrificante das partículas finas (BLOMBLED, 1967 apud RAGO, 1999).

### 3.8 CLASSIFICAÇÕES REOLÓGICA DOS FLUIDOS

De acordo com a literatura os fluidos são caracterizados de acordo com seu comportamento reológico, e podem ser newtonianos e não-newtonianos (BIRD *et al.* 1960).

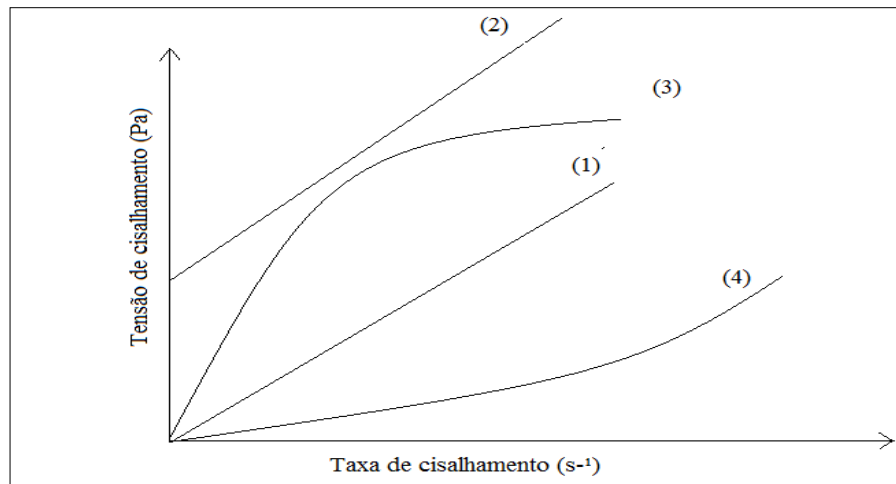
A Equação 5 é conhecida como a “Lei de Newton do cisalhamento”. Todos os fluidos que em escoamento laminar, apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e o gradiente de velocidade ( $\dot{\gamma}$ ) são denominados fluidos Newtonianos.

Para estes fluidos a viscosidade depende somente da temperatura e as pressão às quais o fluido é exposto, sendo independente do gradiente de velocidade (STEFFE, 1992).

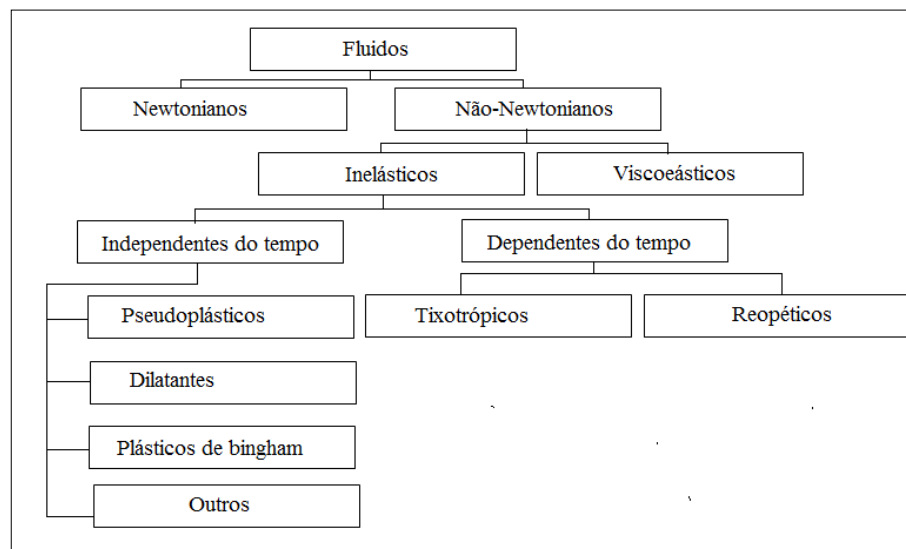
$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

No entanto, nem todos os fluidos apresentam comportamento semelhante a esse, quando expostos às mesmas condições de cisalhamento. De maneira geral, todos os fluidos que não seguem a Lei de Newton são denominados fluidos não-Newtonianos.

Para fluidos não-Newtonianos como mostra a Figura 8 e o Fluxograma 1 abaixo a viscosidade agora chamada de viscosidade aparente ( $\mu_{ap}$ ), é definida pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. (MACOSKO, 1994).



**Figura 8:** Reograma dos diversos tipos de fluidos (1)- fluido newtoniano, (2)- fluido ou plástico de Bingham, (3)- fluido Pseudo-plástico e (4)- fluido dilatante. Fonte: BIRD, STEWART & LIGTHFOOT, 1960.



**Fluxograma 1:** Classificação do comportamento dos fluidos. Fonte: MACOSKO, 1994.

Para fluidos que seguem a “lei da potência” tem-se que a relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade não é linear, sendo a natureza dessa relação o critério utilizado para a classificação dos diversos tipos de fluidos (MACOSKO, 1994).

O modelo da Lei de Potência prediz o comportamento reológico da maioria dos fluidos, é dado pela Equação 6 (BRETAS E D’AVILA, 2000).

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

Onde:

- $K$  é o índice de consistência do fluido;

- $n$  é o índice de comportamento reológico do fluido.

Quando  $n < 1$ , o fluido é caracterizado como pseudoplástico, sendo que a maioria dos fluidos não newtonianos encontram-se nessa categoria. Quando  $n > 1$ , o fluido é denominado dilatante, quando  $n = 1$  o fluido é caracterizado como newtoniano e, nesse caso, o índice de consistência  $K$  é a própria viscosidade do fluido. Outro tipo comum de fluido não newtoniano independente do tempo é o fluido de Bingham. O modelo reológico que caracteriza esse fluido é apresentado pela Equação 7.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (7)$$

Onde:

$\tau_0$ : é a tensão inicial de cisalhamento de Bingham.

$\eta_p$ : é o coeficiente de rigidez ou viscosidade plástica.

Estes fluidos necessitam de uma tensão inicial mínima para escoarem, devido à estrutura tridimensional rígida que possuem. Sujeitos a tensões menores que  $\tau_0$ , eles comportam-se como sólidos. Atingida a tensão mínima, os fluidos de Bingham escoam similarmente aos fluidos newtonianos, apresentando uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade (MACOSKO, 1994).

Quando o sistema está em repouso este apresenta altas forças de interações intermoleculares, dando a substância um caráter sólido, que o impede de fluir, até que a força externa seja superior à força das interações, onde podemos observar o ponto de ruptura exemplos desse tipo de fluido são lamas de perfuração de poços de petróleo, graxa, massas cerâmicas, borrachas naturais, creme dental, alguns exemplos de fluidos alimentícios que representam esse comportamento são: molhos de tomate, maionese, clara de ovo batida e margarina (BOURNE, 1982).

### 3.8.1 Fluidos Não-Newtonianos Dependentes do Tempo

Existem ainda fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo, são eles os fluidos tixotrópicos e os reopéticos. Fluidos tixotrópicos são aqueles cuja viscosidade aparente diminui com o tempo de exposição a um dado gradiente de velocidade fixo. Já os fluidos reopéticos, quando sujeitos a um gradiente de velocidade constante, apresentam um aumento na sua viscosidade aparente (BRETAS E D'AVILA, 2000).

### 3.8.2 Fluidos Não-Newtonianos Independentes do Tempo

Os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, sob condições de temperatura e composição constantes, apresentam viscosidade aparente dependente somente da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento (RAO, 1977).

### 3.8.3 Fluidos Pseudoplásticos

São fluidos que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. Estes fluidos compõem a maioria dos fluidos não-newtonianos (SCHRAMM, 1998).

Este tipo de fluido demonstra um decréscimo na viscosidade com um aumento na tensão de cisalhamento, sendo que a taxa de cisalhamento versus a tensão de cisalhamento forma uma linha convexa (SHARMA *et al.*, 2000).

Esse tipo de comportamento pode ser causado por diversos fatores, dentre os quais as características físicas das partículas, como área superficial, formato, dimensões; o tipo de interação entre partículas; e a concentração, peso molecular e conformação de moléculas de dispersante presentes no meio líquido (PANDOLFELLI, 2000).

### 3.9 REOLOGIA DAS ARGAMASSAS

Pastas de cimentos podem ser caracterizadas como suspensões coloidais em que as interações entre as partículas que as constituem podem provocar o aparecimento de varias microestruturas (JARNY,2005). De acordo com a tensão de cisalhamento aplicada em conjunto com a taxa de deformação essas microestruturas podem apresentar diferentes comportamentos macroscópicos (COUSSOT, 1999).

De acordo com Chappuis e Tattersall (1991), os estudos reológicos das massas cimentícias possuem grande importância, pois na prática, a viscosidade plástica pode ter um papel importante, na determinação das varias características do material, essas características podem ser verificadas no período de indução da hidratação do cimento, no processo de bombeamento do produto até determinadas distâncias e também, na verificação da facilidade de aplicação e acabamento da superfície do substrato (Trabalhabilidade). Quando estudadas no estado fresco, o seu comportamento, tem sido caracterizado através do conceito chamado de trabalhabilidade, uma vez que as características reológicas desse tipo de fluido e de não-newtoniano o mesmo requer uma metodologia sistemática para a formulação de argamassas baseada em conceitos micro estruturais/reológico, isto é, que a definição de trabalhabilidade, seja transformada em grandeza reológica mensurável (PILEGGI, 2006).

Para Rago, (1999), concretos e argamassas podem ser considerados como sistema disperso composto por agregados, sendo que para concreto é usado o agregado graúdo e para argamassas o agregado miúdo, que estão inserido em uma matriz de partículas finas, chamada de pasta de aglomerante cimento + água, as suas características reológicas estão intimamente ligadas ao agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica), a pasta (características químicas, físicas e quantidades dos materiais constituintes e teor de água) e a interação pasta agregado.

O estudo reológico das argamassas está relacionado com a melhoria e facilidade de seu espalhamento e penetração nos poros dos substratos em que as mesmas são aplicadas, as argamassas devem apresentar características ótimas de viscosidade como tensão de escoamento ideal, para que a mesmas venham suportar o

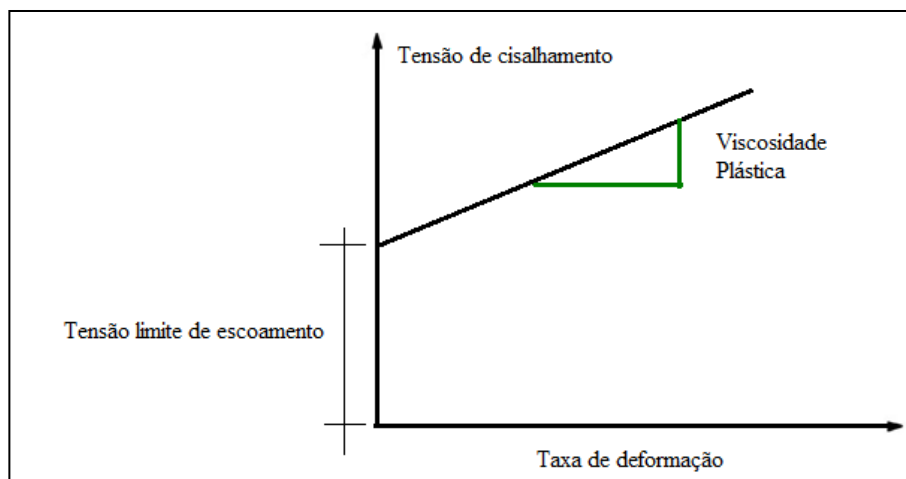
peso da placa cerâmica (lajota), além do seu próprio peso sem que ocorra escorregamento após a sua aplicação.

De uma maneira geral, as argamassas são constituídas principalmente de cimento, agregado miúdo e água, esse material pode ser caracterizado como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados miúdos), envolto em um líquido viscoso (pasta de cimento), considera-se também que a própria pasta de cimento não é um líquido homogêneo, pois estas possuem partículas em seu sistema (grão de cimento), envolto também em água, porém considera-se que de uma forma macroscópica que esse sistema flui como um líquido (FERRARIS, 1996; 1999).

Para Otsubo, (1980), o comportamento reológico das pastas cimentícias, é modificado de forma contínua de acordo com o tempo, em que os modelos reológicos mais comuns são o modelo de Bingham e Herschel- Bulckley, seguidos por Casson e Ellis.

Segundo Roussel e Le Roy, (2005), considerando-se as pastas de cimento no estado fresco, diversos modelos empíricos e teóricos tem sido propostos para descrever o comportamento reológico desse material, entretanto varios autores ressaltam que os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley, são os que mais representativos modelos de escoamento desse material, pois os mesmos levam em consideração o comportamento pseudoplástico dessas suspensões concentradas. Se no caso a suspensão apresentar uma tensão limite de escoamento pequeno, o modelo Bingham, será o suficiente para descrever o comportamento da pasta no estado fresco, dependendo do teor de água que compõe a suspensão, o comportamento do material pode ser do tipo viscoplástico, com pseudoplasticidade ou dilatação.

De acordo com Tattersall (1991), apesar de já terem sido feitos diversos testes em argamassas e concretos utilizando vários modelos reológicos, a literatura é bem clara quanto ao modelo que melhor descreve o comportamento das pastas cerâmicas ao longo de sua fase no estado fresco. O modelo que melhor representa e o modelo de Bingham, que é representado pela Figura 9.



**Figura 9:** Curva de escoamento para um fluido de Bingham

Fonte: FERRARIS, 1996.

A tensão limite de escoamento é a tensão necessária para que um material no estado fluido inicie o seu escoamento, ou seja, é a tensão mínima para que se inicie o movimento. Para um fluido que tenha características do modelo de Bingham, a viscosidade plástica é definida por uma diferença entre a tensão limite de escoamento e a tensão de escoamento, dividida pela taxa de cisalhamento.

A explicação para o comportamento de um fluido binghamiano é que o fluido, em repouso, contém uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir qualquer tensão inferior à tensão de escoamento. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido newtoniano sob uma determinada tensão de cisalhamento. Quando a tensão de cisalhamento que age sobre o sistema for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada (TANNER, 1988).

Matematicamente a maioria das equações usadas para explicar os modelos reológicos de sistemas particulados sólido/fluido, tenta fazer uma relação da concentração das partículas que estão em suspensão com a viscosidade, e a tensão de cisalhamento ou taxa de cisalhamento, assumindo que a viscosidade apresenta apenas um valor para o sistema que está sendo estudado (argamassa). A reologia das pastas cimentícias (concretos e argamassas) é bastante complexo devido diversos fatores como, a composição e as mudanças estruturais devido às reações químicas que ocorrem.



Diversos pesquisadores descreveram esses sistemas como fluidos não newtonianos complexos que possuem uma tensão limite de escoamento e uma viscosidade que depende da taxa de cisalhamento, sendo que ambos variam com o tempo a medida que endurece, a tensão limite de escoamento e a viscosidade plástica aumentam.

Para Pileggi (2006), as argamassas apresentam um comportamento de fluido não newtoniano (pseudoplástico), e exibem uma viscosidade que varia com a tensão aplicada, e só há deformação significativa a partir de uma tensão crítica. As pastas de cimento (água+cimento) apresentam propriedades reológicas bastante ajustáveis ao modelo reológico de Hershel-Bulkley, desde que sejam respeitados certos limites de proporção água/cimento.

Segundo Hu e Larrard (1995), as argamassas no estado fluido são suspensões reativas, cuja consistência é modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento.

A Tabela 2 apresenta os modelos reológicos aplicados às pastas cerâmicas (argamassa) (PETROU, 2000).

**Tabela 2:** Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento, que descreve o comportamento do escoamento de pastas cerâmicas (argamassa).

Modelo	Equação
Newton	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \kappa \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + \kappa \dot{\gamma}^n$
Lei das Potencias	$\tau = \Lambda \cdot \dot{\gamma}^n$ n=1, para fluido newtoniano n>1, para fluido dilatante n<1, para fluido pseudoplástico
Vom Berg. Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \cdot \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring	$\tau = a \cdot \dot{\gamma} + B \cdot \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a \cdot (\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni et al.	$\dot{\gamma} = \alpha \cdot \tau^2 + \beta \cdot \tau + \delta$
<b>Definição das variáveis:</b> $\tau$ = Tensão de cisalhamento; $\tau_0$ = Tensão de escoamento; $\dot{\gamma}$ = Taxa de cisalhamento; $\Lambda, a, B, b, C, \kappa, \alpha, \beta, \delta$ = constantes	

Fonte: FERRARIS, 1999

### **3.10. INFLUENCIA DE PARÂMETROS NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

#### 3.10.1 Morfologia das partículas

A forma e a distribuição granulométrica das partículas desenvolvem uma forte influência na reologia de materiais cimentícios no estado fresco, essa relação é estabelecida devido à ocorrência direta entre a fluidez e a granulometria do material (REIS, 2008).

Segundo Bonen e Sarkar (1995), a fluidez inicial de sistemas particulados tipo sólido/fluido, com concentrações de elevadas de sólidos depende de características físicas que são íntimas do sistema que as constituem, tais como: distribuição granulométrica, fator de forma e textura superficial da partícula.

Devido os agregados inertes constituírem cerca de 70 a 80% do volume das argamassas, torna-se fácil compreender que suas características e qualidades seja importante nas suas propriedades intrínsecas, de modo que qualquer variação na sua qualidade implica um considerável efeito resultante na argamassa.(HEWLETT, 2001).

O empacotamento é definido como a máxima capacidade de uma mistura, cuja separação é difícil devido estarem em diferentes classes granulométricas um exemplo disso é a mistura de grãos de cimento e grãos sílica ativa (FORMAGINI, 2005).

O empacotamento das partículas pode ser alterado por diversos tipos de fatores, entre esses fatores destacam-se: a existência de diversas distribuições granulométricas que podem de forma geral, alterar a condição de dispersão inicial das partículas, a porosidade das partículas e o tamanho das mesmas, entre outros.

No que se refere ao fator de porosidade interna, as partículas podem apresentar duas características distintas, podem ser totalmente densas apresentando porosidade interna fechada ou porosidade aberta. Para o efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade interna fechada são semelhantes as densas, mais resultam em misturas com densidade menor. As partículas

que apresentam porosidade aberta influenciam de forma negativa no empacotamento devido as mesmas apresentarem o formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades, empacotamento com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos com partículas menores que os mesmos (PANDOLFELLI, 2000).

Devido os vários tipos de interações que ocorrem entre as partículas de cimento, agregado e água este sistema possui grande tendência a flocular, por diversos tipos de interações que ocorre entre eles, dentre as interações pode-se destacar as forças de Van der Waals entre as partículas e forças de origem eletrostática que ocorrem entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação, envolvendo as moléculas de água ou hidratos (AÏTCIN *et al.* 1994). Geralmente as forças responsáveis pelas interações entre as partículas que constituem as massas cimentícias são bastante fracas e por consequência se quebram facilmente por cisalhamento, assim a tensão de cisalhamento aplicada ao sistema promove a quebra do conjunto floculado de maneira que o sistema inicie o escoamento, normalmente essa quebra não é completa e a medida que se aumenta a taxa de cisalhamento essa estrutura remanescente que ainda esta floculada é quebrada de maneira progressiva, levando a um comportamento pseudoplástico geralmente acompanhado de tixotropia (STRUBLE *et al.* 1998).

A eliminação dos flocos de partículas formados pode resultar em uma série de desvantagens com relação à reologia das suspensões. Pandolfelli *et al.* (2000), cita que, foi verificado que a redução da distancia de separação entre as partículas finas, provocadas pelo aprisionamento de água no interior dos aglomerados, eleva o número de colisões entre elas e, com isso, a viscosidade da suspensão.

De acordo com Pandolfelli (2000), existem três mecanismos básicos de interações entre nas partículas são eles:

- Eletrostático: ocorre entre as partículas apresentam diferentes potenciais de cargas de sinais opostos que ocasionam a atração eletrostática e adesão entre as mesmas.
- Estérico: ocorre quando é adicionado um aditivo químico nas formulações, a adsorção superficial de um polímero de cadeia longa à superfície

faz com que ocorra uma dificuldade mecânica de aproximação entre as partículas das argamassas.

– Eletroestérico: ocorre adsorção específica de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos nas superfícies das partículas, no qual os íons provenientes da dissociação desses grupos ionizáveis somam uma barreira eletrostática ao efeito estérico.

### 3.10.2 Influência da adição de agregados na reologia das Argamassas

Em se tratando de materiais cimentícios argamassas e concretos os seus comportamentos reológicos são extremamente dependentes de seus constituintes (agregados graúdos e miúdos as proporções que constituem suas misturas. Segundo Castro, (2007) um estudo da natureza das mudanças que ocorrem na mistura pode fornecer informações que indicam o fator responsável por elas, um desses fatores é a tensão de escoamento que está relacionada com a capacidade de escoamento do material, no caso de uma tensão de escoamento baixa o material cimentício no estado fluido escoar sob seu peso próprio. O autor ainda afirma que a viscosidade está relacionada com a segregação dos materiais. No entanto esse material precisa ter suas propriedades de acordo com as necessidades de uso no campo, e são os materiais constituintes que vão proporcionar estas propriedades aos concretos e argamassas.

Aïtcin (2000), trabalhando as características do escoamento de concretos, afirma que suas propriedades reológicas são governadas por fatores físicos e químicos. E dentre os fatores físicos estão a granulometria e a forma dos agregados. É sabido que o formato dos agregados influencia na trabalhabilidade do concreto e que a granulometria influencia na porosidade e esqueleto granular do material no estado endurecido.

De acordo com os estudos de (Struble 1998), onde foi adicionado agregado à pasta de cimento, foi observado um aumento tanto na viscosidade plástica quanto na tensão de escoamento desta mistura. Porém, esse mesmo estudo mostra que ambos os parâmetros são reduzidos quando a granulometria do agregado se torna mais densa. As adições químicas têm efeito muito grande sobre as propriedades do concreto.

Tattersall e Banfill (1983) dividiram em dois grupos: plastificantes super plastificantes, que possuem um efeito predominante sobre a tensão de escoamento do material e os agentes incorporadores de ar, cuja influência principal se dá sobre a viscosidade plástica do concreto.

Os resultados mostraram que a adições do primeiro grupo interagem com as partículas de cimento, introduzindo uma camada de adsorção que evita a aproximação entre elas por meio de uma combinação de repulsões eletrostática e estérica, enfraquecendo a estrutura que pode se formar quando a mistura permanece em repouso e, conseqüentemente, reduzindo a tensão de escoamento do material. Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade plástica, porém isso depende da distribuição granulométrica global da mistura. As adições do segundo grupo introduzem bolhas de ar esféricas na mistura de concreto que agem como esferas rolantes para permitir que as partículas maiores escoem mais facilmente sobre as demais partículas. Assim, essas bolhas de ar têm uma maior influência sobre a viscosidade plástica do que sobre a resistência da estrutura formada quando o material é deixado em repouso (CASTRO, 2007).

A sílica ativa que um resíduo oriundo das indústrias de ferro-ligas e silício metálico, cuja suas propriedades químicas (teor de  $\text{SiO}_2 > 85\%$ ) e físicas (superfície específica média de  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ ), é usada na otimização dos materiais cimentícios, pelo fato de ela ser muito fina com os grãos esféricos, alguns trabalhos comparam os efeitos das adições desse mineral, com pasta de cimento padrão com e sem adição da sílica (PARK, 2005 e BANFILL, 1987).

As principais vantagens do uso da sílica ativa é que quando as minúsculas partículas esféricas estão bem dispersas no sistema cimento-água, elas podem deslocar moléculas de água da vizinhança dos grãos de cimento, dessa forma moléculas de água presas entre partículas de cimento floculadas podem ser liberadas e assim contribuir para fluidificar a mistura. Isto provoca um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica do concreto (BACHE, 1981).

Porém, a substituição de parte do cimento por uma adição mineral também pode resultar em uma redução de ambos os parâmetros reológicos do concreto. A

granulometria melhorada do aglomerante e o efeito lubrificante concedido pelas pequenas partículas de sílica possivelmente reduzem o atrito entre os agregados e, conseqüentemente, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do material (NEHDI, MINDESS e AİTCIN (1998); ZHANG e HAN (2000)).

A incorporação de sílica ativa em substituição ao cimento até um determinado valor limite que depende do teor de cimento e que diminui com a redução do teor de água reduz a viscosidade plástica em até 50%; a tensão de escoamento é praticamente constante até que o valor limite para substituição de cimento por sílica ativa seja alcançado e, a partir daí, ela aumenta consideravelmente. (WALLEVIK, 1990).

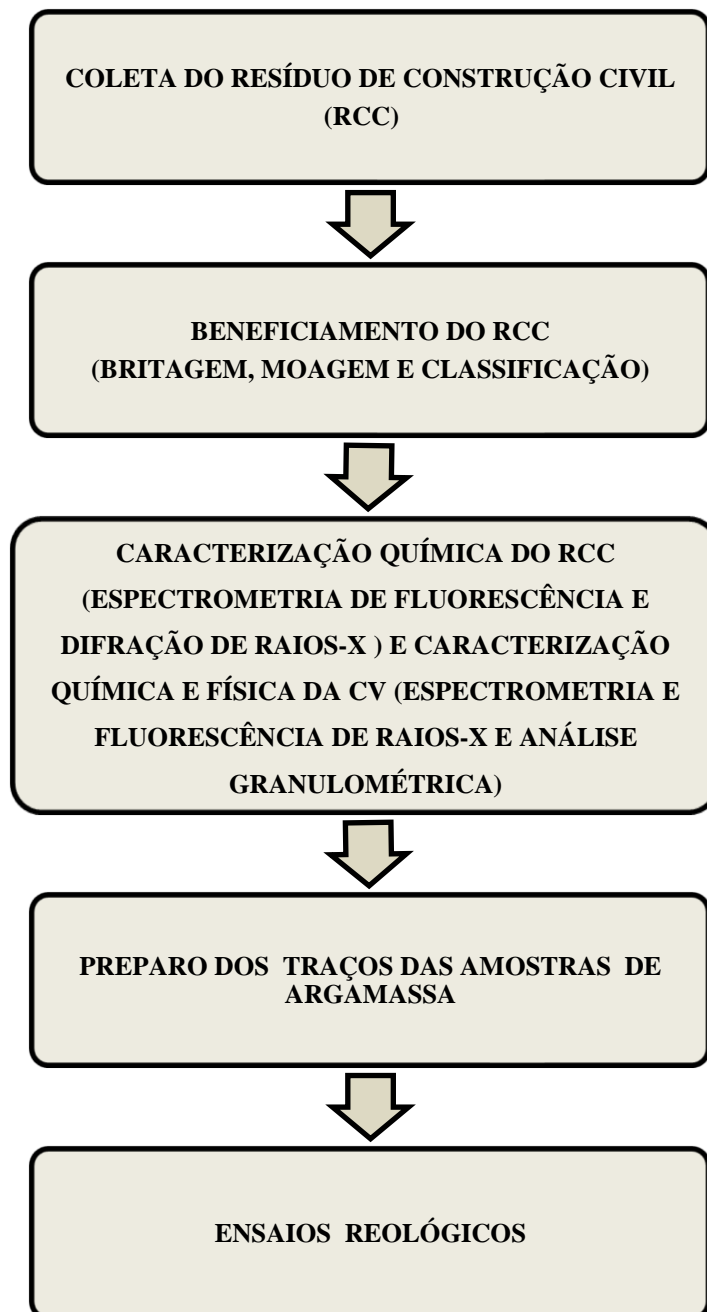
## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 MATERIAIS**

Para o desenvolvimento do trabalho experimental, os materiais utilizados foram: Resíduo de Construção Civil (RCC) bruto, coletado na Universidade Federal do Pará; Cinzas Volantes (CV) produzidas a partir da queima do carvão mineral e cimento Portland composto tipo (CPII Z 32). A pesquisa foi dividida em duas etapas.

A) A primeira fase constitui da coleta e beneficiamento do RCC em seguida a caracterização química (fluorescência e difração de raios-X), para CV caracterização química (fluorescência de raios-X) e caracterização física (classificação por peneiramento).

B) A segunda fase constitui da elaboração dos traços das argamassas para os ensaios reológicos conforme descrito no fluxograma 2 abaixo.



**Fluxograma 2:** Fluxograma Experimental.



#### 4.1.1 Beneficiamento do RCC

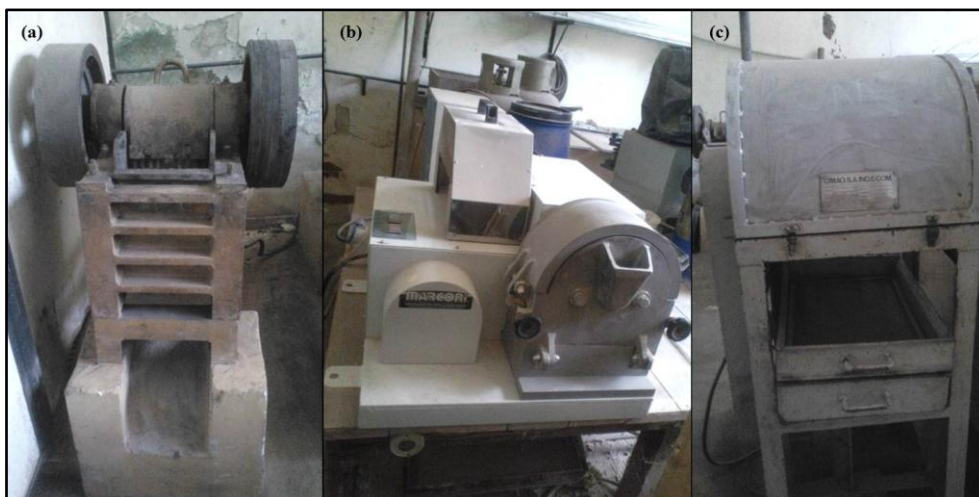
A amostra de RCC, matéria prima que constitui a parte do agregado miúdo da argamassa foi coletada no campus universitário de Belém-Pa, da Universidade Federal do Pará (UFPA), o produto adquirido foi proveniente da reforma do laboratório de Engenharia Química (LEQ), como mostra a Figura 10.



**Figura 10:** Rejeito da Construção Civil (RCC).

A amostra coletada passou por um processo de separação manual de materiais indesejáveis de resíduos inorgânicos (metais, elementos graúdos de seixo e tijolos quebrados), e resíduos orgânicos (resto de madeira, papel e sacos plásticos). Todos os materiais que passaram pelo processo de separação (alvenaria e reboco), em seguida o material foi conduzido à usina de materiais (USIMAT) para ser britado, moído e classificado de acordo com a metodologia prescrita segundo a norma ABNT NBR 7211 e ABNT NBR 7217, na etapa de cominuição (britagem e moagem) foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 11):

- a) Britador de mandíbulas Briterpa (Modelo 1020 – Série 08)
- b) Moinho de disco: Marca MARCONI Modelo MA700 série (100690037).
- c) Moinho de bolas: Marca CIMAQ Modelo Work Index série (005) .



**Figura 11:** (a) britador de mandíbulas; (b) moinho de disco e (c) moinho de bolas (USIMAT – LEQ/UFPa). Fonte: FERREIRA, 2014.

Após as etapas de cominuição o RCC foi classificado pela operação de peneiramento (Figura 12) nas peneiras ABNT  $\frac{3}{4}$  (19,1 mm). O resíduo passante da peneira de 100# (150  $\mu\text{m}$ ) foi separado para posteriormente ser utilizado na elaboração dos traços das argamassas.



**Figura 12:** Peneiras granulométricas (USIMAT – LEQ/UFPa) Fonte: FERREIRA, 2014.

#### 4.1.2 Caracterização química do RCC

A caracterização química do (RCC), foi feita através de duas análises químicas as quais são: espectrometria de fluorescência de raios-X e difração de raios-X realizadas no laboratório de caracterização mineral raios-X (LCM).

##### 4.1.2.1 Espectrometria de fluorescência de raios-X

A análise de espectrometria de fluorescência de raios-X foi realizada no espectrômetro WDS seqüencial, modelo AxiosMinerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio(Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW.

A amostra foi analisada em dois modos de preparação:

- a) Disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (Tetraborato de lítio –  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), mistura fundida a 1000 °C por 10 min.
- b) Pastilha prensada: 3 g de amostra + 0,9 g de aglomerante (cera de parafina), mistura prensada com uma carga de 20 toneladas.

As aquisições e tratamento de dados foram realizados através do software SuperQ Manager da PANalytical.

##### 4.1.2.2 Difração de raios-X (DRX)

A análise de DRX foi realizada no difratômetro de raios-X do modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60( $\theta$ - $\theta$ ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Celerator RTMS (Real Time Multiple Scanning) no modo scanning e com activelength 2,122°. Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura 4° a 75° 2 $\theta$ , 40 kV, 30 mA, passo 0,02° em 2 $\theta$  e tempo/passo de 20 s, fenda fixa 1/4° e anti-espalhamento 1/2°, máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps.

#### 4.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi classificado como tipo CP II – E 32, conforme a norma NBR11578/1991. A principal escolha desse material foi por ser um

cimento com poucas adições de pozolanas, de modo que fosse elaborado um traço de referencia constituído somente de cimento e rejeito para as futuras comparações com os demais traços que tivessem uma variação da porcentagem de CV.

#### 4.1.2 Cinza Volante (CV)

A CV utilizada neste trabalho foi proveniente da refinaria de alumina Norsk Hydro SA, localizada no município de Barcarena-Pa, como mostra a figura 13. Para sua caracterização utilizou-se a metodologia descrita no trabalho de Tancredi (2006).

Onde foi caracterizada quimicamente através da espectrofotometria de raios -X realizada no laboratório de caracterização mineral (LCM) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará e fisicamente na Usina de Materiais (USIMAT) da Engenharia Química/UFGPA, através da análise granulométrica por via úmida de acordo com a norma NBR 13237/2006, para a verificação se há necessidade prévia de tratamento para ser utilizada como pozolona.



**Figura 13:** Cinza Volante (CV).

#### 4.4.3. Preparo das Amostras

Os traços foram estabelecidos obedecendo aos seguintes critérios, seguiram a proporção de dosagem de materiais de acordo com a tabela 3.

Neste trabalho optou-se a não utilização de argamassa comercializada no mercado, haja vista o foco principal é a substituição parcial do cimento Portland em substituição a CV, em conjunto com o RCC.

Foram realizados seis tipos de traços diferentes sendo que em cada traço posterior aumentava-se o teor de CV, e diminuía-se o teor de RCC, sendo que a quantidade de cimento Portland mantinha-se fixa ao longo das misturas.

Foi elaborada uma relação água aglomerante (a/ag) de 0,35 sendo que este valor foi definido a partir, de estudos de literatura, sendo adaptado de modo experimental de acordo com o tempo de trabalho, determinado pelos efeitos de cura do material, obedecendo as limitações de ensaio do viscosímetro, em que 35% de H<sub>2</sub>O refere-se ao valor total de 100% de mistura (RCC, cimento e CV). Sendo 65% de sólidos da mistura.

**Tabela 3:** Proporção dos materiais usados nos traços.

<b>MATRIZ DE ANALISE</b>				
Denominação	Rejeito (%)	Cimento (%)	Cinza (%)	H <sub>2</sub> O (%)
traço 1	95	5	0	35
traço 2	90	5	5	35
traço 3	85	5	10	35
traço 4	80	5	15	35
traço 5	75	5	20	35
traço 6	70	5	25	35

Todas as amostras analisadas foram dosadas em um misturador mecânico marca SOLDTEST Figura 14, durante cinco minutos a água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da UFPA, para a completa homogeneização do material em seguida, foram separadas as alíquotas de 40 ml, para a realização das análises reológicas.



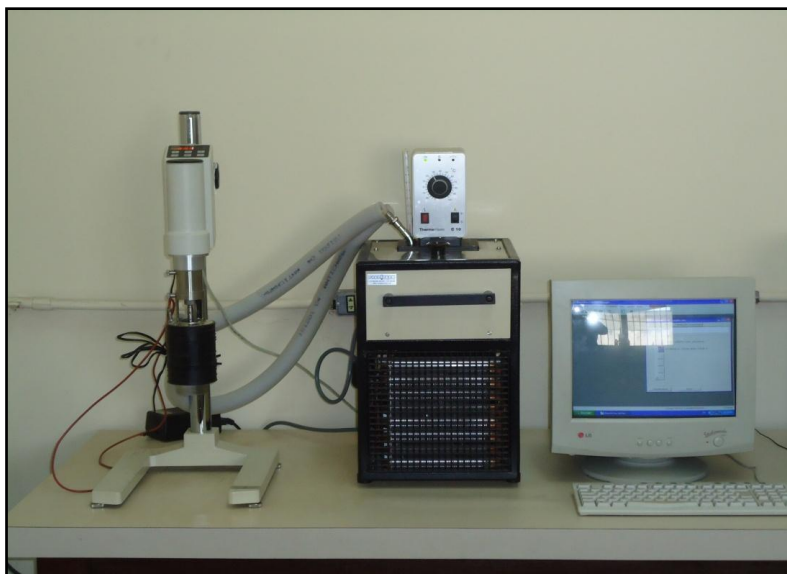
**Figura 14:** Misturador mecânico de movimento planetário, marca SOLDTEST com capacidade de 130 Litros.

#### 4.4.4 Análises Reológica

Para a realização dos ensaios reológicos utilizou-se o viscosímetro VT 550 que possui um sistema de cilindro coaxial do tipo  $SV_1$ (spindle) que é o acessório com o qual se realiza os testes de cisalhamento, a sua escolha é feita de acordo com a faixa de viscosidade no qual o equipamento apresenta isto é escolhe-se o dispositivo cuja faixa abranja a viscosidade aproximada do material que é ensaiado.

A Figura 15 e a figura 16 correspondem ao viscosímetro VT550 e o spindle  $SV_1$  utilizado para obtenção dos valores experimentais.





**Figura 15:** Viscosímetro rotacional modelo Haake VT 550



**Figura 16:** Conjunto cilindro coaxial copo SV e Spindle SV1.

A tabela 4 apresenta a metodologia de rampa controlada (RC), em que programou-se no software do viscosímetro (Reowin 2.94), uma taxa de cisalhamento de  $53,4s^{-1}$  em um tempo total de 1h e 45min em intervalos de 15min para a elaboração da curva Torque versus tempo.

**Tabela 4:** Programação para a elaboração das curvas Torque vs Tempo.

Programação:	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	Sensor: SV <sub>1</sub> PROGRAMAÇÃO - RAMPA CONTROLADA (RC)
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 0.00 1/s, t 900.00 s, #100, T 28.00 °C	
RC , 53.40 1/s, t 5.00 s, #100, T 28.00 °C	

Fonte: Programa Reowin. 2.94

Para a obtenção das curvas de fluxo utilizou-se taxas de 0 a 600 s<sup>-1</sup>, no tempo de 120 seg, todas as análise reológicas foram realizadas a temperatura de 28 °C .

A programação para das análises de curva de histerese seguiu-se a metodologia referenciada por (SILVA, 2011) adaptada.

- (I) Rampa de aumento de taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) de 0 a 600 s<sup>-1</sup> em 120 s;
- (II) Permanência a 600 s<sup>-1</sup> por 30 s;
- (III) Rampa de diminuição de taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) de 600 a 0 s<sup>-1</sup> em 120 s.

#### 4.4.5 Calibração

Para a confiabilidade das respostas das análises, surge a necessidade de verificar a confiabilidade do aparelho, para isso é necessário à realização da sua calibração, como fluido de calibração OP 400.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA (RCC)

#### 5.1.1 Espectrofotometria de fluorescência de raios-X

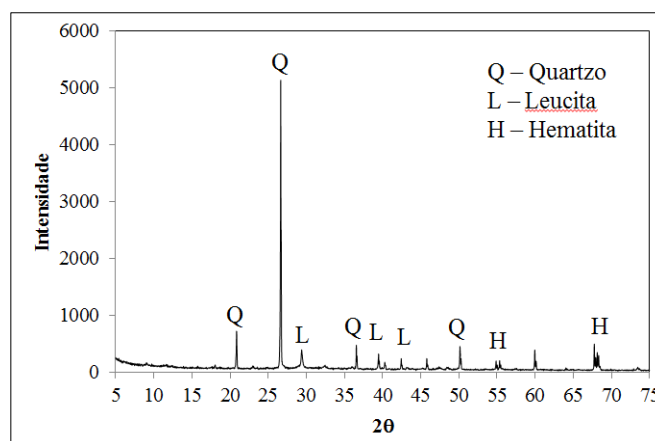
A Tabela 5 mostra que o resíduo de construção civil é composto, em sua maioria, por óxidos de silício, e em sua minoria óxidos de alumínio, ferro e potássio o que caracteriza um agregado miúdo para produção de argamassa.

**Tabela 5:** Fluorescência de raios-X.

REJEITO DE CONSTRUÇÃO CIVIL	
Componente	Concentração. (%)
SiO <sub>2</sub>	93,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32
K <sub>2</sub> O	0,19
Perda ao fogo	5,49

#### 5.1.2 Difração de raios –X

De acordo com a tabela 6, observa-se que a composição química do RCC é composta principalmente por Oxido de silício (SiO<sub>2</sub>), Leucita (KAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) e Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A origem desses compostos presentes na composição está associada aos diversos tipos de silicatos, provenientes dos materiais coletados, haja vista que em sua maioria o RCC era composto de materiais como reboco, agregados naturais e uma pequena quantidade de cerâmica vermelha proveniente de tijolos fraturados e que foram misturados ao reboco durante a demolição, o que se tornou inviável a sua separação.



**Figura 17:** Difração de raios –X do resíduo de construção civil.

**Tabela 6:** Composição mineral do RCC.

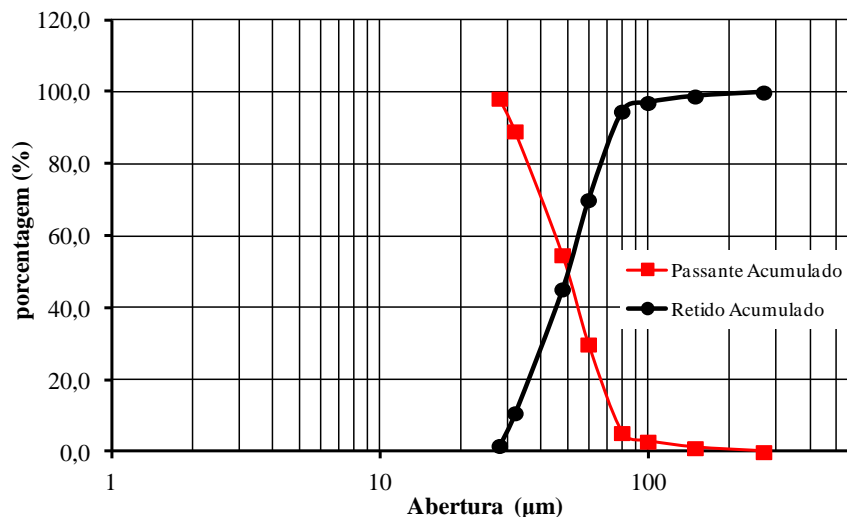
<b>MINERAIS</b>	<b>COMPOSIÇÃO</b>
Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Leucita	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### 5.1.3 Análise granulométrica do RCC

A Tabela 7 e a Figura 18 apresentam os resultados obtidos na análise granulométrica do RCC, esses valores encontram-se na faixa de 4,8 mm e 0,075 mm o que permite enquadrar como um agregado miúdo. Verifica-se que essas propriedades são essenciais para a vida útil das obras em que são utilizadas, . De acordo com a norma antiga NBR 7211, pode-se classificar os agregados miúdos reciclados e naturais como areia média. A correção da granulometria do agregado miúdo RCC, foi feito através de peneiramento, em que o material utilizado foi o passante na malha de 100#, a fim de ter mesma distribuição nas misturas que foram estudadas.

**Tabela 7:** Análise Granulométrica do Rejeito da Construção Civil(RCC).

<b>Série Tyler (#)</b>	<b>Abertura (µm)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Massa Retida (%)</b>	<b>Passante Acumulado(%)</b>	<b>Retido Acumulado(%)</b>
28	595	17,6	17,6	98,2	1,8
32	500	90,8	108,4	89,16	10,8
48	297	344,1	452,5	54,75	45,3
60	250	248	700,5	29,95	70,1
80	177	246	946,5	5,35	94,7
100	149	24	970,5	2,95	97,1
150	100	18	988,5	1,15	98,9
270	53	11	999,5	0,05	100,0
>270	>53	0,5	1000		



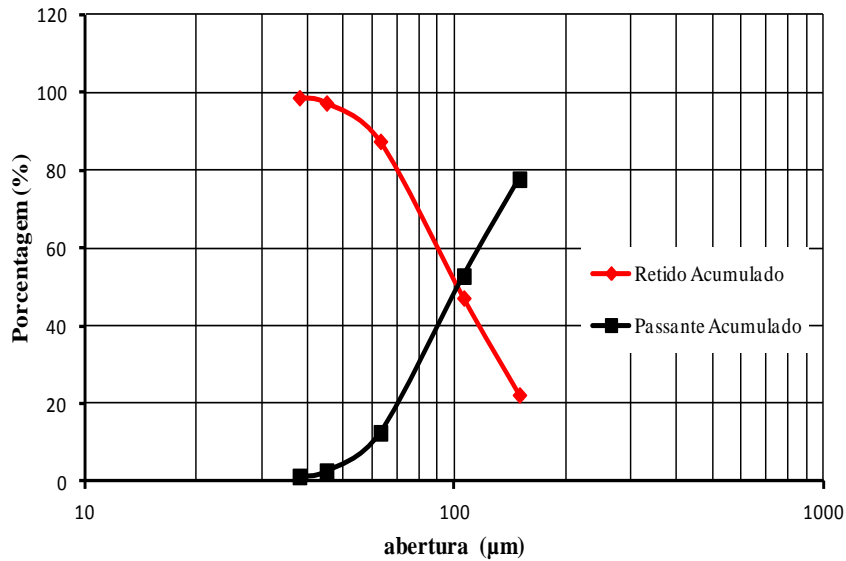
**Figura 18:** Análise granulométrica Rejeito de construção civil (RCC).

#### 5.1.4 Análise granulométrica da CV

Os resultados das análises granulométricas das CV, apresentados na Tabela 9 e Figura 19, mostram que de uma forma geral, as amostras de CV são bastante finas, apresentando em sua maioria partículas com tamanho médio de 0,0804 mm, apresentando um  $D_{50}$  de 100 $\mu$ m, o que indica que elas podem ser usadas para o preparo das argamassas, neste caso a CV, não requer um tratamento prévio para ser usado nas elaborações das argamassas. Apesar de não haver acordo quanto à forma mais eficaz de aferir a finura das cinzas volantes, é consensual que maiores finuras conduzem a maior atividade pozolânica. Como a maioria das reações químicas ocorre mais rapidamente com o aumento da finura das partículas é esperado que a atividade pozolânica de uma cinza volante seja dependente da área disponível para reação.

**Tabela 8:** Análise Granulométrica da Cinza Volante(CV).

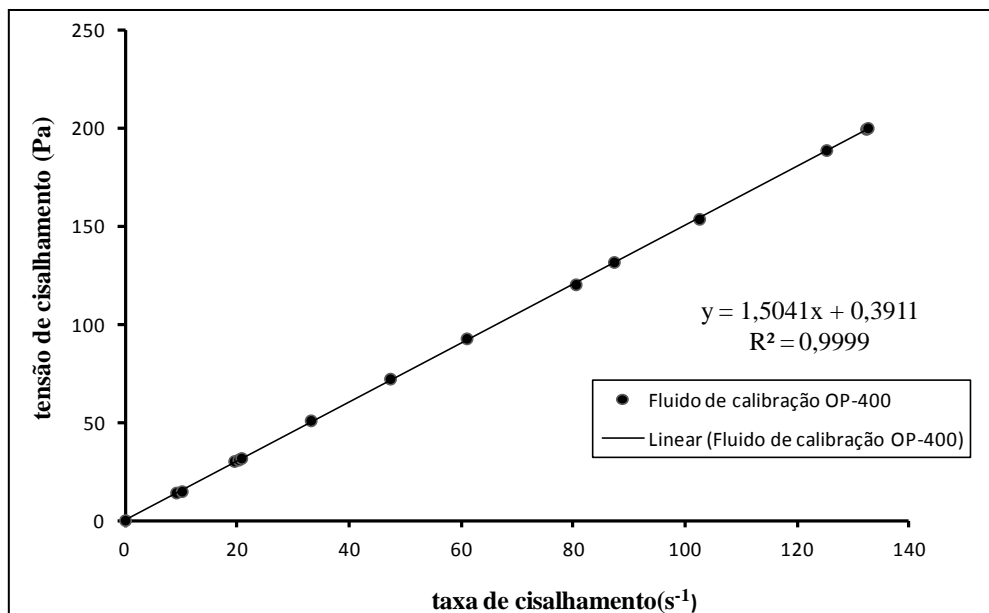
Série# (Tyler)	Abertura ( $\mu$ m)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Retido Acumulada(%)	Passante Acumulada(%)
100	150	22,27	22,27	22,27	77,73
140	106	24,91	24,91	47,18	52,82
230	63	40,29	40,29	87,47	12,53
325	45	9,86	9,86	97,33	2,67
400	38	1,36	1,36	98,69	1,31
>400	>38				



**Figura 19:** Análise granulométrica da cinza volante

## 5.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES REOLÓGICAS

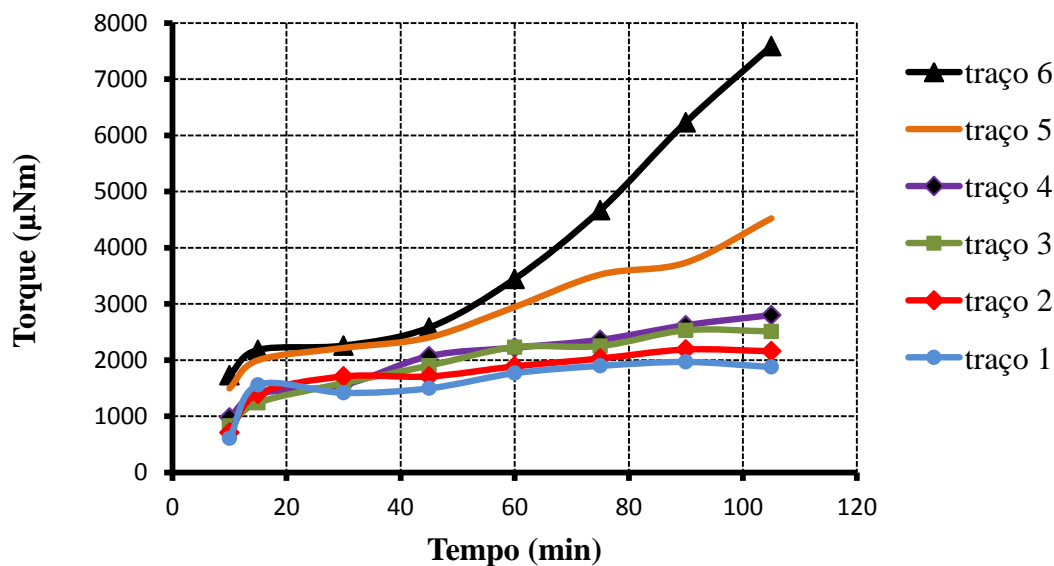
Os resultados da calibração do equipamento mostrados no gráfico da figura 20 para a OP 400 em que o fluido de calibração ajustou-se ao modelo newtoniano proposto, assegurando a calibração do viscosímetro usado nos experimentos.



**Figura 20:** Modelo newtoniano para fluido de calibração OP 400.

De acordo com a Figura 21 as formulações das argamassas apresentadas neste trabalho mostram um crescente aumento do torque de acordo com o tempo de execução dos ensaios, sendo este aumento pouco evidenciado no traço 1 com composição de 0% de CV e 95% de RCC, este comportamento é mais pronunciado à medida que se adiciona de forma crescente CV aos traços posteriores, sendo observado um torque máximo no traço 6 com 25% de CV e 70% de RCC.

Observou-se que uma das possíveis causas do aumento do torque em relação ao tempo de ensaio é da absorção de água devido o aumento do teor de CV nas misturas e a diminuição do RCC em que, esta associação leva à formação de estruturas tridimensionais tendo como consequência redução de água no sistema, devido a CV e o RCC possuírem granulometrias com presença de bastante finos (< 325#) e, além disso, por está em maior quantidade a CV eleva a atividade atividade pozôlanica da mistura, o que acarretara no aumento da absorção de água pelo sistema com formação de uma cadeia cristalina de produtos hidratados (CRIADO, 2009), tendo como consequência a o aumento do torque na cura do material, melhorando o fator de trabalhabilidade da argamassa.



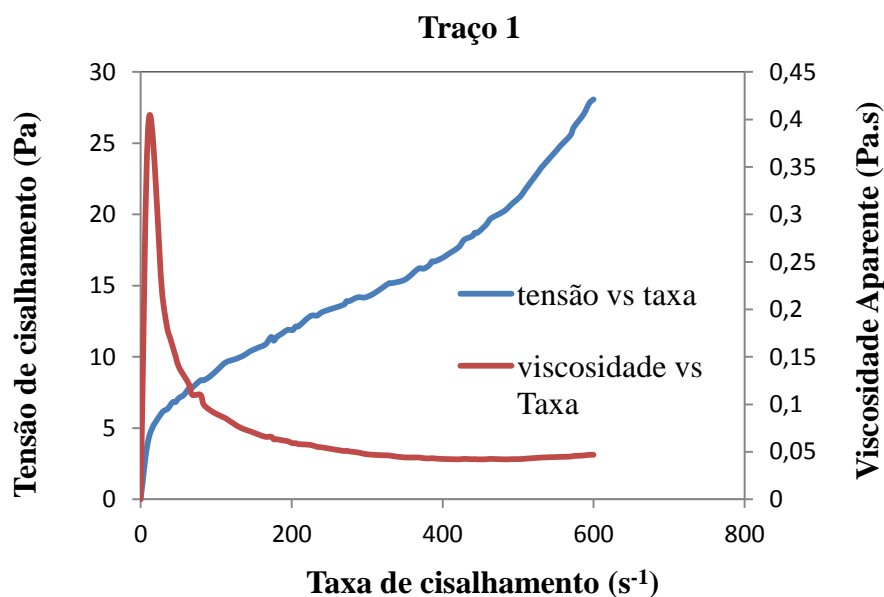
**Figura 21:** Análises reológicas (torque versus tempo) para cada traço.

As Figuras 22 e 23, mostram os resultados obtidos experimentalmente comparando as formulações dos traços das argamassas dos traços 1 e traço 6 em relação ao comportamento das curvas de fluxo tensão versus taxa de cisalhamento e viscosidade

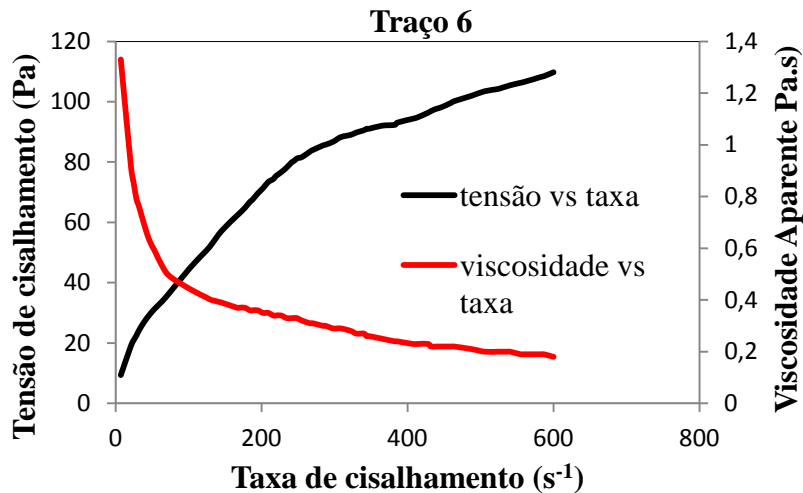
versus taxa de cisalhamento. Observou-se que os traços possuem em comum o comportamento de fluidos não-newtonianos dependentes do tempo.

Estudos de literatura mostram que sistemas constituído por partículas sólidas em suspensão, dependendo do teor de material incorporado apresentam características de fluidos não-newtonianos dependentes do tempo, podendo apresentar características Reópticas ou Tixotrópicas (SANTOS, 1989), com a diminuição da viscosidade conforme o aumento da taxa de cisalhamento (SCHARAMM, 2006).

Outro fator observado foi que as curvas reológicas do traço 1 possuem menores valores em relação ao traço 6, a justificativa para essa mudança é que aglomerantes como a CV e outros tipos de aglomerantes como a cal e outros tipos de cinza, estão em grandes concentrações suas características pozôlanica são mais acentuadas, provocando mudanças no comportamento reológico do material.



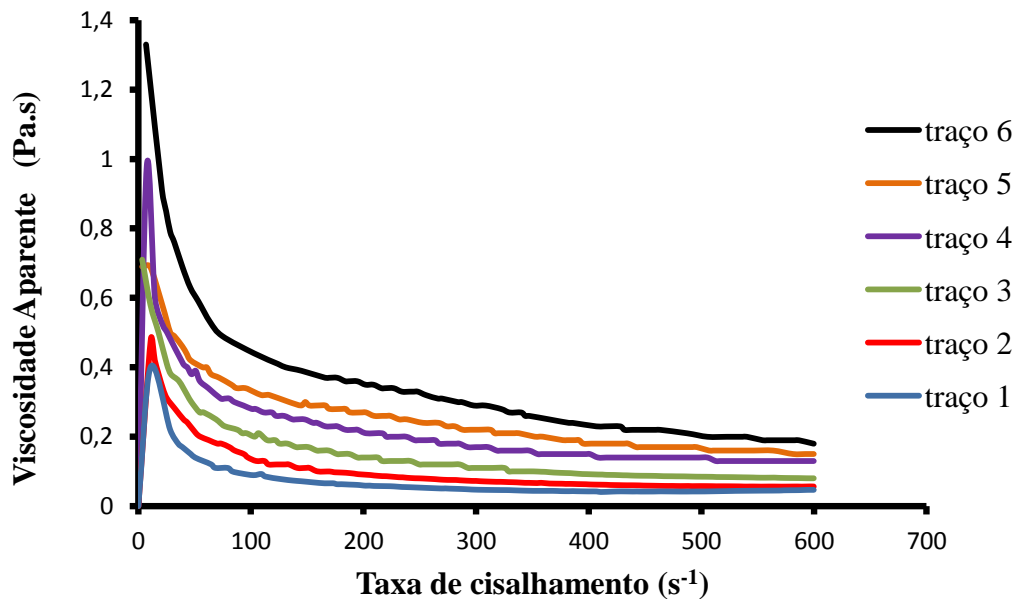
**Figura 22:** Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para o Traço 1 com 0% de CV.



**Figura 23:** Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para Traço 6 com 25% de CV.

A Figura 24 apresenta um crescente aumento da viscosidade, como se observa do traço 1 ao 6 em que apresenta a viscosidade mais elevada em relação aos outros traços ensaiados. Neste caso a contribuição do RCC (70%) em conjunto com a CV (25%) e o teor de água incorporado nos traços (35%), foi um fator que contribuiu para o aumento da viscosidade aparente, pois partículas finas e assimétricas quando se encontram hidratadas fazem surgir forças de atração entre si favorecendo a formação de aglomerados que aumentam a viscosidade aparente da suspensão (OLIVEIRA, 2000).

Esse fato é explicado devido a CV quando inserida de forma gradual nas composições das argamassas sua característica pozolânica, torna-se mais acentuada, nos traços com maior concentração. A propriedade pozolânica, da cinza é devido a presença de compostos siliciosos ou sílico-aluminosos, que apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, porém quando na presença de água ficam disponíveis a reagirem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, produzindo através da reação química compostos com propriedades aglomerantes, aumentando assim a tensão de cisalhamento (JOSHI e LOHTIA, 1997).

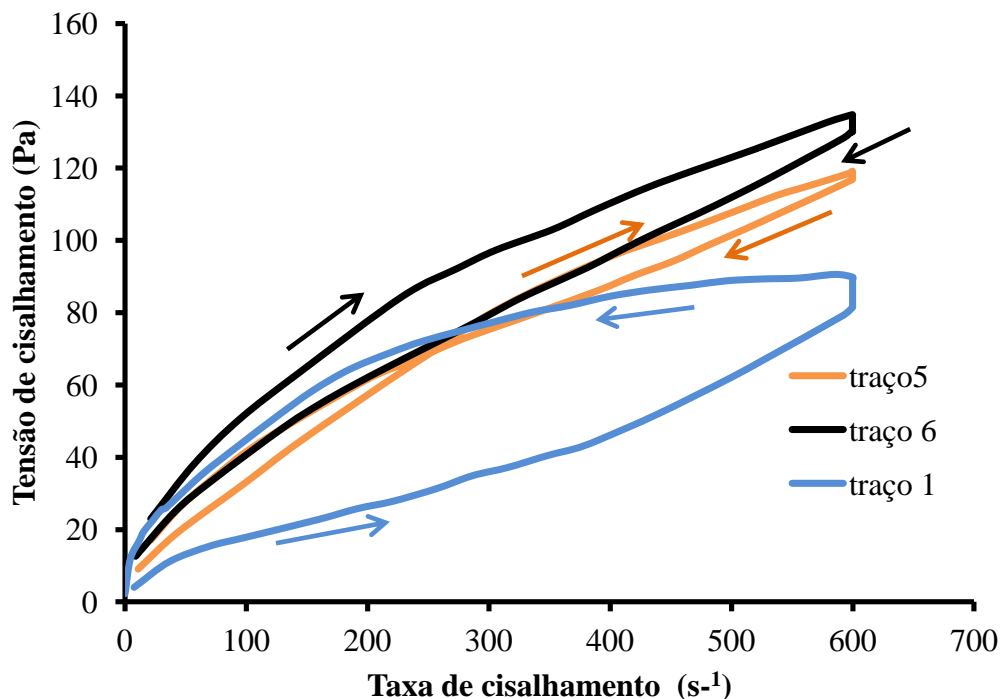


**Figura 24:** Perfil da Tensão vs taxa e viscosidade vs taxa para Traço 6 com 25% de CV.

Na figura 25 as curvas dos traços 5 e traço 6, em comparação com a curva do traço 1, mostram primeiramente que a área da histerese do traço 5, é bastante reduzida em comparação a histerese do traço 1, apresentando uma diminuição da tensão de cisalhamento ao longo do tempo que é característica de um comportamento tixotrópico em comparação com a histerese o traço 1 que ao contrario apresentou aumento da tensão de cisalhamento o que é característico de um comportamento reopético. Comparando as curvas do traço 6 a característica tixotrópica, foi mais acentuada apresentando uma maior redução da tensão de cisalhamento ao longo do tempo, nisto verifica-se uma mudança gradual das características apresentadas no traço 1 (reopético), em comparação aos traços 5 e 6 (tixotrópicos).

O principal fator para a ocorrência da reopexia, como observado na primeira argamassa do traço 1 é que ela possui pouca atividade pozolânica devido a mesma ser constituída sua grande maioria de partículas finas, assimétricas e inertes (RCC), superior a quantidade de cimento Portland e isenta de CV, partículas finas e assimétricas quando hidratadas fazem surgir forças de atração entre si favorecendo a formação de aglomerados que aumentam a viscosidade aparente da suspensão, originando o comportamento reopético (OLIVEIRA, 2000).



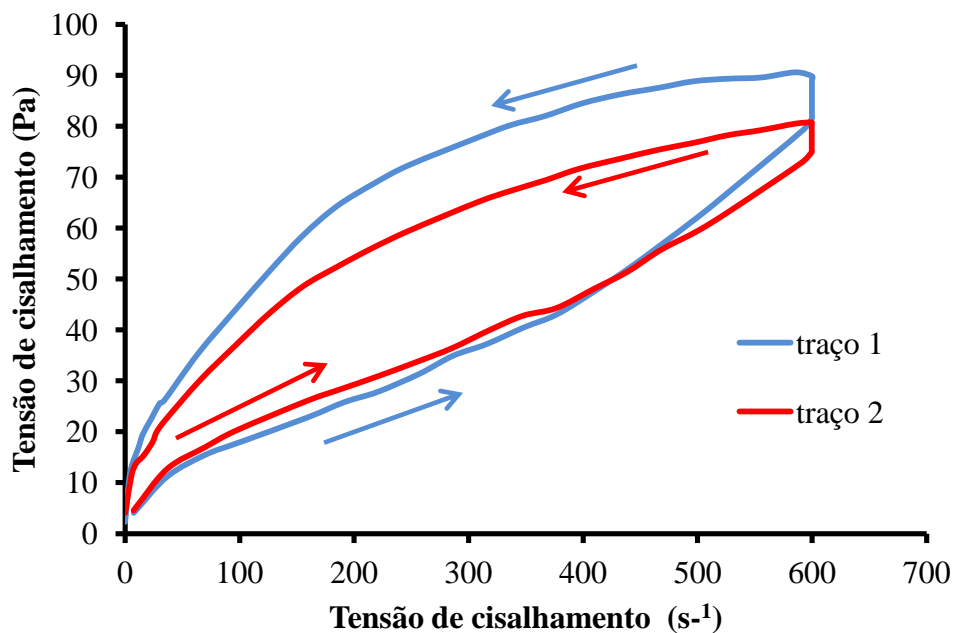


**Figura 25:** Histerese reológica para os traços 1,5 e 6.

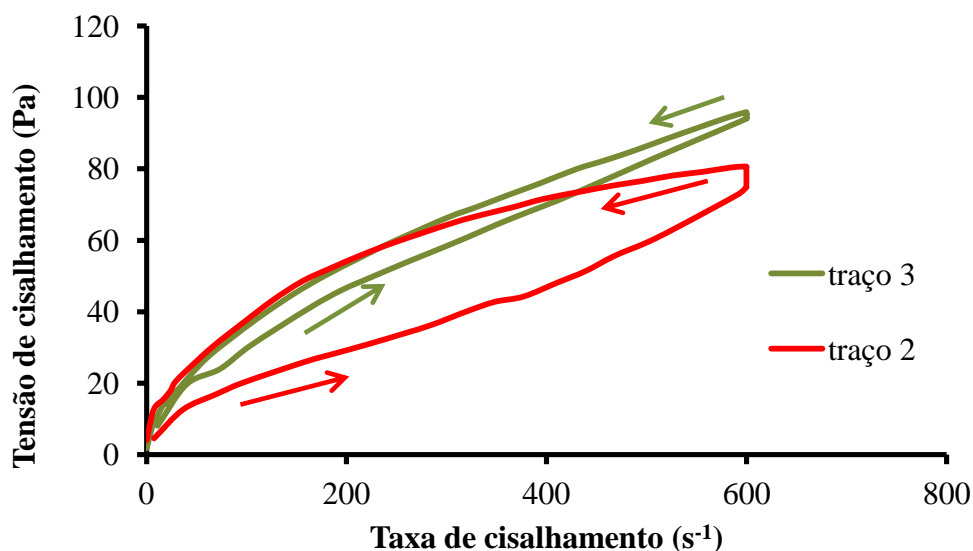
Nos traços 1 a 3, como mostra as figuras, 26 e 27, verifica-se uma mudança significativa em termos de estrutura, isto ocorre devido, a uma maior contribuição que inicia-se com efeito filer, seguido posteriormente pelo efeito pozolânico.

No primeiro caso o efeito filer é caracterizado pelo preenchimento com partículas de CV nos vazios existentes entre os interstícios, que compõe os RCC de dimensão superior ao cimento Portland, que neste caso contribui para uma maior compactação do material com elevação da densidade da pasta, mesmo antes do desenvolvimento das primeiras ligações químicas que iram ocorrer posteriormente.

O efeito pozolânico, da CV são devido a presença de compostos siliciosos ou sílico aluminosos, que apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, porém quando na presença de água ficam disponíveis a reagirem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, produzindo através da reação química compostos com propriedades aglomerantes (JOSHI E LOHTIA,1997).



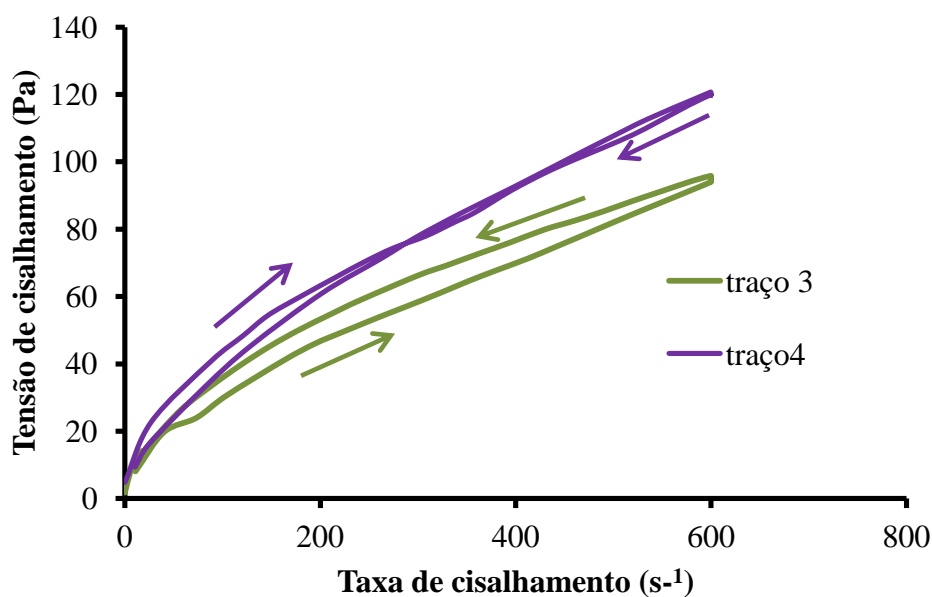
**Figura 26:** Histerese reológica para os traços 1 e 2.



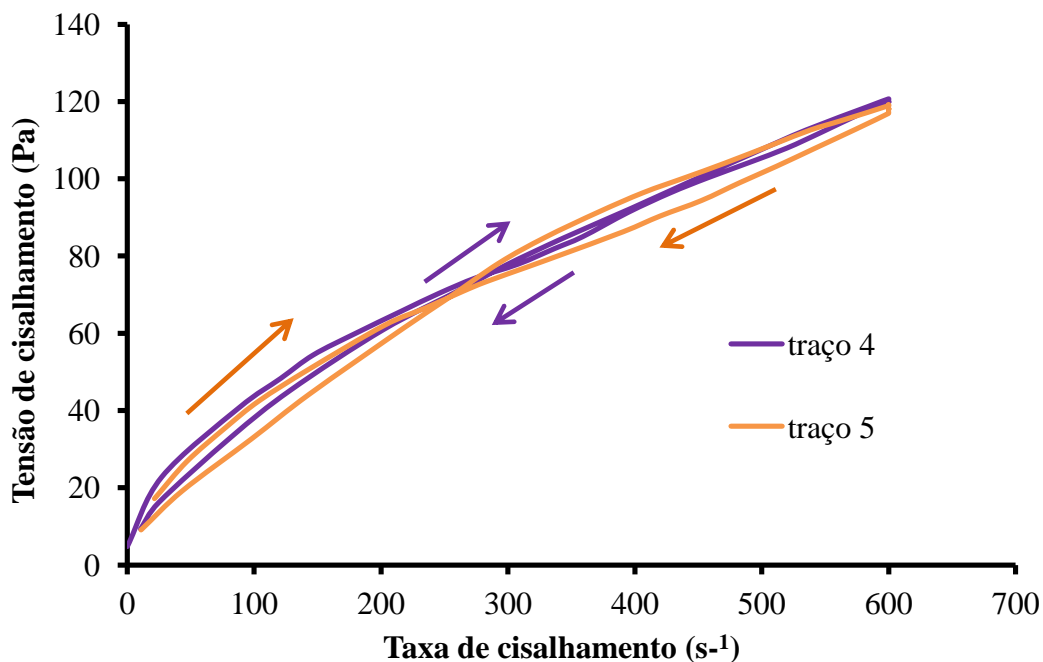
**Figura 27:** Histerese reológica para os traços 2 e 3.

Na Figura 28 e Figura 29, com a desaceleração do efeito filer e o aumento do efeito pozolânico constata-se a grande reatividade da CV, o que implicou na elevação da tensão de escoamento quando comparada com as argamassas do traço 1 ao traço 3, com a mudança da característica reopética para tixotrópica da argamassa acentuando-se a partir do traço 4. Nisto verifica-se a principal vantagem da adição da CV, no comportamento reológico das argamassas é devida à dimensão e forma aproximadamente esférica das partículas.

A melhoria do comportamento induzida pela presença de CV, referente ao efeito pozolânico é devida a elevada quantidade de água adsorvida pelo carbono presente nas CV, pois quanto maior for o índice de desestruturação do material mais energia será requerida para quebrar um maior número de ligações entre as partículas de ligante, que são responsáveis pela sua aglomeração ao contrário quanto menor for o valor deste índice mais defloculada encontra-se a pasta e mais reversível é o seu comportamento, que neste caso ocorreu de uma forma gradual de acordo com a incorporação da CV e diminuição do RCC.

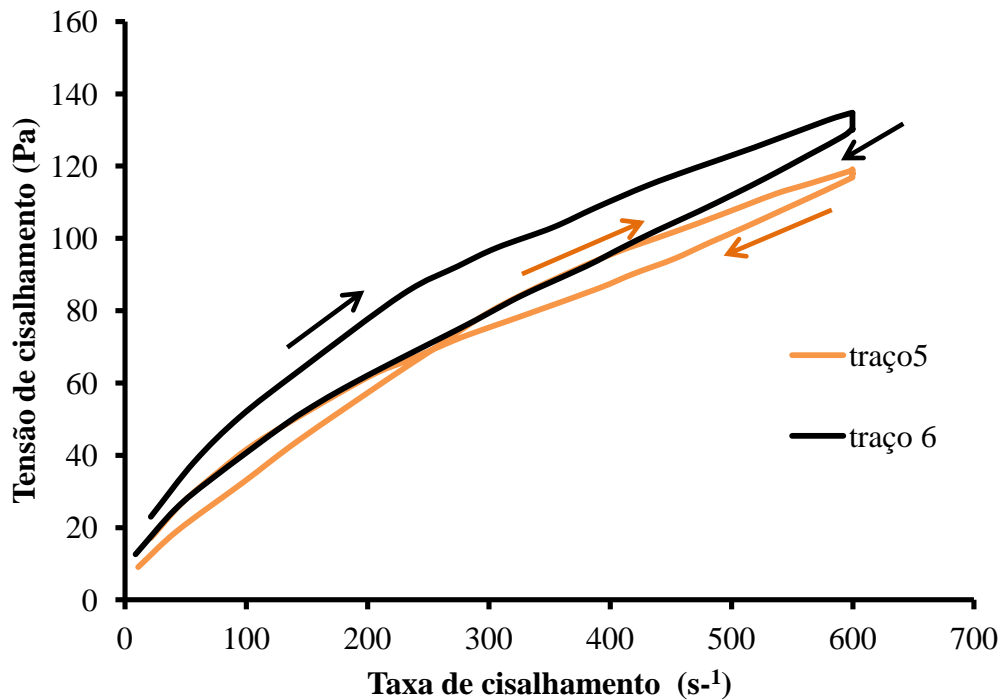


**Figura 28:** Histerese reológica para os traços 3 e 4.



**Figura 29:** Histerese reológica para os traços 4 e 5.

Nos traços 5 e 6, como mostra a Figura 30, o fator que colaborou para o caráter tixotrópico foi exclusivamente a reação pozolânica proveniente das CV, pois quando aumentou-se os teores de CV, rapidamente ocorreu a dissolução iônica ocasionando o início da reação química, essa reação dá início a formação de uma camada com espessura reduzida de produtos hidratados, que irão envolver as partículas de ligantes não hidratados, o que ocasionará a ligação das partículas, tendo como consequência imediata a aglomeração das mesmas, no entanto, esses ajuntamentos podem ser quebrados de forma irreversível através da aplicação de tensões de cisalhamento introduzidas pelo spindle do viscosímetro ou pelo manuseio da mistura quando aplicadas às superfícies dos substratos, facilitando a aplicação da argamassa pelo profissional. (WANG, KONSTA-GDOUTOS e SHAH, 2002).



**Figura 30:** Histerese reológica para os traços 5 e 6.

A Tabela 10 e a Figura 31 apresentam os ajustes propostos dos valores experimentais dos traços 1 a 6 para os modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley. Os resultados mostram que, ao modelo de Herschel-Bulkley estão associados maiores coeficientes de determinação, ( $R^2$ ), do que em relação ao modelo de Bingham.

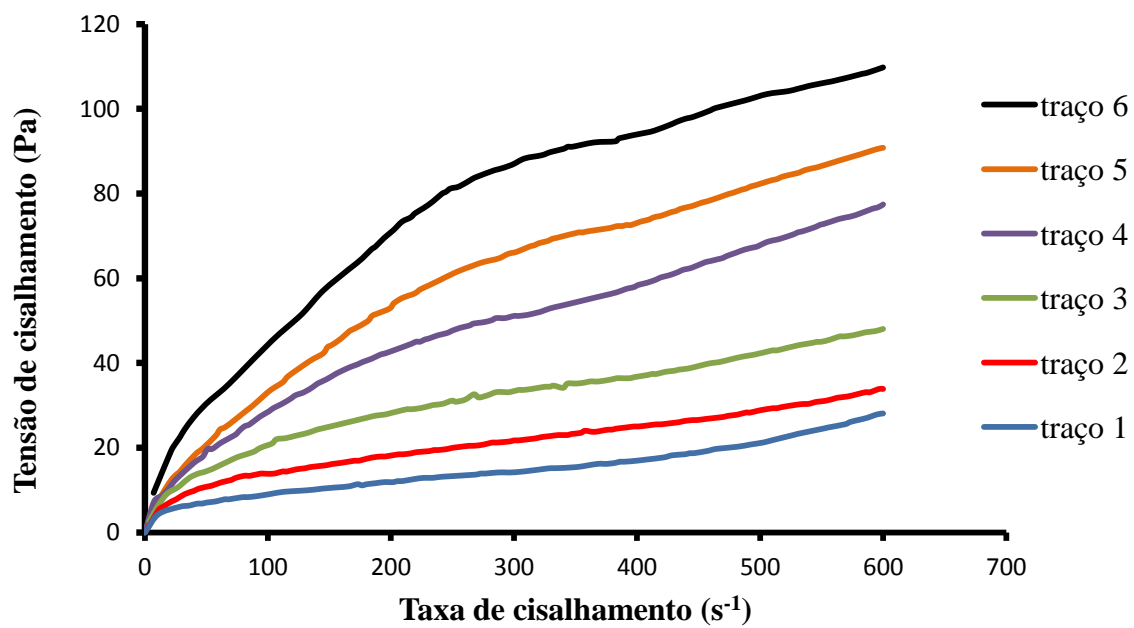
De acordo com dados de literatura é de se esperar que o comportamento reológico das argamassas seja avaliado em termos de modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley, caso a suspensão satisfaça a relação de Bingham, o seu comportamento reológico pode ser caracterizado através de dois parâmetros, considerado como propriedades do material: a tensão limite de escoamento,  $\tau_0$ , e a viscosidade, ( $\eta$ ). A expressão proposta por Herschel-Bulkley também é dependente do parâmetro ( $\tau_0$ ) por apresentar parâmetros que relacionam o índice de consistência ( $k$ ) e o índice de comportamento do fluido ( $n$ ), fatores esses que envolvem propriedades que podem levar em consideração os efeitos das reações que ocorrem durante o processo, fazem do modelo de Herschel-Bulkley, o mais significativo em termos experimentais.

Os resultados experimentais apresentados no trabalho apresentaram melhores correlações com o modelo reológico de Herschel-Bulkley de acordo com o tempo de ensaio, principalmente, nos traços 4, 5 e 6 nos quais possuíam maiores teores

de CV, o que traz uma grande vantagem, em termos de aplicação da argamassa as superfícies dos substratos e em termo de aproveitamento desse rejeito.

**Tabela 9:** Modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley para os traços 1 a 6 das argamassas.

ARGAMASSA (35%) H <sub>2</sub> O	MÉDIA	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY			
		$\tau_0$ (Pa)	$\eta_p$ (Pa.s)	R <sup>2</sup>	$\tau_0$ (Pa)	K	n	R <sup>2</sup>
argamassa tipo 1		8,536	0,3524	0,9917	5,489	0,943	0,7963	0,994
		4,361	0,2708	0,996	5,06	0,7301	0,797	0,998
		4,589	0,1191	0,9964	10,38	0,1053	1,019	0,9964
	<b>MÉDIA</b>	<b>5,829</b>	<b>0,247</b>	<b>0,995</b>	<b>6,976</b>	<b>0,593</b>	<b>0,871</b>	<b>0,996</b>
argamassa tipo 2		17,7	0,104	0,915	4,736	1,17	0,6484	0,9213
		13,05	0,1268	0,9942	5,039	0,6322	0,7588	0,9978
		14,65	0,1457	0,9981	7,891	0,4365	0,8369	0,9993
	<b>MÉDIA</b>	<b>15,133</b>	<b>0,126</b>	<b>0,969</b>	<b>5,889</b>	<b>0,746</b>	<b>0,748</b>	<b>0,973</b>
argamassa tipo 3		15,64	0,1317	0,9921	4	1,041	0,6912	0,9986
		13,95	0,05872	0,975	4,565	2,623	0,4502	0,9969
		19,57	0,1639	0,9942	7,592	0,985	0,7314	0,999
	<b>MÉDIA</b>	<b>16,387</b>	<b>0,118</b>	<b>0,987</b>	<b>5,386</b>	<b>1,550</b>	<b>0,624</b>	<b>0,998</b>
argamassa tipo 4		16,16	0,1342	0,992	2,619	1,246	0,6685	0,9993
		17,42	0,1037	0,9803	6,221	1,567	0,6482	0,9969
		22,26	0,1511	0,9908	4,655	1,969	0,6183	0,9998
	<b>MÉDIA</b>	<b>18,613</b>	<b>0,130</b>	<b>0,988</b>	<b>4,498</b>	<b>1,594</b>	<b>0,645</b>	<b>0,999</b>
argamassa tipo 5		22,12	0,1746	0,9917	9,361	2,085	0,6349	0,9998
		21,61	0,127	0,9683	9,184	7,444	0,4147	0,997
		27,04	0,1827	0,9811	6,416	5,052	0,5187	0,9976
	<b>MÉDIA</b>	<b>23,59</b>	<b>0,161</b>	<b>0,980</b>	<b>8,320</b>	<b>4,860</b>	<b>0,523</b>	<b>0,998</b>
argamassa tipo 6		24,96	0,1413	0,9722	21,76	8,419	0,414	0,9979
		33,49	0,1467	0,9427	22,52	22,81	0,2945	0,995
		33,39	0,1878	0,9743	23,02	5,801	0,4977	0,9992
	<b>MÉDIA</b>	<b>30,613</b>	<b>0,159</b>	<b>0,963</b>	<b>22,433</b>	<b>12,343</b>	<b>0,402</b>	<b>0,997</b>



**Figura 31:** Perfil das curvas de fluxo para os Traço 1 a 6 para os modelos reológicos propostos.

## 6 CONCLUSÕES:

A influência das propriedades das CV em conjunto com RCC mostraram que ocorreu uma mudança significativa nas características das argamassas o que levará a uma elevada absorção de água com formação de uma cadeia cristalina de produtos hidratados.

Os estudos reológicos apresentaram uma conformidade em relação aos ensaios realizados, com a adição gradativa de CV. O aumento do torque apresentou como consequência a melhora do fator de trabalhabilidade do material.

Em relação a influência das propriedades reológicas das argamassas com o tempo, os reogramas mostraram que ocorreu uma mudança gradativa do comportamento reológico para tixotrópico, ao longo dos traços analisados, o que ressalta os efeitos filer e pozolânico nas misturas ensaiadas, sendo mais acentuado a partir dos traços 4, 5 e 6, devido o aumento do teor de CV, este fato ocasionou a diminuição das áreas das histereses ao longo do tempo em que ocorreu o ensaio, permitindo confirmar a destruição irreversível da estrutura da argamassa.

Porém o tempo de ensaio é uma variável livre no sentido em que é somente possível medir o comportamento reológico do material até o início da pega do mesmo.

Em termos de modelo matemático o modelo de Bingham apresentou correlações que podem ser consideradas satisfatórias. Porém resultados mostram que, o modelo de Herschel-Bulkley apresentou maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ), o que demonstra ser esse modelo o mais apropriado na representação reológica desse material.

Em relação a reciclagem dos rejeitos utilizados neste trabalhos, tanto para o RCC quanto para CV, as amostras ensaiadas apresentam desempenhos satisfatório em termos de reologia, com destaque para os traços 4,5 e 6, o que demonstrou ser muito importante na reatividade dos materiais atuando principalmente como carga e aglomerante, este fato torna a reciclagem de resíduos bastante promissora e capaz de produzir elementos construtivos de baixo custo, acelerando o processo de



gerenciamento de resíduos sólidos, o que ocasiona a uma diminuição das áreas utilizadas para destinação desses rejeitos, conduzindo a um desenvolvimento sustentável adequadas consciente de aproveitamento de resíduos sólidos industriais.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar uma Sequencia de ensaios utilizando a metodologia do abatimento de tronco de cone, para a avaliação trabalhabilidade das argamassas no seu estado fresco em diferentes composições.
  
- Verificação da influência da variação de adições químicos e minerais as argamassas, tais como aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade, Sílica Ativa, Filers e Metacaulin, , etc nos parâmetros reológicos das argamassas.
  
- Realizar o desenvolvimento de modelos matemáticos que traduzem os parâmetros reológicos experimentais, medidos por um reômetro.
  
- Estudar suas características, físicas, químicas e reológicas, das mesmas matrizes utilizadas neste trabalho quando dopadas por diferentes tipos de polímeros, dentre eles o POLIESTIRENO SULFONADO o PVA E O EVA, ETC..., visando, portanto sua aplicação na industria da construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 232, 1996, **Use of fly ash in concrete**, ACI committee report 232.2R-96, ACI, April, pp. 34.

AHMARUZZAMAN, M.; **A review on the utilization of fly ash**. Department of Chemistry, National Institute of Technology Silchar, Silchar-788010, Assam, India .Progress in Energy and Combustion Science 2010.

AIAD, Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1229-1234, (2003).

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AÏTCIN, P.-C.; JOLICOEUR, C.; MacGREGOR, J. G. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't**. *Concrete International*, v. 16, n. 5, p. 45-52, May. 1994.

AÏTCIN, Pierre-Claude, 1998, **High-performance concrete**, Modern concrete technology 5, E & FN SPON, London and New York

ALONSO, J. L. and WESCHE, K., 1991, *Characterization of fly ash*, Fly ash in concrete: properties and performance, Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed. , E&FN SPON, pp. 3-23.

ARAÚJO, M. S.; FRANÇA, S. C. A.; BARBATO C. N.; Estudo Reológico de polpa de Bauxita da Região Nordeste do Pará. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM/MCT, 17. **Anais...** 2009.p.22-28. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

\_\_\_\_NBR 6220: **Materiais refratários densos conformados — Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_NBR 7211: **Agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_NBR 7217: **Determinação de composição granulométrica dos agregados**. Rio de Janeiro, 1982.

AZEVEDO, A.F.F.L.C. **Betões de elevado desempenho com incorporações de Cinzas Volantes**. 2002. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil-Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

BACHE, H. H. **Densified cement/ultrafine particle-based materials**. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2.,1981.

AÏTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. Tradução Geraldo G. Serra. SãoPaulo: PINI, 2000. 667pBANFILL P.G., **The rheology of fresh mortar**, *Magazine of Concrete Research*, 43,13-21, (1991).

BANFILL, P.F.G., **“Feasibility of a coaxial cylinders viscometer for mortar”**, *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 2, pp. 329–339, 1987.

BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. **An introduction to rheology**. 1. ed. New York: Elsevier, 1989. 199 p. (Rheology Series, 3).

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BAXTER, L.L. **Ash deposition during biomass and coal combustion: a mechanistic approach**. Biomass and bioenergy, vol 4, nº 2, pp 85 – 102, 1993.

BIRD, R. B.; STEWARD, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1960.

BLOMBLED, P.J. **Comportement rhéologique des pâtes, mortiers et bétons: mesure, évolution, influence de certains paramètres**. *Revue des Matériaux de Construction “Ciments et Bétons”*, v. 617, Fev.1967 apud RAGO, F.

BOURNE, M. C. **Food texture and viscosity (Concept and management)**. New York: Academic Press, 1982.

BONEN, D.; SARKAR, S. L. **The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss**. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1423-1434, Oct. 1995.

BRETAS, R.; D'AVILA; **Reologia dos Polímeros Fundidos**. São Carlos, SP, 2000.  
CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

FERREIRA K. C, **Estudo de Parâmetros Físico-Químicos para a Produção de Argamassas Utilizando Resíduos Industriais e da Construção Civil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

CASTRO, A.L.; **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese Doutorado – EESC – USP. São Carlos, 2007.

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

COUTINHO A.S., **Fabrico ,Propriedades do Betão**, Volume I, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa, (1997).

COUSSOT, P; **Rheometry of Pastes, Suspensions and Granular Materials—Application in Industry and Environment** Wiley, New York, 2005.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BANFILL, P. F. G., **Alkali Activated Fly Ash: Effect of Admixtures on Paste Rheology**. *Rheologica Acta*, V. 48, No. 4, 2009, pp. 447-455

CYR, M., C. LEGRAND, MOURET, M., Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and Concrete Research*, 30, 1477-1483, (2000).

EROL, M.; Genç, A.; Övecoglu, M.L.; Yücelen, E.; Küçükbayrak, S.; Taptik, Y. **Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ash.** *Journal of the European Ceramic Society*, Amsterdam, v.20, p.2209-2214, 2000.

FERRARIS, C.F., K.H. Obla, R. Hill, **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement past and concrete,** *Cement and Concrete Research*, 31,245-255, (2001).

FERRARIS, C. F.; **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report.** NISTIR 5869, July. 1996.

FERRARIS, C. F.; **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report.** *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v.104, n. 5, p. 461-478, Sept.-Oct. 1999.

FORMAGINI, Sidiclei.; **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho,** 2005. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2005

FOX, R. W.;McDONALD, A. T.; **Introdução à mecânica dos fluidos.** Tradução de Alexandre Matos de Souza Melo. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662p.

GABAS, A.L; MENEZES, R.S; TELIS-ROMERO, J. **Reologia na industria de bicomcombustíveis.** Lavras: INDI, 2012.

GASTALDINI, A. L. G. & ISAIA, G. C. Chloride permeability of high performance concrete with mineral addition: binary and ternary mixtures. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE*, 2. Gramado, Brasil, **Proceedings** 1999.1 CD-ROM.

GOLASZEWSKI, J., SZWABOWSKI, J., **Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars,** *Cement and Concrete Research*, 24, 235-248, (2004).

GREEN, K.M, CARTER M.A, HOFF, W.D., WILSON, M.A., **The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars,** *Cement and Concrete Research*, 29, 1743-1747, (1999).

GUPTA, R.P.;T.F; KAJIGAYA, MIYAMAE, S; TSUMIT, Y. **Computer Controlled Scanning Electron Microscopy Of Minerals In Coal – Implications For Ash Deposition.**Prog.Energycombudt.Sci. Vol 24, p. 523-543, 1998.

HEWLETT .P.C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001).

HEWLETT, P.C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001)

HU, C.; De LARRARD, F.; GJ.RV, O. E.; **Rheological testing and modeling of fresh high performance concrete.** *Materials and Structures*, v. 28, n. 175, p. 1-7,Jan.-Feb. 1995.

HU, C.; De LARRARD, F.; **The rheology of fresh high-performance concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 2, p. 283-294, Feb. 1996.

JALALI, **Said, 1991**, *A study of factors affecting the mechanical behaviour of lime-fly ash mixtures*, Coventry Polytechnic, Ph.D. Thesis, February, pp. 411.

JARNY,S; ROUSSELB,N; RODTSA, S; BERTRANDA, F; LE ROYB, R; COUSSOTA, P; Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry. *Cement and concrete Research*, v.35, p. 1873-1881, mar. 2005.

JOLICOEUR, C; SIMARD, M; *Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts* Department of Chemistry, University de Sherbrooke, Sherbrooke, QuC. JIK 2R1, Canada,1998.

JOSHI, R. C. and LOHTIA, R. P., *Fly ash in concrete: production, properties and uses, Advances in Concrete Technology*, Volume 2, V. M. Malhotra ed., Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 269.1997.

KNUDSEN, S,K. **Numerical investigation of ash deposition instraw-fired boilers – using CFD as the framework for slagging and fouling predictions. 2001.** Tese de doutorado. Instituto de Tecnologia Energia.Universidade de Aalborg. Dinamarca.

KHAYAT, K.H., **Viscosity-Enhancing admixtures for cement-based materials- An Overview**, *Cement and Concrete Composites*, 20, 171-188, (1998).

KIRYU, H. S.; **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**, 2006. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica – ciências térmicas) – FEIS – UNESP, Ilha Solteira/SP, 2006.

LACHEMI, M., K.M.A. Hossain, P.C. Nkinamubanzi, N. Bouzoubaâ, **Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement past**, *Cement and Concrete Research*, 34, 185-193, (2004).

MACHADO, J.C.V; **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. Editora Interciência: Petrobras. Rio de Janeiro, 2002.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.

MALHOTRA, V. M., 1999, *Making concrete “greener” with fly ash*, *Concrete International*, ACI , May, pp. 61-66;

MASCARENHAS, J., **Sistemas de construção II- paredes**, Ed. livros horizonte, Lisboa, (2003).

MATTIGOD SV, DHANPAT R, EARY LE, Ainsworth CC. **Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements**. *Journal of Environmental Quality* 1990;19:188–201.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

NASCIMENTO, CHRISTINE RABELLO. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Mineraias**. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, 2008. 53p. (Série Rochas e Mineraias Industriais, v.12).

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P.-C.; **Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles**. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 5, p. 687-697, May. 1998.

NEVILLE, A M. *Properties of Concrete*, Ed. Pitman Publishing, London, (1975)

NEVILLE, ADAM M., 1995, *Properties of concrete*, Fourth edition, Longman Group Limited, England, pp. 844;



OLIVEIRA, I., STUDART, A., PILLEGI, R., PANDOLFELLI, V. **Dispersão e em pacotamentode partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico.**18ª ed. São Paulo, Fazendo Arte, 2000.

OTSUBO,Y,MIYAI,S,UMEYA,K, **Time-Dependente Flow of Cement Pastes.** *Cem.Concr.Res*; v. 10, p.-638, 1980.

PANDOLFELLI, V. C. et al.; **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195p.

PANDOLFELLI, V. C. et al.; **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195p.

PAPO, L. PIANI, **Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes,** *Cement and Concrete Research*, 34, 2097-2101, (2004).

PARK, C.K., NOHB, M.H., PARKB, T.H., “**Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures**”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, pp. 842– 849, 2005.

PETROU, M. F. et al.; **Influence of mortar rheology on aggregate settlement.***ACI Materials Journal*, v. 97, n. 4, p. 479-485, July.-Aug. 2000b.

PILEGGI, R. G. ; CINCOTTO, M. A. ; JOHN, V. M. . **Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimentode argamassas.** *E-Mat (Porto Alegre)*, v. 3, p. 62-76, 2006.

RAGO, F.; **Características reológicas de pastas de cales hidratadas normalizadas e de cimento.** 1999. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 1999.

RAO, M.A. **Measurement of flow properties of fluid foods: developments, limitations, and interpretation of phenomena.** *Journal of Texture Studies.* Trumbull. v.8, n.3, p.257-282, 1977

ROUSSEL, N.; Le ROY, R.; **The Marsh cone: a test or a rheological apparatus.** *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, p. 823-830, May. 2005.  
SHARMA, S. K., MULVANEY, S. J., RIZVI, S. S. H. **Food processing engineering : theory and laboratory experiments.** United States of America : Wiley-Interscience. 2000.

STEEFE, J. F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**. 2. ed. East Lansing -Freeman Press. 1996.

STRUBLE L., G.K. Sun, **Viscosity of Portland cement past as a function of concentration**, *Advances on Cement Based Materials*, 2, 62-69, (1995).

REIS, J. F. A. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho” Campus De Ilha Solteira; Ilha Solteira - SP, 2008.

RIBEIRO, C.C; PINTO, J.D.S; STARLING, T. **Materiais de construção civil**, 2ª E. Belo Horizonte : Editora UFMG, 2002. 101p.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. 2011. **Caracterização Física, Química e Mineralógica de Cinza Leve de Caldeira e sua Utilização na Síntese de Zeólitas e Aplicação do Material Zeolítico na Adsorção de  $\text{Cu}^{+2}$  e  $\text{Cd}^{+2}$** . Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, 2011.

ROSELLO, M. T. V. **Morteros de cemento para albanileria**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1976. 55 p.

CHANDRA, S., J. Björnström, **Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars- part I**, *Cement and Concrete Research*, 32, 1605-1611, (2002).

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P.; **A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 3, p. 363-371, Mar. 2004.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária**. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SCANADOLARA, J.P. **Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento portland por rejeitos particulados de tijolo**. 2010. Dissertação

(Mestrado em ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade do estado de Santa Catarina, centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Joinville.

SCHRAMM, G.; **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Tradução de Cheila G. Mothé; Denise Z. Correia; Hans M. Petri; Michelle Gonçalves; Tatiana Carestiatto. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, D.A., ROMAN, H.R., **Caracterização microestrutural de pastas de cimentos aditivadas com polímeros HEC e EVA**, *Ambiente Construido*, 2(2), 31-46, (2002).

SILVA, I. J.; **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 279p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 2000.

SMITH, W.F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**, Ed. McGraw-Hill Inc., Lisboa, (1996).

SIQUEIRA, J.S. de. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

STEFFE, J.F; 1992. Yield stress: **phenomena and measurement**. In: Singh, R.P. and A. Wirakartakusumah (editors). *Advances in Food Engineering*. CRC Press, Boca Raton.

STRUBLE, L. et al.; **Rheology of cement paste and concrete**. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 20, n. 2, p. 269-277, Dec. 1998.

TANCREDI, G. A.H. **Estudo Das Propriedades do Concreto Com Adição de Cinza de Carvão Mineral**. 2010. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Química )- Programa de Pós Graduação Em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém.

TANNER, R.I.; **Engineering rheology**. Ed.rev. New York : Oxford University Press, 1988. 451p

TATTERSAL, G.H.; BANFILL,P.F.G. **The rheology of fresh concrete.**London:Pitman 1983.347p.

TATTERSALL,G.H. **workability and quality control of concrete.** London: E & FN Spon, 1991b. 262p.

TAYLOR, H.F.W. **The Chemistry of Cements**, Volume I, Ed. Academic Press Inc., London, (1972).

UCHIKAWA, H; SAWAKI, D; HANEHARA,S. **Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cementpaste**, *Cement and Concrete Research*, 25(2), 353-364, (1995).

VAN WAZER, J.R. et al. **Viscosity and flow measurement** : a laboratory handbook of rheology. 2ed. New York :Interscience Publishers, 1966. 406p.

WALLEVIK, O. H.; GJ.RV, O. E.; **Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete.** In: PROPERTIES OF FRESH CONCRETE, 1990,Hanover/Germany. Proceedings... London: Chapman and Hall, 1990a. p. 213-224.

WANG, K., KONSTA-GDOUTOS, M.S. e SHAH, S.P., **Hydration, rheology, and strength of ordinary Portland cement (OPC) cement kiln dust (CKD) slag binders**, *ACI materials journal*,99(2), March-April, 173-179 (2002).

WARREN, J; “Conservation of Brick”, cap. 12- **Mortars, Rendering and Plasters**, **Butterworth Heinemann**, England,1999.

YANG, Q, ZHU, P, WU, X, HUANG, S., **Properties of concrete with a new tipe of saponin air-entraining agent**, *Cement and Concrete Research*, 30, 1313-1317, (2000).

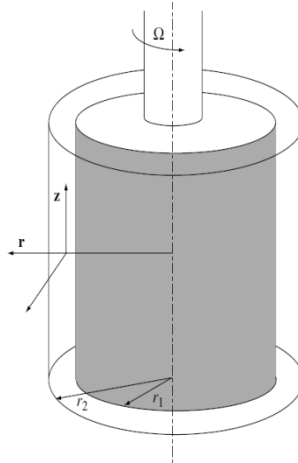
YOUNG, J.F. S. MINDESS, R.J. GRAY, A. BENTUR, **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, (1998).

ZHANG, D.S., **Air entrainment in fresh concrete with PFA**, *Cement and Concrete Composites*, 18,409-416, (1996).

ZHANG, X.; HAN, J.; **The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste.***Cementand Concrete Research*, v. 30, n. 5, p. 827-830, May. 2000.

## ANEXO A

## DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO

Cilindro Coaxial do tipo SV<sub>1</sub>

## # Definições:

$$T = F \cdot r_i$$

$$A = 2\pi r_i L$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{T}{r_i \cdot 2\pi r_i L}$$

## # Medidas do sensor SV1:

$$r_i = 10,1\text{mm} = 0,0101\text{m}$$

$$L = 61,4\text{mm} = 0,0614\text{m}$$

## # Equação para tensão no SV1:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L} \text{ (equação geral)} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L \cdot F_c} \text{ (equação específica)} \quad (2)$$

## # Fator de correção:

$$F_c = \frac{0,01}{2\pi r_i^2 L} \text{ (ManualHAAKE)}$$

**# Torque para SV1**

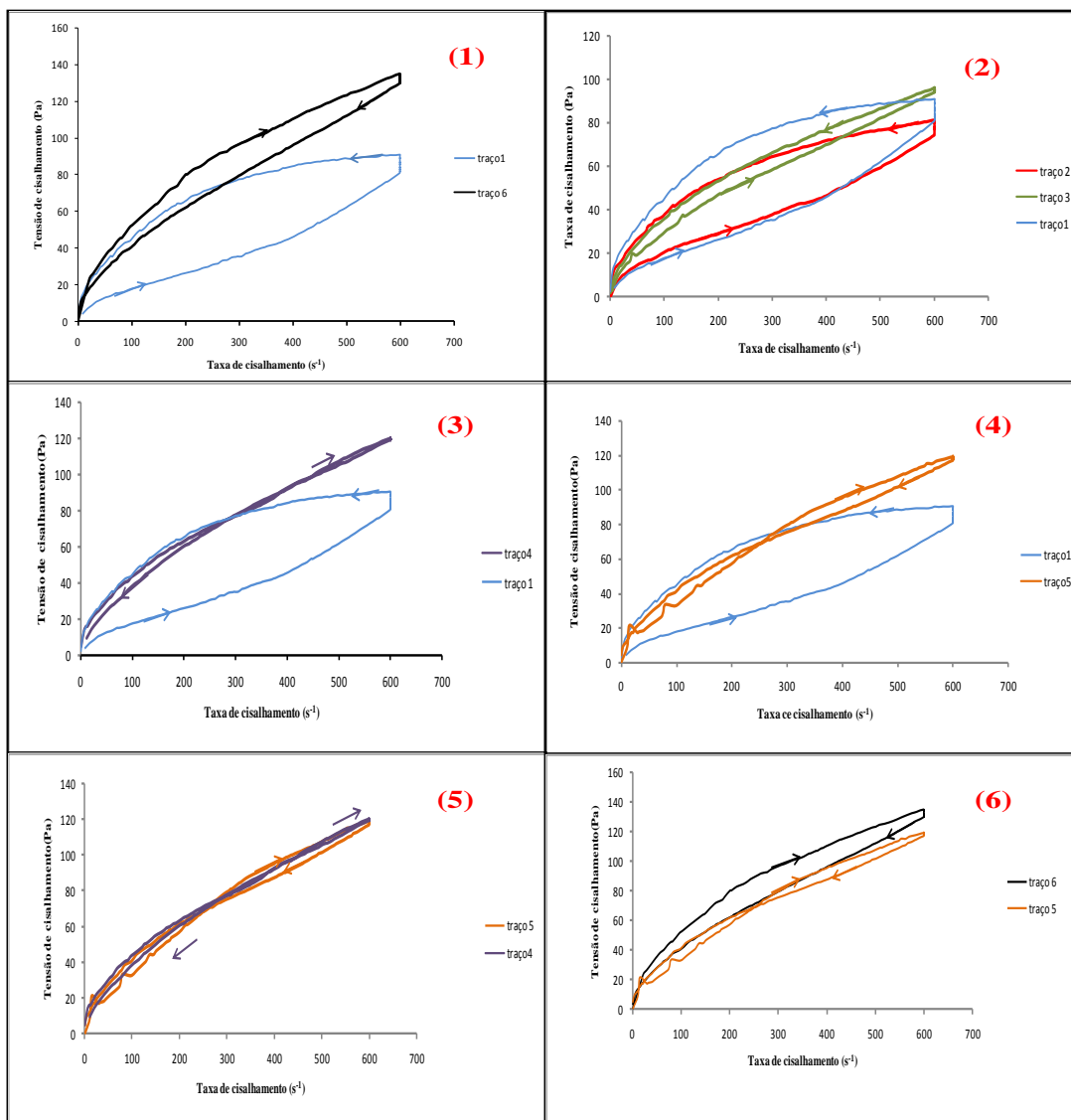
A partir de (1) e (2):

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L \cdot F_c}$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L \cdot \frac{0,01}{2\pi r_i^2 \cdot L}} \therefore \tau = \frac{T}{0,01} \therefore T = 0,01\tau$$

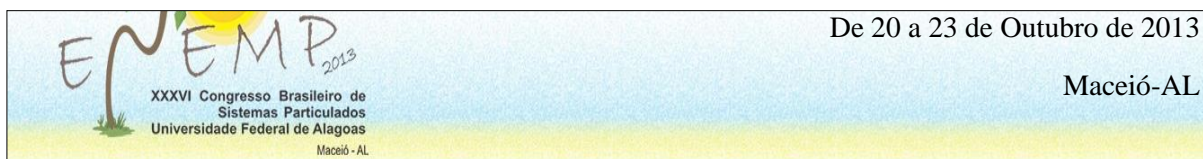
## ANEXO B

PERFIL SEQUENCIADO DAS HISTERESES REOLÓGICAS A PARTIR DOS SEIS  
TRAÇOS FORMULADOS DAS ARGAMASSAS



## ANEXO C

## RESUMO DO TRABALHO PUBLICADO NO XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS -2013- MACEIÓ - AL

**ESTUDOS PRELIMINARES DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE REJEITO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E CINZAS VOLANTES**

D.N.P.CARDOSO<sup>1\*</sup>, K.F.CASTRO<sup>1</sup>, J.A.S. SOUZA<sup>1</sup>, C.A.G. SOUZA<sup>1</sup>,  
A.M.P.F. FELIPE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PPEQ-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Laboratório de Reologia - Instituto de Tecnologia - Universidade Federal do Pará  
\*e-mail: dilson\_ufpa@yahoo.com.br

As argamassas podem ser consideradas como um conjunto de partículas sólidas em suspensão (agregado miúdo), aglomerantes e água (pasta de cimento). Sendo assim, seu comportamento reológico no estado fresco pode ser influenciado por fatores como a granulometria, composição e teor de água incorporado. O trabalho teve como objetivo a verificação das características reológicas de cinco formulações de argamassas, em função da incorporação de cinza volante com atividade pozolânica, em substituição parcial do cimento. O resíduo da construção civil foi caracterizado por meio de difração de raios-X e fluorescência de raios-X. Formularam-se composições de argamassas para os ensaios reológicos com adição de resíduo de construção civil (RCC) nas proporções de 95, 93, 85, 75 e 70%; cinzas volantes (CV) 0, 2, 10, 20 e 25% e 5% de cimento Portland (CP IV-32RS), sendo que em cada amostra foi incorporado 35% de água. Utilizou-se o viscosímetro modelo VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV<sub>1</sub> – Haake a temperatura de 28°C com 60 rpm para a elaboração da curva Torque versus tempo e em taxas 100 s<sup>-1</sup> para as curvas Tensão e viscosidade versus taxa de cisalhamento. Os resultados mostraram que a incorporação de cinza volante é o principal fator para aumento da viscosidade aparente.

Palavras chave: Argamassas, cinza volante, viscosidade aparente, reologia.