



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

SÁVIO VIANA OLIVEIRA

**REOLOGIA DE PASTAS CIMENTÍCIAS CONTENDO ADIÇÕES DE
MINERAIS**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

SÁVIO VIANA OLIVEIRA

**REOLOGIA DE PASTAS CIMENTÍCIAS CONTENDO ADIÇÕES DE
MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia
Civil da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para obtenção
do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Aline Figueirêdo
Nobrega de Azerêdo – UFCG

CAMPINA GRANDE – PB

2019

SÁVIO VIANA OLIVEIRA

**REOLOGIA DE PASTAS CIMENTÍCIAS CONTENDO ADIÇÕES DE
MINERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em ____ de _____ de 2019.

Nota: _____
Profa. Dra. Aline Figueiredo Nóbrega de Azerêdo - UFCG
Orientadora

Nota: _____
Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena - UFCG
Examinador interno

Nota: _____
Engenheira Sonaly Mendes Arruda - UFCG
Examinador externo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente a Deus, por ter me concedido essa oportunidade ímpar de realizar um sonho, pois sei que tudo que tenho e que sou vem dEle e jamais serei merecedor. Agradeço por ter me dado fé e forças durante todos esses anos, por nunca ter me desamparado e por sempre guiar os meus caminhos.

Agradeço à minha família, responsável pela formação do meu caráter, por me ensinar companheirismo, irmandade e o amor de Cristo. Obrigado por me mostrarem que as coisas materiais não definem o que somos por dentro. Em especial agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial (até mesmo quando nem eu acreditei), sendo, agora e sempre, a minha sólida fortaleza.

Meu pai, exemplo de integridade, bondade e sabedoria, obrigado por todos os conselhos (inclusive os a distância), tenho certeza que foram inspirados por Deus. Minha mãe, exemplo de fé, força, perseverança e amor, obrigado por me inspirar a nunca desistir de lutar. Eis aqui minha infinita gratidão, porque sem os dois eu nunca teria chegado até aqui.

Agradeço também aos meus amigos, que nunca me deixaram sentir a solidão que é estar longe de casa, mostrando que na vida ninguém é feliz sozinho. Na simples presença de cada um eu sinto Deus ao meu lado, me trazendo felicidade, paz e acalento. O sentimento que tenho por cada um é eterno.

Ao meu imortal grupo Tarja Preta, obrigado por esses 10 intensos anos vividos, que nossos adolescentes interiores nunca morram e alegrem nossos encontros até o final de nossas vidas. Meu grupo Xuxos, agradeço por cada dia, noite e madrugada de estudos, sem vocês essa caminhada seria impossível, espero estarmos juntos até as nossas últimas lembranças serem as coisas boas que vivemos. Obrigado ao grupo Pegar um Cineminha por quase nunca termos ido ao cinema e sim por criarmos laços invisíveis que nos unirão até a eternidade, com o nosso Pai. Meus irmãos na fé, obrigado por sustentarem o pilar mais importante da minha vida, estaremos juntos até depois do fim.

Aos meus amigos engenheiros civis, obrigado por partilharem os momentos mais extraordinários da minha vida, ainda se seguirmos caminhos distintos, cada um estará comigo em minha memória, e quando esta começar a faltar, ainda assim estarão eternizados no meu peito.

À Professora orientadora Aline, pela generosidade, disponibilidade, incentivo e tempo dedicado. Seu apoio e consideração tornaram possível a conclusão deste trabalho.

“Não to mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares...”

Josué 1:9

OLIVEIRA, Sávio Viana¹

AZERÊDO, Aline Figueiredo Nóbrega de²

RESUMO

O estudo do perfil reológico de pastas cimentícias contendo adições minerais é de grande valia para que suas diversas aplicações sejam usadas da maneira correta. O comportamento das argamassas e concretos está diretamente relacionado às pastas cimentícias e a trabalhabilidade dessas matrizes está ligada à facilidade que o profissional encontra para manuseá-las, assim, são feitas simulações das solicitações que tais matrizes podem sofrer durante sua mistura, transporte e aplicação afim de compreender os fatores que estimulam tal trabalhabilidade. A adição de minerais em pastas e argamassas está cada vez mais difundida no mercado devido a influência que suas propriedades físicas e mineralógicas exercem sobre o fluido, tais como finura do aglomerante, forma da partícula e origem. A partir da evolução dos reômetros é possível estudar o perfil reológico das pastas cimentícias através de diversos ensaios, como o ensaio de fluxo, medindo assim a tensão de cisalhamento a uma dada taxa de cisalhamento e com a variação destas é possível determinar o perfil reológico. Neste trabalho foi feito o estudo reológico de diferentes dosagens de pasta cimentícias preparadas com cimento Portland CP V-ARI, adição de três tipos de metacaulim e adição de resíduo de tijolo cerâmico moído. As pastas foram analisadas para distintas porcentagens de substituição do cimento por minerais sendo a relação água/aglomerante fixa em 0,5. O estudo se deu através de medições de parâmetros reológicos como tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento, área de histerese, tixotropia e viscosidade, usando um reômetro rotacional de placas paralelas. Os resultados mostraram que o resíduo de tijolo cerâmico moído e o metacaulim tipo II em 20% de adição provocou uma aumento na tensão de escoamento inicial quando comparado com o uso dos demais metacaulins e que a adição de dos minerais de um modo geral, principalmente a 10% e 15%, contribuiu para uma melhor fluidez das pastas acarretando em uma maior facilidade de manuseio.

Plavras-chave: Resíduo de tijolo cerâmico moído, metacaulim, taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento, viscosidade, tixotropia.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil – UFCG, e-mail: savio_12_9@hotmail.com

² Professora Orientadora do Curso de Engenharia Civil – UFCG

RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTES CONTAINING MINERAL ADDITIONS

OLIVEIRA, Sávio Viana¹

AZERÊDO, Aline Figueiredo Nóbrega de²

ABSTRACT

Studying the rheological behavior of cement pastes containing mineral additions, is of great value for the various applications to be used correctly. The behavior of mortars and concretes is directly related to the cement masses and the workability of these matrices is linked to the ease that the professional finds to handle them, thus, simulations are made of requests that such matrices may undergo during their mixing, transport and related application to understand the factors that stimulate the ability to work. The mineral additions in pastes and masses is increasingly widespread in the market due to chemical and mineral influences exerted on the fluid such as binder fineness, particle shape and origin. From the evolution of the rheometers, it is possible to study the rheological behavior of cementitious pastes through several tests, such as the flow test, thus measuring a shear stress, a determined shear rate and with a variation of these variables it is possible to use the rheological profile. In this work, the rheological study of different dosages of cementitious pastes prepared with Portland CP V-ARI cement, addition of three types of metakaolin and addition of ceramic ground brick residue was made. The pastes were analyzed for different percentages of cement replacement by minerals, with the water/binder ratio fixed at 0.5. You can provide measurements of rheological parameters such as shear stress, shear rate, hysteresis area, thixotropy and viscosity using a parallel plate rotational rheometer. The results obtained with the ground ceramic brick residue and type II metakaolin by 20% increase the initial yield stress when compared with the use of other metakaolin and the addition of minerals, in general, mainly at 10% and 15%, contributed to a better flowability of the masses that will be stored in a better handling.

Key words: Ceramic brick residue, metakaolin, shear rate, shear stress, viscosity, thixotropy.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil – UFCG, e-mail: savio_12_9@hotmail.com

² Professora Orientadora do Curso de Engenharia Civil – UFCG

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração esquemática dos métodos reológicos	16
Figura 2: Tensão de cisalhamento vs taxa de tensão de cisalhamento	18
Figura 3: Ciclo de histerese da pasta de cimento	20
Figura 4: Granulometria do CP V, dos três tipos de MC e do RTCM	25
Figura 5: Difração de raios-x do CP V	28
Figura 6: Difração de raios-x do MC tipo I	28
Figura 7: Difração de raios-x do MC tipo II	29
Figura 8: Difração de raios-x do RTCM	29
Figura 9: Pesagem de 80% de cimento e 20% de MC tipo II calcinado	31
Figura 10: Adição de água a uma relação água/aglomerante 0,5	32
Figura 11: Misturador mecânico mod. 256	32
Figura 12: Rampa de 0 a 100s ⁻¹ em 2 minutos e até 0s ⁻¹ em mais 2 minutos	33
Figura 13: Pasta após processo de mistura	33
Figura 14: Reômetro rotacional de placas paralelas	34
Figura 15: Revestimento texturizado nas placas	34
Figura 16: Acomodação da amostra em cima da fita adesiva	35
Figura 17: Excesso da amostra sendo retirado	35
Figura 18: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da amostra 0	36
Figura 19: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 1 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM	37
Figura 20: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 2 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM	37
Figura 21: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 3 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM	38
Figura 22: Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento – (a) amostra 100% CP V; (b) amostras do grupo 1; (c) amostras do grupo 2; (d) amostras do grupo 3	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos ensaios reológicos, equipamentos e parâmetros determinados	15
Tabela 2: Materiais e origem/descrição.....	24
Tabela 3: Características físicas dos materiais utilizados.....	25
Tabela 4: Composição química por fluorescência de raio-x (% em massa) do CP V, MC tipo I, tipo II, tipo III e do RTCM	26
Tabela 5: Ensaio de caracterização	30
Tabela 6: Detalhes das amostras.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AH – Área de histerese

CP – Cimento Portland

DRX – Difração de Raios-X

LABEME – Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas

MC – Metacaulim

RTCM – Resíduo de Tijolos Cerâmicos Moído

Vs - Versus

LISTA DE SIMBOLOS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio ou alumina

C_3A - Aluminato de cálcio

C_4AF - Ferro-aluminato de cálcio

CaO - Óxido de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de cálcio

$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$ - Brownmillerita

$\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$ - Silicato de cálcio

CO_2 - Dióxido de Carbono

C_3S - Silicato tricálcico

cm - Centímetros

cm^2 - Centímetros quadrados

Fe_2O_3 - Óxido de ferro III ou hematita

kg/m^3 - Quilograma por metro cúbico

K_2O - Óxido de potássio

MgO - Óxido de magnésio

mm - Milímetro

MnO - Óxido de manganês

MPa - Megapascal

pH - Potencial hidrogeniônico

SiO_2 - Dióxido de silício ou sílica

SO_3 - Trióxido de enxofre

SrO - Óxido de estrôncio

TiO_2 - Dióxido de titânio

γ - Peso específico

μm - Micrometro

η_{ap} - Viscosidade aparente

σ - Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos.....	14
1.1.1. Objetivo geral	14
1.1.2. Objetivos específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Reologia e seus conceitos gerais.....	14
2.1.1. Métodos e equipamentos reológicos para pastas e argamassas	16
2.2. Comportamento reológico de pastas cimentícias	17
2.3. Fatores que influenciam na reologia das pastas cimentícias.....	20
2.4. Adições minerais	21
2.4.1. Caulim.....	22
2.4.2. Resíduo de tijolo cerâmico moído	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. Materiais	24
3.2. Métodos	24
3.2.1. Caracterização dos materiais	24
3.2.1.1. Características físicas	24
3.2.1.2. Características químicas.....	26
3.2.1.3. Características mineralógicas.....	27
3.2.2. Dosagens das amostras	30
3.2.3. Ensaio de fluxo	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

As propriedades reológicas das pastas cimentícias estão diretamente relacionadas com o comportamento de argamassas e concretos no estado fresco, por isso o estudo e compreensão dessas propriedades é de extrema necessidade (CASTRO, *et al.* 2011). Segundo Betioli (2009), tal estudo possibilita, também, que o uso das diversas aplicações das pastas cimentícias sejam feitas especificamente de forma correta, como por exemplo, injeção, spray e extrusão. Cada aplicação de pastas cimentícias requer características reológicas diferentes.

A partir do surgimento e da evolução dos reômetros, os parâmetros reológicos imprescindíveis são determinados em diferentes taxas de cisalhamento, o que caracteriza o perfil reológico do material. Algumas características do material são possíveis ser analisadas, dependendo do tipo de reômetro, como a consolidação do material, no que diz respeito às alterações viscoelásticas associadas à pega do cimento, como também a simulação dos processos relacionados à mistura, transporte e aplicação do material (BETIOLI, 2009).

A trabalhabilidade das pastas, argamassas e concreto está diretamente relacionada à facilidade que o profissional encontra para manusear tais matrizes. A relação água/ligante e os materiais constituintes desempenham um papel essencial nas propriedades das pastas, tais materiais possuem alguns fatores que podem afetar diretamente na trabalhabilidade do fluido, são exemplos destes: a finura do aglomerante, a forma da partícula e sua origem mineralógica (AZERÊDO, 2016).

Por já terem mostrado, com grande potencial, sua utilidade como material pozolânico, diversos tipos de resíduos vêm sendo explorados cada vez mais, pode-se destacar os resíduos de tijolos cerâmicos e os resíduos de caulim (VIEIRA, 2005; AZEREDO, 2012).

Materiais estendedores são definidos como materiais que possuem massa específica inferior à do cimento e que quando misturados a ele resultam em um composto mais leve. Diversas adições de materiais estendedores em pastas cimentícias estão se tornando cada vez mais populares no mercado por proporcionarem menor porosidade, possibilitando preenchimento dos espaços vazios no empacotamento (BARGHIGIANI, 2013).

Segundo Isaia e Gastaldini (2004), o emprego das tais adições em matrizes cimentícias promove muitos benefícios ambientais e econômicos pois reduzem o consumo de cimento e as emissões de CO₂ associadas à sua produção. As adições também acarretam uma melhoria no comportamento mecânico promovida pela reação pozolânica e efeito fíler (SILVA *et al.*, 2005).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo geral*

Avaliar a influência em adições minerais no perfil reológico de pastas cimentícias.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Verificar a influência de diferentes teores de adições minerais na tensão de escoamento e viscosidade;
- Avaliar o comportamento reológico das pastas para diferentes adições minerais;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. REOLOGIA E SEUS CONCEITOS GERAIS

O termo “Reologia”, inventado pelo professor de Lafayette College, Bingham, significa estudo da deformação e fluxo da matéria. Segundo Martins (2004) *et al.* o estudo possui o desígnio de compreender a relação entre a taxa de deformação, a tensão e o tempo. Há uma preocupação com a mecânica de corpos deformáveis que podem estar em estado sólido, líquido ou gasoso.

Segundo Neto (2019), destacam-se alguns dos principais motivos para estudar o comportamento reológico, entre eles: a reologia contribui para o conhecimento de estruturas, pois existe uma relação entre a viscosidade e o tamanho e forma molecular das substâncias em solução; favorece também para o controle de processos, realizado por medidas reológicas da matéria-prima e do produto, e para o projeto de máquinas, para que o processamento dos materiais seja adequado à potência utilizada pelos equipamentos.

Na prática, o estudo da reologia é empregado a materiais que apresentam comportamento de fluxo mais complexo que fluidos simples (líquidos e gasosos) ou

sólidos elásticos ideais, ainda que, dependendo das condições em que o teste é realizado, o material possa demonstrar comportamento simples ou complexo (CASTRO, 2007).

Diversos métodos são usados para estudar o comportamento reológico dos fluidos, entre eles se destacam a reometria de fluxo, o ensaio oscilatório (varredura de tempo e varredura de deformação) e ensaio de palheta ou Vane test (SATO, V. Y., et al 2012; CAVALCANTI, D. J. H, 2006; VENÂNCIO, P. B. F., 2008).

Existem inúmeros ensaios reológicos para os tão diferentes materiais como o asfalto, lubrificantes, tintas, plásticos e borracha. Para a análise das propriedades e do comportamento reológico dos ligantes asfálticos, por exemplo, o ensaio de viscosidade rotacional é usado para mensurar a viscosidade do ligante quando submetido a altas temperaturas, O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR – Dynamic shear Rheometer) é utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante (Moura, 2019).

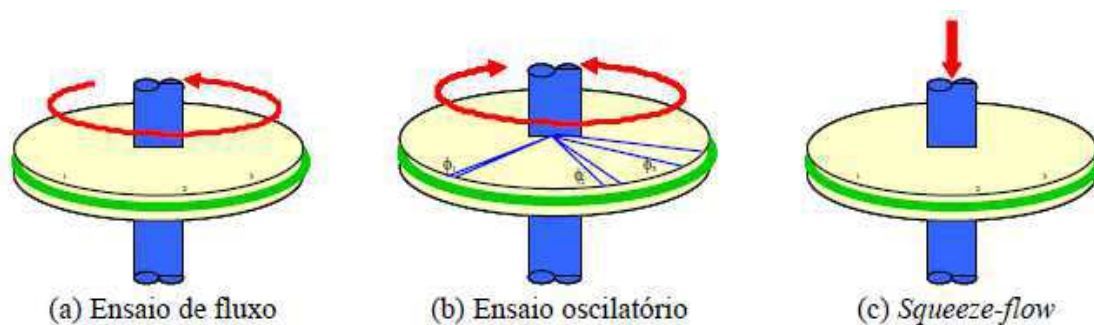
Segundo Machado (2002), é necessário que haja aplicação de deformações ou tensões oscilatórias para se determinar os parâmetros reológicos dos modelos viscoelásticos. Dentre os ensaios que possibilitam tal aplicação de tensão às pastas cimentícias destacam-se três mais utilizados, apresentados na Tabela 1 e ilustrados na Figura 1.

Tabela 1: Descrição dos ensaios reológicos, equipamentos e parâmetros determinados

Reometria	Equipamento	Parâmetros determinados
Fluxo	Reômetro	Perfil de fluxo, tensão de escoamento e viscosidade
Oscilação	Reômetro	Módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G'') e tensão de escoamento
<i>Squeeze-flow</i>	Prensa ou reômetro	Perfil da curva carga x deslocamento, carga máxima, tensão de escoamento, viscosidade elongacional

Fonte: BETIOLI, 2009.

Figura 1: Ilustração esquemática dos métodos reológicos



Fonte: BETIOLI, 2009.

2.1.1. Métodos e equipamentos reológicos para pastas e argamassas

O ensaio de fluxo é mais usual para simular misturas e aplicações e estudar os efeitos de adições, aditivos e matérias-primas. Através da determinação das curvas tensão de cisalhamento *vs* taxa de cisalhamento e viscosidade *vs* taxa de cisalhamento determina-se, assim, as propriedades reológicas da pasta como a resistência ao escoamento (viscosidade aparente) e área de histerese (AH) que, segundo (OLIVEIRA et al., 2000; BETIOLI et al., 2012), é formada pelo espaço existente entre as curvas de aceleração e desaceleração dos gráficos de taxa de cisalhamento *vs* tensão de cisalhamento. O reômetro habitualmente usado para tal ensaio é o rotacional AR 2000, TA Instruments, o mesmo usado em ensaio oscilatório.

O cisalhamento oscilatório é um método dinâmico onde, de acordo com uma função senoidal, a tensão é oscilada. Esse princípio é utilizado no ensaio oscilatório onde ocorre uma varredura de tempo e uma varredura de deformação onde a estrutura se mantém em repouso. O ensaio tem como finalidade avaliar o comportamento reológico das pastas de cimento desde a mistura até o início de pega do cimento. (SCHULTZ, 1991, 1993; NACHBAUR et al., 2001; SAAK et al., 2001; WINNEFELD; BETIOLI et al., 2008, 2009). De acordo com Azerêdo (2012), o método tem sido aplicado em misturas de polímeros com cimento Portland, e pouco explorado em misturas contendo apenas cimento.

O squeeze-flow, Segundo Cardoso *et al.* (2014), é um método bastante preciso para avaliação de argamassas, já que identifica alterações nas argamassas em função do tipo de mistura aplicado. Para estudo do comportamento reológico de pastas e argamassas de cimento e cal, esse método tem sido amplamente utilizado. Além disso, o ensaio indica o tempo além do qual a argamassa não deveria ser mais trabalhada (AZERÊDO, 2016).

2.2.COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS

Há uma grande importância na compreensão do comportamento reológico de pastas cimentícias, para que sejam entendidos e previstos o comportamento da pasta, argamassas ou concretos para uso em aplicações específicas (KHAYAT, 1998; FEYS *et al.*, 2016).

A variedade com que os materiais podem ser misturados e aplicados, como por exemplo aplicações por injeção, *spray*, extrusão e bombeamento, solicita diferentes características reológicas. Além dessa variedade, deve-se levar em consideração o tempo que o cimento leva para endurecer, pois torna a reologia desses materiais ainda mais complexa (BETIOLI, *et al.*, 2009).

De acordo com Machado (2002) a maioria dos corpos reais não se comportam nem como sólidos e nem como líquidos ideais e sim parcialmente como viscosos e elásticos, ou seja, apresentam comportamento entre o líquido e o sólido ideal. Vários materiais utilizados na atualidade assumem tal comportamento, sendo assim denominados viscoelásticos, podendo ser considerado nessa categoria a pasta cimentícia.

Os fluidos e seus comportamentos são definidos como newtonianos e não newtonianos. Os fluidos newtonianos possuem sua relação tensão de cisalhamento e deformação constante e, por serem independentes do tempo, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Já os fluidos não newtonianos possuem a tensão de cisalhamento não linear à taxa de deformação, e a velocidade do fluido não é constante quando submetida a determinada pressão e temperatura (FOX, 1998).

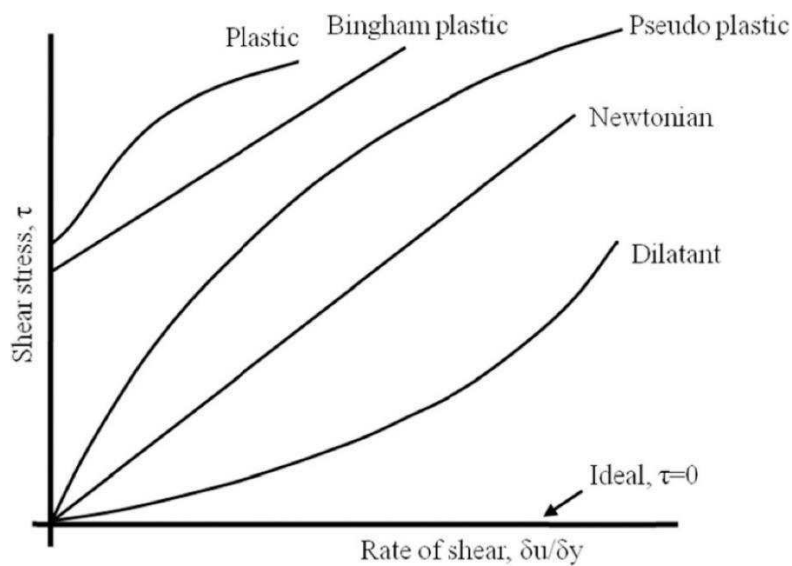
As pastas compostas por materiais cimentícios podem ter sua consistência alterada ao longo do tempo, assim como as argamassas e concretos, devido principalmente à ação de hidratação do cimento (BARBOSA, 2011). As propriedades das pastas cimentícias, como a resistência mecânica, podem sofrer modificações no instante da mistura dos materiais componentes e da relação água/aglomerante, havendo, assim, a possibilidade de modificação do teor de água para manter a fluidez necessária (BETIOLI, 2009).

Há diversos modelos reológicos que tencionam descrever o comportamento do fluido, tal qual seu fluxo. Alguns estudos, como o de Nehdi e Rahman (2014), retratam a capacidade de prever com precisão a deformação das pastas de cimento através de

modelos reológicos que demonstram os fenômenos que ocorrem no intermediário entre os estados sólido-elástico e o fluido viscoso.

Grandes diferenças de comportamento podem ser mostradas pelos fluidos quando submetidos às tensões ou *stress*. Os fluidos em que o valor da viscosidade dinâmica (μ) é constante, são os fluidos que obedecem à lei de Newton, conhecidos por newtonianos. Assim, a tensão de cisalhamento é linearmente dependente do gradiente de velocidade (SLEIGH, *et al.* 2009). Os fluidos não newtonianos, que não obedecem às leis de Newton, são subdivididos em categorias baseadas na relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido. Essas categorias são ilustradas na figura 2.

Figura 2: Tensão de cisalhamento vs taxa de tensão de cisalhamento



Fonte: Sleigh and Noakes, 2009.

Os fluidos que apresentam comportamento newtoniano, apresentados na Figura 2, é expresso pela equação 1.

$$\tau = \mu \gamma \tag{1}$$

onde, τ é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade e γ a taxa de cisalhamento.

Já os fluidos não newtonianos como Binghamiano, pseudoplásticos e dilatantes não possuem uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento como ilustra a Figura 2.

Segundo Antunes (2005), as pastas e as argamassas, apresentam um comportamento de fluido não-newtoniano (pseudoplástico), exibem uma viscosidade que

varia com a tensão aplicada e só conferem deformação significativa a partir de uma tensão de escoamento ou crítica. As pastas de cimento apresentam propriedades reológicas bastante ajustáveis ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, desde que respeitados certos limites de proporção água/cimento.

O modelo de Bingham generalizado define o fluido através dos parâmetros tensão de escoamento inicial (τ_0) e a viscosidade o modelo de Bingham é definido, demonstrado na equação 2.

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (2)$$

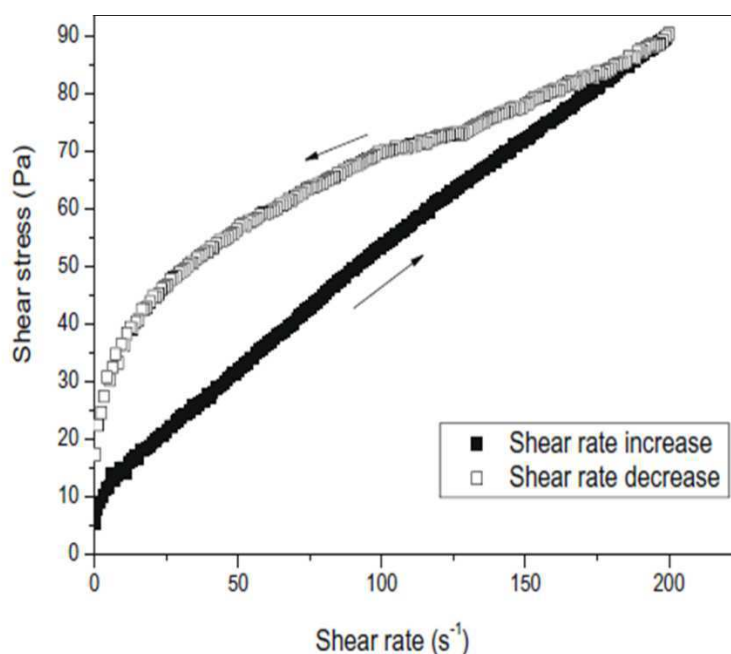
Segundo FERRARIS *et al.*, (2001) existe duas possibilidades para a determinação dos parâmetros reológicos que definem o modelo Bingham:

- I. A tensão aplicada ao material é elevada lentamente medindo assim a taxa de cisalhamento. No momento em que a tensão aplicada for alta o suficiente para que o fluido escoe a tensão de escoamento é medida. A viscosidade plástica é determinada através da inclinação da reta acima do ponto da tensão de escoamento, ilustrado na equação 2.
- II. A tensão é medida através de uma aceleração da taxa de cisalhamento e depois uma desaceleração desta. Gerando o gráfico do comportamento do fluido através da relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, a tensão de escoamento é definida onde o ponto de interseção dessa taxa é zero, e a inclinação da curva acima deste ponto é a viscosidade plástica.

A partir do método tipo II é possível traçar a curva da tensão de cisalhamento vs a taxa de cisalhamento como ilustra a Figura 3 com uma curva decorrente do aumento da taxa de cisalhamento e outra da diminuição dela. De tal forma é possível observar os ciclos de histereses, o comportamento tixotrópico e o nível de homogeneização das pastas cimentícias (JANOTKA *et al.* 2009).

De acordo com a definição existente, uma diminuição paulatina na viscosidade sob tensão de cisalhamento seguida por uma recuperação gradual da estrutura do fluido quando a tensão é removida é denominado de tixotropia. O fenômeno contrário, anti-tixotropia, ocorre quando há um aumento na viscosidade antes da recuperação (BARNES, *et al.* 1989).

Figura 3: Ciclo de histerese da pasta de cimento



Fonte: (JANOTKA *et al.* 2009).

Na Figura 3, a aceleração da taxa de cisalhamento é denominada de *Shear rate increase* e a desaceleração de *Shear rate decrease* e a tensão de cisalhamento é apresentada como *Shear stress*.

2.3.FATORES QUE INFLUENCIAM NA REOLOGIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

A variação da viscosidade pode ser significativamente afetada por determinados fatores além da taxa de cisalhamento, como temperatura, pressão e tempo de cisalhamento, podemos, assim, destacar as variáveis que a viscosidade é dependente (BARGHIGIANI, 2013).

Fatores que também podem influenciar o comportamento reológico do material cimentício são: relação água/cimento; fatores químicos e mineralógicos como composição do cimento e suas modificações estruturais devido a processos de hidratação; condições de mistura tais como taxa; tipo de misturador; condições de medição como instrumentos; e procedimentos experimentais e presença de aditivos (FERRARIS; *et al.*, 2001; PAPO; PIANI, 2004; SENFF; *et al.*, 2010).

As características físicas das partículas dos minerais que são adicionados à mistura, como forma, dimensão e textura superficial, são as principais causas dos impactos negativos acarreados na trabalhabilidade da mistura. Essas características

podem influenciar de forma significativa nas propriedades reológicas da mistura no estado fresco, principalmente a fluidez e coesão (SENN; HOTZA; REPETTE, 2010; PIOVEZAM; MELEIRO; ISA, 2008; LIBORIO; CASTRO, 2004).

As características reológicas das suspensões podem ser afetadas por diversos fatores, entre eles: concentração volumétrica de sólidos, características do meio líquido, temperatura, tempo decorrido desde o início e características físicas das partículas como distribuição granulométrica, densidade, morfologia, área superficial e rugosidade, e pelo estado de homogeneização (OLIVEIRA et al., 2000).

Segundo Santos (1992) e Barnes, *et al.* (1989), o formato do grão influencia diretamente na viscosidade, misturas com alto volume de grãos não esféricos concentrados ocasionam entre si ligações que retêm a água e conseqüentemente aumenta a viscosidade.

2.4.ADIÇÕES MINERAIS

O grande crescimento da indústria de aditivos e adições para concreto nos últimos 50 anos se dá devido ao reconhecimento de que as propriedades do concreto nos estados frescos e endurecidos podem ser modificadas com a adição de determinados materiais às misturas.

Aditivos e adições são considerados como materiais que não sejam agregados, cimento e água, e que imediatamente antes ou durante a mistura, são adicionados à dosagem do concreto. Na atualidade, contempla-se os inúmeros benefícios que o uso desses materiais no concreto possui, possibilitando diferentes aplicações (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Muitos benefícios são conseqüências do uso das adições minerais em matrizes cimentícias, entre eles se destacam os econômicos e os ambientais tendo em vista que diminuem o consumo de cimento e as emissões de CO₂ associadas à sua produção (ISAIA; GASTALDINI, 2004), acarreta também uma evolução no comportamento mecânico promovida pela reação pozolânica e efeito fíler (SILVA *et al.*, 2005).

Segundo Lotthenbach (2011), no âmbito técnico-científico, as adições minerais ativas exercem influência sobre a cinética de hidratação do cimento Portland e, através de atividade química, formam produtos hidratados secundários. Conseqüentemente, a microestrutura da matriz hidratada é alterada, principalmente no que se refere ao

refinamento dos poros, o que promove, na maioria das vezes, a durabilidade das obras civis efetivadas com estes materiais ligantes.

Uma das primeiras propriedades a sofrer alterações devido às adições de minerais, no estado fresco, é a trabalhabilidade, ou seja, o grau do esforço exigido para o manuseio e manipulação do fluido. Segundo Lacerda e Helene (2005) os concretos estudados com adição mineral apresentaram uma melhora da trabalhabilidade comparados com um de referência devido à presença de um material com finura elevada em quantidade adequada e às propriedades intrínsecas referentes a cada tipo de adição.

Conhecidos por Pozolanas, os materiais que possuem sílica ou sílica e alumina e que contêm pouco ou nenhum valor cimentício, reagem com hidróxido de cálcio na presença de água, gerando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto da reação de hidratação que possui propriedades cimentícias (MIRANDA, 2008). O efeito físico de suas partículas, conhecido como efeito filler, fundamenta-se nos preenchimentos dos vazios formados pelos grãos maiores que 35 centímetros, acarretando, assim, benefícios à microestrutura e às propriedades mecânicas do compósito (HOFMANN, 2001).

Além da sílica, outros resíduos podem ser considerados pozolanas, como já citado por Vieira (2005), os resíduos de tijolos cerâmicos e os resíduos de caulim que se mostram com elevado potencial para assumir tal consideração. No estado da Paraíba há muitas fábricas de tijolos cerâmicos e indústrias de caulim, as quais geram muitos resíduos que ficam sem uso na maioria das vezes (SANTOS, 1992).

2.4.1. Caulim

O caulim vem se difundindo no ramo da construção como adição pozolânica. É tido como material pozolânico de ótima qualidade após passar por um tratamento térmico, após esse procedimento o mineral passa a ser chamado de metacaulim (MC), e tem sido bastante utilizado como adição mineral em argamassas e concretos de cimento Portland.

Muito difundido, também, está o uso de argilas calcinadas como materiais cimentícios. Mesmo sendo uma prática bem antiga, discussões ainda são levantadas na literatura na aplicação de concretos e argamassas. Segundo Santos (1992) as argilas mais utilizadas como material pozolânico são as caulínicas, as montmorilonitas e as ilitas. O uso dessas argilas em concretos e argamassas de cimento Portland vem se popularizado nos últimos anos (SHVARZMAN et al., 2003; SIDIQUE E KLAUS, 2009). As principais razões para o uso desses minerais ter ganhado evidência recentemente são a facilidade de

serem encontrados e o enriquecimento que causam nas características de argamassas e concretos, entre elas está a redução da porosidade e o aumento de resistências (SABIR *et al.*, 2001).

A partir da calcinação, entre 600°C e 900°C, de argilas como cauliniticas e os caulins deriva-se o metacaulim, uma adição mineral aluminossilicosa. Alguns pesquisadores tendem a distinguir entre o metacaulim e o metacaulim de alta reatividade (MCAR), devido à maior finura do MC de alta reatividade (BARATA, 1998).

No trabalho de Oliveira e Barbosa (2005) foi estudada para três temperaturas distintas (700°C, 800°C e 900°C) a atividade pozolânica de um caulim calcinado e duas finuras (passante na peneira nº 200 e 325). O trabalho mostrou que o metacaulim que apresentou melhor desempenho quando substituído parcialmente pelo cimento Portland foi o submetido a temperaturas entre 700°C e 800°C e que quanto mais fino melhor.

2.4.2. *Resíduo de tijolo cerâmico moído*

Compreende os materiais utilizados na construção civil, telhas, tijolos maciços, tubos para saneamento, green wall, elementos vazados e argila expandida, como cerâmica vermelha e recebe essa nomenclatura não apenas por sua coloração, mas também pela presença de compostos ferrosos (CARDOSO, *et al.*, 2010).

Diversos estudos feitos constataram no ganho de resistência mecânica de argamassas que tiveram substituição do cimento pelo resíduo de tijolo cerâmico moído (RTCM). Carvalho (2016) afirma que foi possível obter uma argamassa de alta fluidez e resistência à compressão superior a 20 MPa aos 14 dias com um teor de 20 % de substituição do cimento por resíduo cerâmico. Já Carneiro (1999) limitou a substituição em 10% na argamassa, onde a argamassa com a primeira substituição apresentou um ganho de resistência da ordem de 19%.

Destarte, este trabalho objetiva analisar a influência do resíduo de tijolo cerâmico moído (RTCM) e dos três tipos de metacaulim (MC) no comportamento reológico de pastas cimentícias, utilizando o método de reometria de fluxo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de avaliar o comportamento reológico das pastas cimentícias com adição de diferentes minerais, como três tipos de metacaulins, sendo um destes calcinado e resíduo de tijolo cerâmico moído foram elaboradas doze amostras com diferentes porcentagens de cimento Portland CP V e de adições minerais.

3.1.MATERIAIS

Para a realização dos ensaios, os materiais utilizados estão dispostos na tabela 1, assim como sua origem e descrição.

Tabela 2: Materiais e origem/descrição

Material	Observações/descrição
Cimento Portland	CP V ARI da marca LafargeHolcin
Água	Proveniente da rede pública de abastecimento local
Metacaulim tipo I	Metacaulim da marca BBM Minérios
Metacaulim tipo II	Mercado local
Metacaulim tipo III calcinado	Região de Juazeirinho
Resíduo de tijolo cerâmico moído	Indústria cerâmica do estado da Paraíba

FONTE: Elaborado pelos autores, 2019.

3.2.MÉTODOS

O procedimento de ensaio pode ser dividido em três etapas: caracterização dos materiais utilizados, dosagem das amostras do CP V com adição dos minerais descritos na tabela 1 e a realização do ensaio de fluxo no reômetro rotacional de placas paralelas.

3.2.1. Caracterização dos materiais

Os materiais serão caracterizados quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

3.2.1.1. Características físicas

A caracterização física do cimento portland (CP V) e dos minerais metacaulim (MC) tipo I e tipo II, metacaulim tipo III calcinado e resíduo de tijolo cerâmico moído (RTCM) se deu a partir dos ensaios de massa específica, massa unitária e área específica (Laurentino, R. N. de A. 2019, Sinhorelli, K. dos S. 2019). Os ensaios de massa específica e de massa unitária foram realizados de acordo com as normas NBR NM 23 (ABNT 2001)

e NBR NM 45 (ABNT 2006) respectivamente. As características citadas acima estão dispostas na tabela 2.

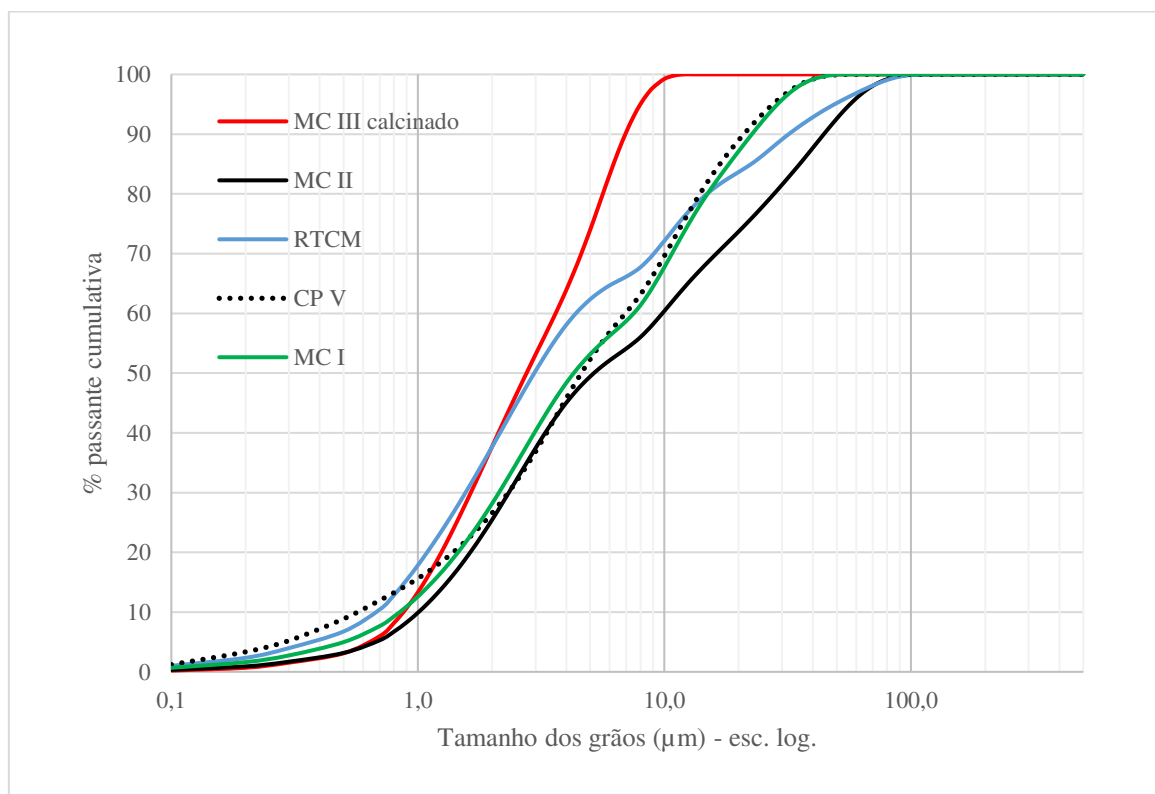
A análise granulométrica do CP V e do MC tipo I se deu por um granulômetro a laser de modelo CILAS 1090 por meio do método dispersão integrada seco. A Figura 4 ilustra as curvas granulométricas do RTCM, do MC tipo I, tipo II e tipo III calcinado em comparação com a do CP V. Estas análises foram realizadas no Laboratório de materiais – UFPB, campus João Pessoa-PB.

Tabela 3: Características físicas dos materiais utilizados

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Área Específica (cm ² /g)
CP V	2,92	-	24.800,00
MC tipo I	2,59	0,714	18.300,00
MC tipo II	2,584	0,491	-
MC tipo III calcinado	2,34	0,409	-
RTCM	2,61	0,700	13.800,00

Fonte: Laurentino, R. N. de A. 2019; Sinhorelli, K. dos S. 2019; autor, 2019.

Figura 4: Granulometria do CP V, dos três tipos de MC e do RTCM



FONTE: Elaborado pelos autores (2019).

Pode-se observar através da curva granulométrica ilustrada pela Figura 4 o CP V e o MC tipo I apresentam partículas com tamanho máximo de 50 μm . Aproximadamente 80% das partículas do CP V apresentam tamanho mínimo de 0,57 μm e máximo de 21,01 μm . Já o MC tipo I, cerca de 80% das partículas estão compreendidas entre 0,84 μm e 22,66 μm

O RTCM apresenta um diâmetro médio de 10,46 μm . A partir da Figura 4 observa-se que para 10% da amostra o tamanho identificado dos grãos é menor que 0,7 μm , 50% são menores que 3 μm e 90% são menores que 32 μm . Semelhante análise para o MC tipo II, também ilustrado na Figura 4, observa-se que a amostra possui um diâmetro médio de 8,57 μm , 10% das partículas são menores que 0,8 μm , 50% são menores que 4,3 μm e 90% são menores que 23 μm .

A Figura 4 também ilustra a granulometria do MC tipo III calcinado, respectivamente, observa-se que 90% das partículas apresentam tamanho menor que 6,95 μm , 50% possuem tamanho menor que 2,76 μm e 10% tamanho menor que 0,87 μm , o diâmetro médio das partículas foi 3,43 μm .

3.2.1.2. Características químicas

A composição química, indicada na tabela 3, do cimento (CP V) e do MC tipo I foi determinada através do espectrômetro de fluorescência de raios-x em um equipamento Shimadzu EDX-90, e a composição química do MC tipo II foi determinada pelo mesmo equipamento, porém de modelo XRF-1800.

Tabela 4: Composição química por fluorescência de raio-x (% em massa) do CP V, MC tipo I, tipo II, tipo III e do RTCM

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SO ₃	SrO	outros
CP V	16,38	5,58	3,38	66,94	1,50	1,68	0,03	0,25	4,08	0,07	0,10
MC tipo I	49,74	36,74	7,24	0,57	1,63	1,83	0,04	1,71	0,23	0,02	0,25
MC tipo II	53,65	31,79	9,89	0,12	1,17	0,65	-	1,84	1,84	-	0,58
MC tipo III	65,03	31,37	0,69	-	-	1,41	-	-	0,21	0,06	0,019
RTCM	56,49	24,18	12,15	0,21	2,4	0,74	-	2,07	-	-	0,42

FONTE: Laurentino, R. N. de A. 2019, Sinhorelli, K. dos S. 2019, autor, 2019.

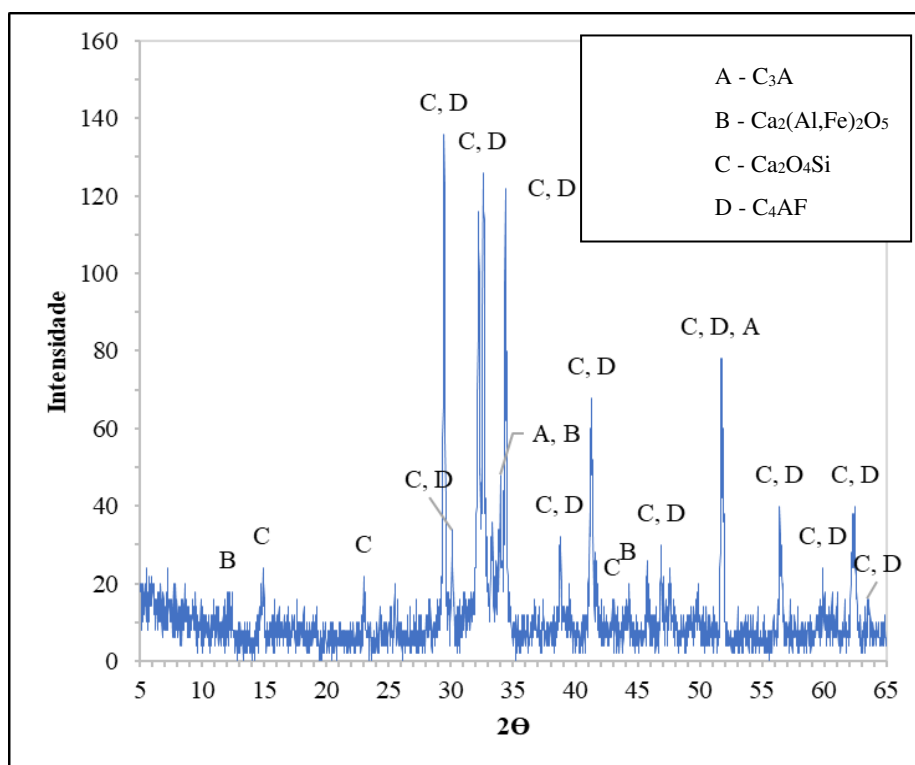
Em conformidade com os resultados da tabela 3, a composição química do cimento está dentro do limite de suas especificações conforme a NBR 5733 (ABNT, 1991) quanto ao seu teor de MgO que é 1,5%, menor que 6,5%.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), pode-se analisar através dos dados do MC tipo I e tipo II e tipo III em seu estado natural que os teores de SiO₂, Al₂O₃ e F₂O₃ somam mais que 70%, e possui apenas 0,23%, 1,84% e 0,21%, respectivamente, de SO₃, menor que 4%, podendo assim ser considerado material pozolânico.

3.2.1.3. Características mineralógicas

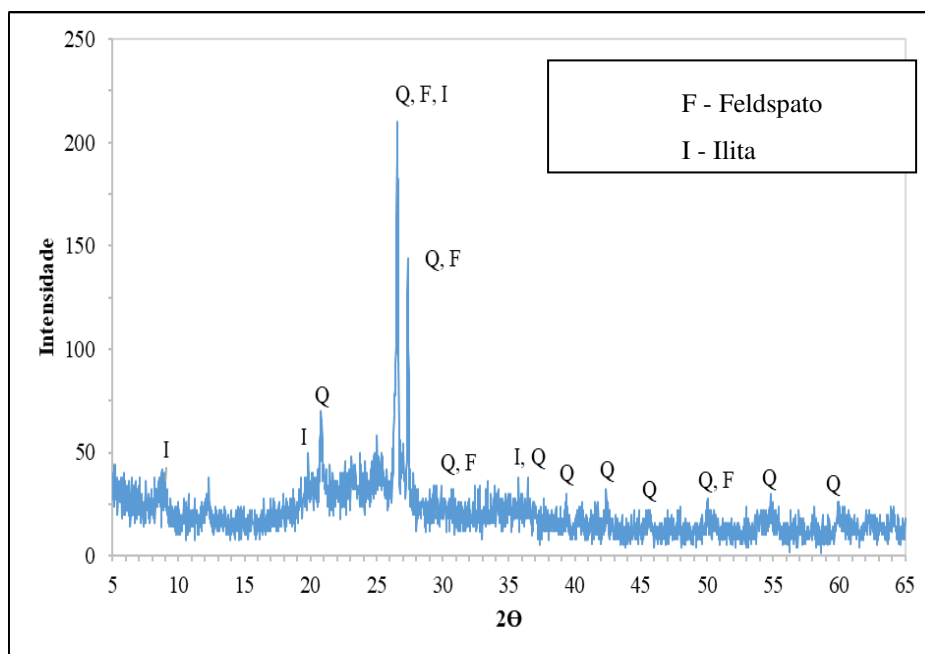
Por meio da técnica de difração de raios-x (DRX) foi estabelecida as características mineralógicas dos materiais. Para o CP V e o MC tipo I usou-se equipamento Shimadzu modelo XRD 6000 sob as seguintes condições de ensaio: velocidade de leitura de 2°/min num intervalo de 5° a 65° 2 θ a um passo angular de 0,02° 2 θ , radiação Cu, com raios-x em 40kV e 30mA. Através do software MDI JADE 5.0 foi possível realizar a identificação dos picos. Já o DRX do MC tipo II utilizou-se o equipamento Siemens Bruker modelo D5000 com as seguintes especificações: velocidade de leitura de 10/min num intervalo de 50 a 700 2 θ a um passo angular de 0,020 2 θ , radiação CuK α de comprimento de onda $\lambda = 1.5418$ com raios-x em 30kv e 30mA, e para a identificação dos picos foi utilizado o software X'Pert HighScore Plus 2.0. As Figuras 5, 6, 7 e 8 ilustram os DRXs do CP V, do MC tipo I, tipo II e do RTCM respectivamente.

Figura 5: Difração de raios-x do CP V



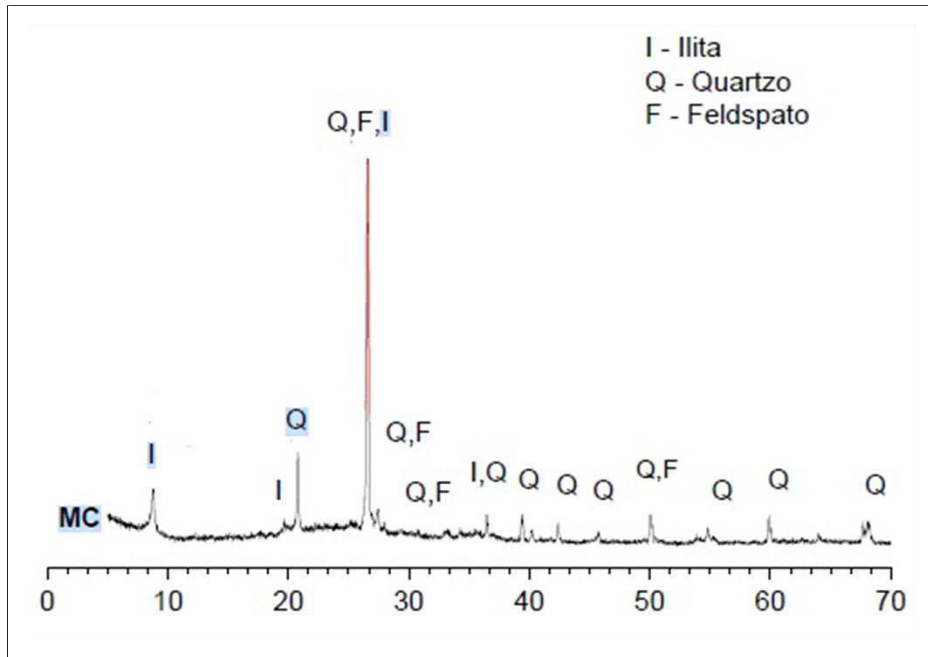
FONTE: Laurentino, R. N. de A. 2019.

Figura 6: Difração de raios-x do MC tipo I



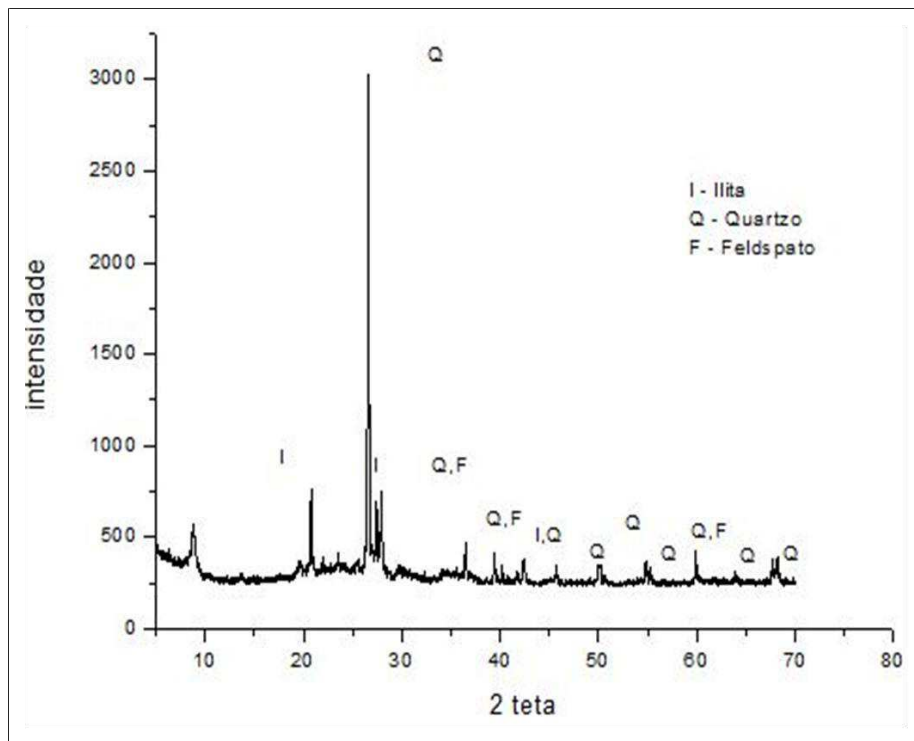
FONTE: Laurentino, R. N. de A. 2019.

Figura 7: Difração de raios-x do MC tipo II



Fonte: Sinhorelli, K. dos S. 2019, autor, 2019.

Figura 8: Difração de raios-x do RTCM



Fonte: Filho, J. S. A (2018)

Ao analisar as difrações de raios-x ilustradas pelas Figuras 5, 6 e 7 observa-se que no CP V as fases constituintes que mais se destacam é a silicato de cálcio ($\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$) e a ferro-aluminato de cálcio (C_4AF), o MC tipo I e tipo II são compostos em sua grande

maioria por quartzo, outras fases como feldspato e ilita também foram detectadas pelo DRX. É possível identificar um halo entre 20 e 30° (2 θ) indicando certa amorficidade do material.

Percebe-se que o RTCM, através da Figura 8, apresenta picos mais intensos que os tipos I e II de MC. Ambos os materiais são compostos majoritariamente por quartzo, no entanto, também apresenta fases como ilita e feldspato.

3.2.2. Dosagens das amostras

As dosagens das amostras foram feitas a partir de substituição do CP V por 10%, 15% e 20% do total do aglomerante, e fixou-se a relação 0,5 de água para obter as misturas dispostas na tabela 4. A amostra 0 é composta de 100% de CP V a qual foi usada como modelo.

Tabela 5: Ensaios de caracterização

Amostra	Porcentagem de mineral em substituição
1	90% Cimento Portland + 10% MC tipo I
2	85% Cimento Portland + 15% MC tipo I
3	80% Cimento Portland + 20% MC tipo I
4	90% Cimento Portland + 10% MC tipo II
5	85% Cimento Portland + 15% MC tipo II
6	80% Cimento Portland + 20% MC tipo II
7	90% Cimento Portland + 10% MC tipo III calcinado
8	85% Cimento Portland + 15% MC tipo III calcinado
9	80% Cimento Portland + 20% MC tipo III calcinado
10	90% Cimento Portland + 10% RTCM
11	85% Cimento Portland + 15% RTCM
12	80% Cimento Portland + 20% RTCM

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor compreensão dos resultados e facilidade de análises dividiu-se as amostras em três grupos, detalhados na tabela 5, a seguir.

Tabela 6: Detalhes das amostras

Grupo	Porcentagem de adição de mineral
1	10%
2	15%
3	20%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

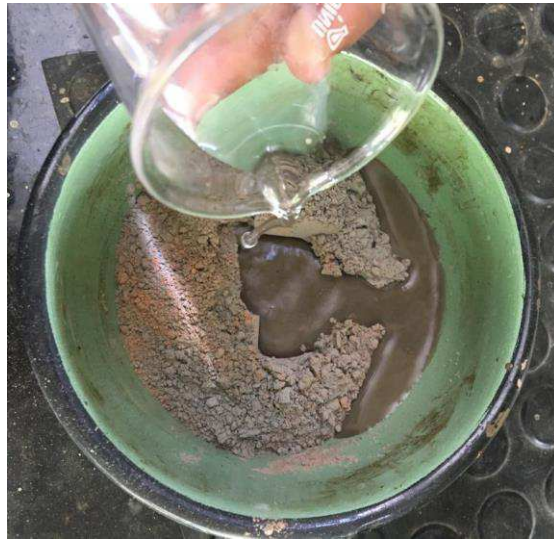
Foi pesado as porcentagens de cada material (Figura 9) 40% de CP V e 10% de MC tipo III calcinado, e separado o material seco das 12 composições descritas na tabela 4 em sacos plásticos transparentes. As amostras foram acrescidas de água apenas no momento exato que seria ensaiada para não ocorrer endurecimento da pasta interferindo no comportamento reológico previsto. Fixou-se um curto tempo de 5 a 10 minutos entre a adição da água, ilustrada na Figura 10, para o início do ensaio. Todas as amostras foram preparadas a uma relação de água/aglomerante 0,5 e foram misturadas durante 2 minutos com um agitador mecânico mod. 256, como ilustra a Figura 11, a uma velocidade mínima indicada no misturador.

Figura 9: Pesagem de 80% de cimento e 20% de MC tipo II calcinado



Fonte: Elaborada pelos autores, 2019.

Figura 10: Adição de água a uma relação água/aglomerante 0,5



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 11: Misturador mecânico mod. 256

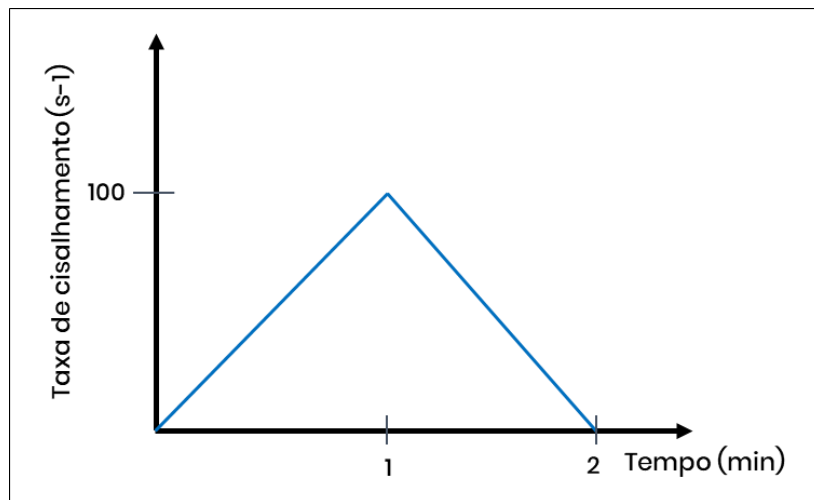


Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

3.2.3. *Ensaio de fluxo*

Para o ensaio de reologia de fluxo foi utilizado como base o método denominado de rampa, ilustrado na Figura 12, com modificação no tempo de aceleração e desaceleração a taxa de cisalhamento que foi crescente de $0s^{-1}$ a $100s^{-1}$ durante 1 minuto e decrescente de $100s^{-1}$ a $0s^{-1}$ durante 1 minuto (BETIOLI et. al, 2009). O ensaio completo no equipamento durou 2 minutos para cada amostra.

Figura 12: Rampa de 0 a 100s^{-1} em 1 minuto e até 0s^{-1} em mais 1 minuto



Fonte: BETIOLI et. al, 2009

O comportamento reológico da pasta, apresentada na Figura 13, e suas características como viscosidade aparente, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento foi medida através do equipamento Discovery HR-1 hybrid rheometer serial: v4.5.0.42498, ilustrado na Figura 14, a uma temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. O reômetro encontra-se disponível no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande.

As placas paralelas possuem 25 milímetros de diâmetro e um espaçamento de 1 milímetro de distância entre elas. Para a realização do ensaio, uma fita adesiva texturizada foi colada à placa inferior para fornecer maior aderência entre as placas e a pasta, como ilustra a Figura 15, conforme utilizado por Betioli et al (2009).

Figura 13: Pasta após processo de mistura



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 14: Reômetro rotacional de placas paralelas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Revestimento texturizado nas placas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a acomodação da amostra entre a placa superior e inferior rasou-se o excesso e deu-se início ao ensaio. As Figuras 16 e 17 ilustram o descrito, respectivamente.

Figura 16: Acomodação da amostra em cima da fita adesiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17: Excesso da amostra sendo retirado

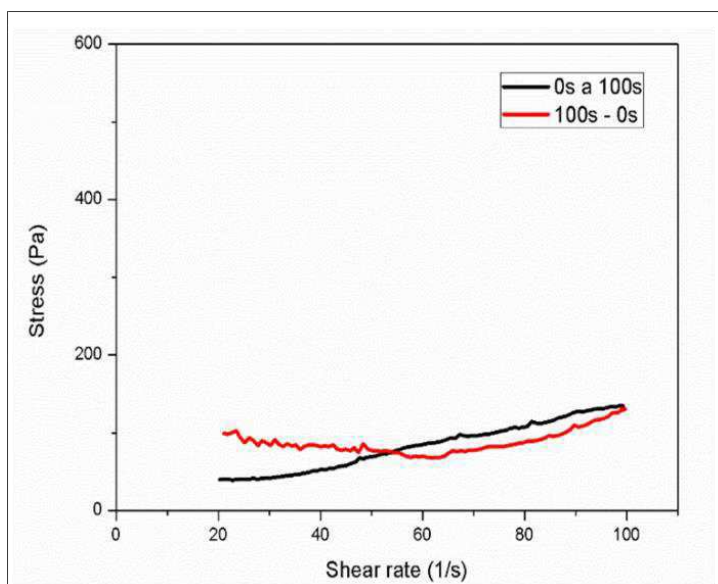


Fonte: Elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

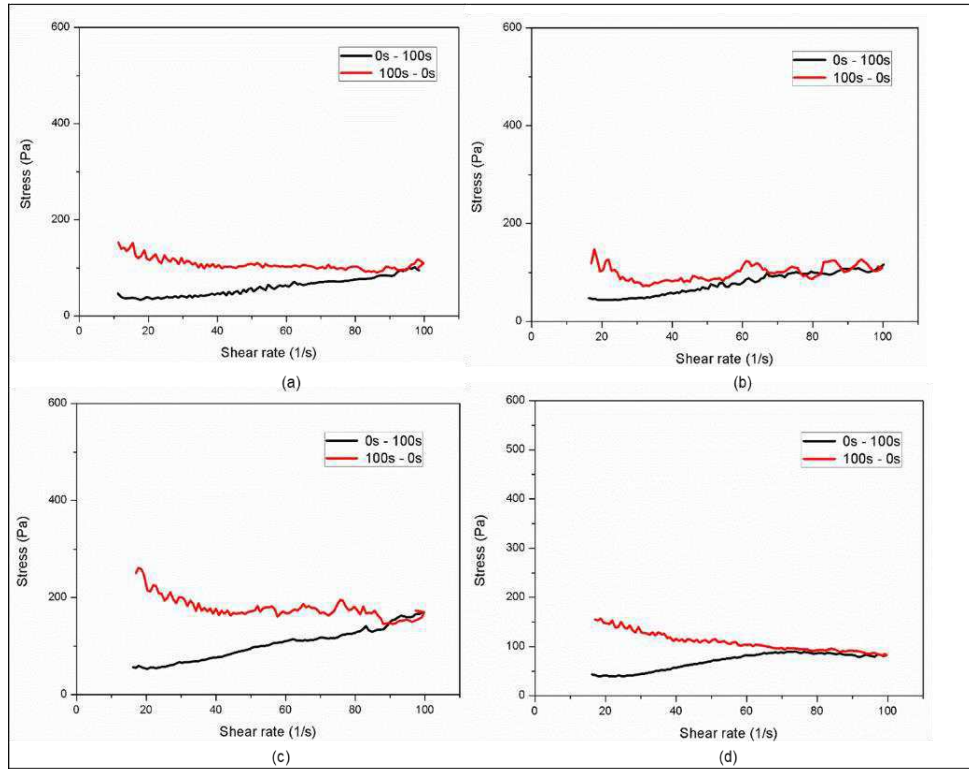
Na Figura 18 está apresentado o resultado da curva de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento da amostra 0, que contém apenas CP V como aglomerante. As Figuras 19, 20 e 21 ilustram os resultados de curva de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento das amostras do grupo 1, 2 e 3 respectivamente, ou seja, as amostras que possuem substituição de CP V por 10%, 15% e 20% de adições minerais.

Figura 18: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da amostra 0



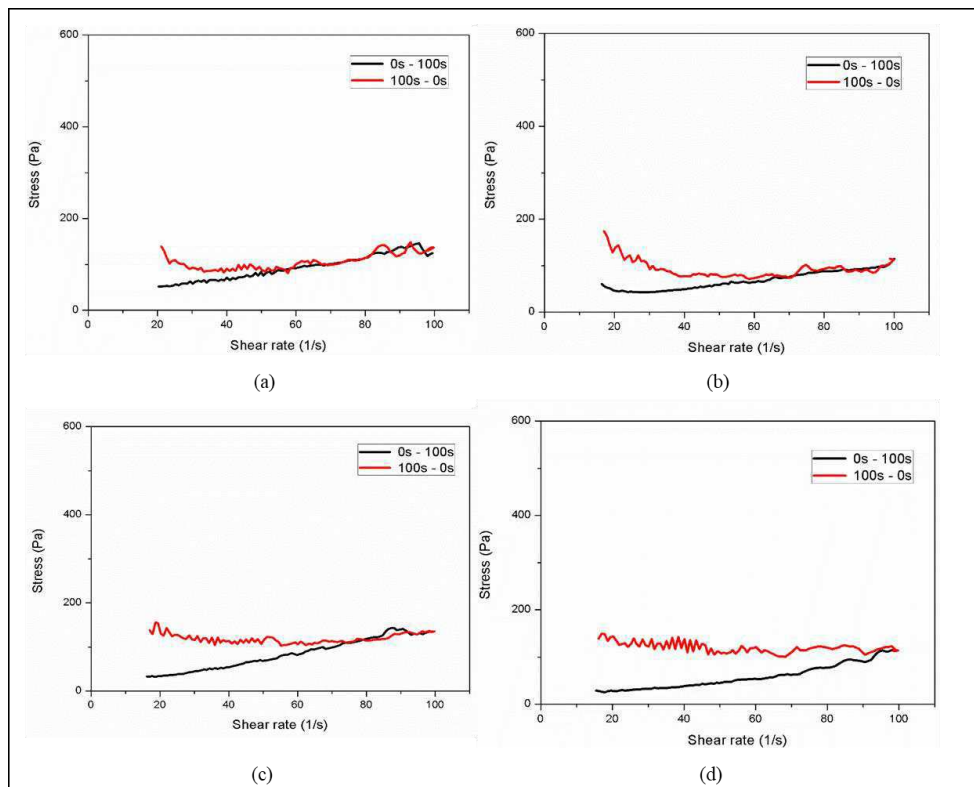
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 19: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 1 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM



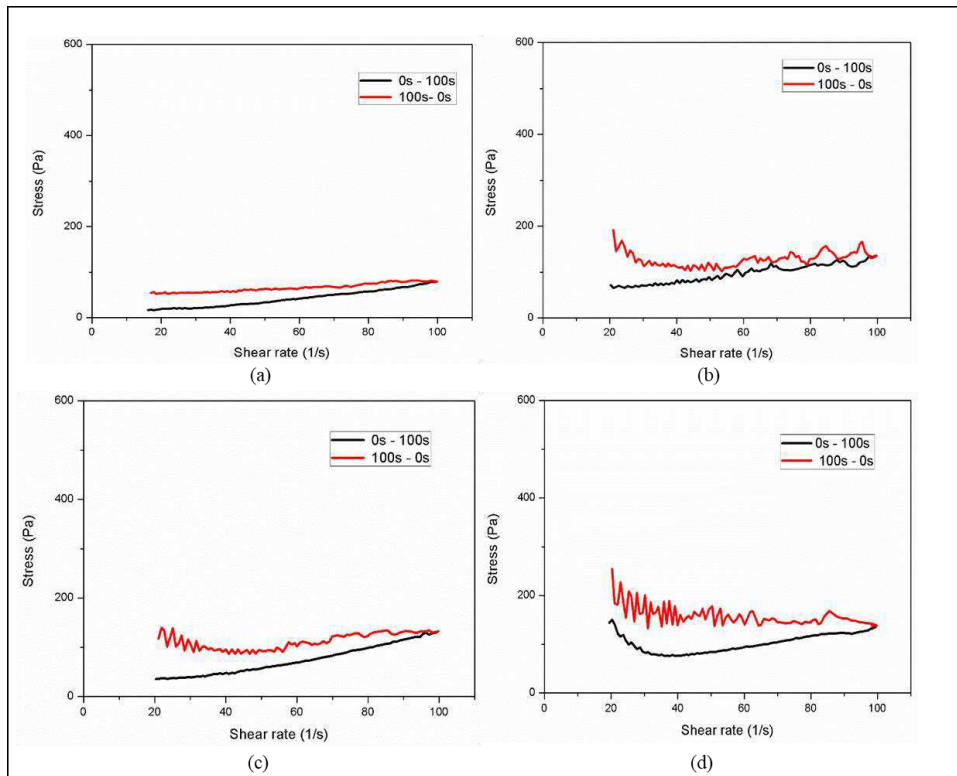
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 20: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 2 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 21: Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento das amostras do grupo 3 – (a) MC tipo I; (b) MC tipo II; (c) MC tipo III calcinado; (d) RTCM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Através de análises das Figuras 18, 19, 20 e 21, observa-se que todas as amostras, incluindo a contendo apenas cimento, necessitaram de uma tensão de cisalhamento inicial (σ_0) para que houvesse o escoamento. O comportamento não linear das curvas mostra uma tendência para o modelo Herschel Bulkley, também conhecido como Bingham generalizado, caracterizando-se como fluido não newtoniano. O mesmo ocorreu no trabalho de Azeredo *et al*, 2017.

A amostra modelo, contendo apenas CP V ilustrada na Figura 18 apresenta o modelo tixotrópico ideal, a curva de aceleração da taxa de cisalhamento se forma por cima da curva de desaceleração (JANOTKA, 2009). As amostras contendo 10% de MC tipo II e tipo III calcinado e 15% dos três tipos de MC apresentaram tal comportamento, mesmo que seja mínimo. As demais amostras, principalmente as do grupo 3, apresentaram um comportamento anti-tixotrópico indicado pela curva de desaceleração da taxa de cisalhamento que se formou em sua totalidade acima da curva de aceleração da taxa de cisalhamento, o mesmo ocorreu no trabalho de Janotka (2009).

Observa-se, de um modo geral, que as amostras que necessitaram de uma maior tensão de cisalhamento inicial foram aquelas contendo MC tipo II e RTCM, ambas do

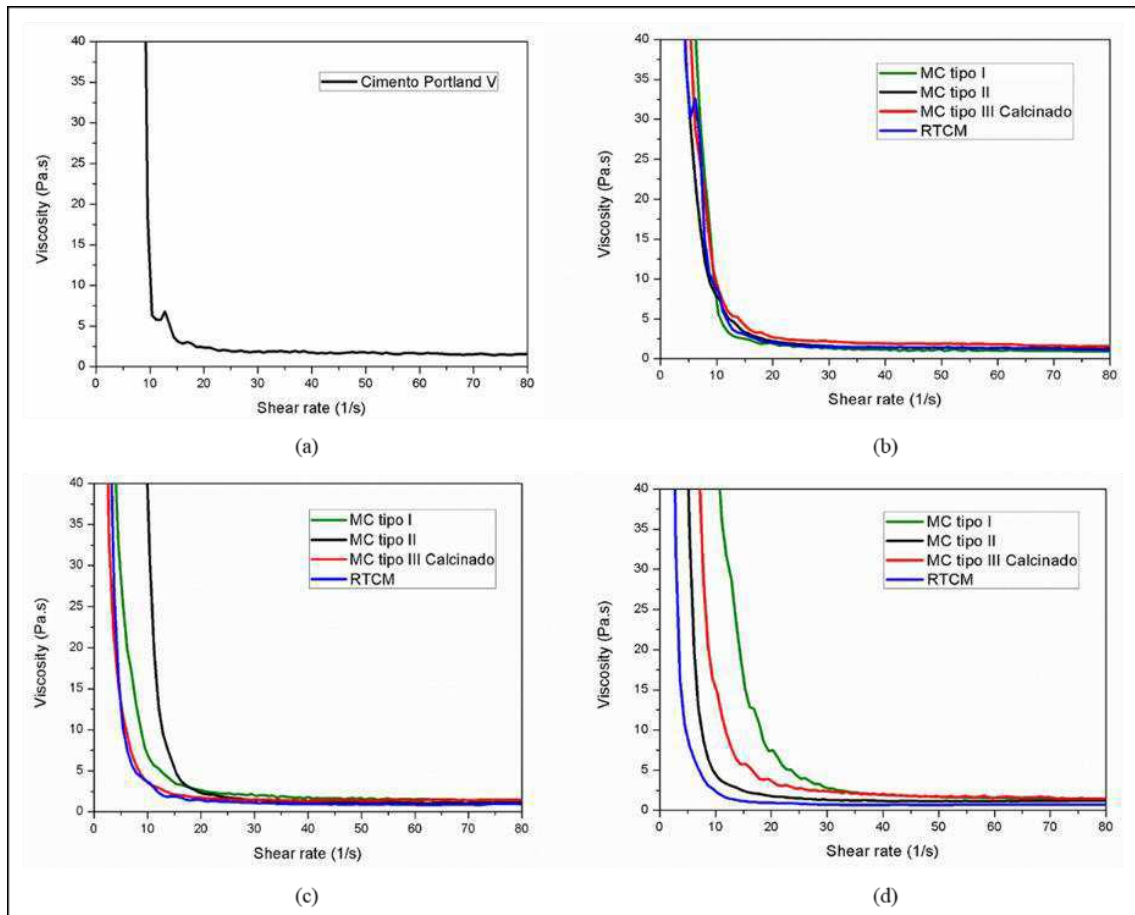
grupo 3, ou seja, uma maior dificuldade para iniciar o escoamento, e isso se dá devido ao maior volume de partículas presentes em tais misturas, uma vez que estas possuem massa unitária consideravelmente maior comparada ao MC tipo III calcinado. Segundo Pedrajas *et al.* (2014), Kashani *et al.* (2014), diversos fatores como a forma e mineralogia do grão, as forças inter-partículas, a rugosidade da partícula, entre outros, influenciam na tensão de escoamento.

A partir das Figuras 19, 20 e 21, pôde-se observar que as amostras do grupo 1 com adição do mineral MC tipo I e do MC tipo III calcinado, do grupo 2 com adição do mineral RTCM e do grupo 3 com adição do mineral MC tipo III calcinado e RTCM obtiveram uma maior área de histerese quando comparadas às demais amostras. Segundo Texeira *et. al* (2014), áreas de histerese pouco significativas podem indicar o estado de dispersão das amostras, ou seja, o processo de mistura foi adequado para obter uma homogeneidade com a quebra desejada de todos os aglomerados.

Tal comportamento é perceptível nas amostras contendo MC tipo II e RTCM do grupo 1, as contendo os três tipos de MC do grupo 2 e as contendo MC tipo I e tipo II do grupo 3. Realçando a amostra contendo 15% de MC tipo I que apresentou defloculação desejada comparada às demais amostras, por manifestar a curva de desaceleração da taxa de cisalhamento sobreposta à curva de aceleração desta, semelhante ao trabalho de Janotka (2009).

A Figura 22 ilustra os gráficos da viscosidade aparente vs taxa de cisalhamento da amostra contendo 100% de CP V como aglomerante e das amostras do grupo 1, 2 e 3.

Figura 22: Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento – (a) amostra 100% CP V; (b) amostras do grupo 1; (c) amostras do grupo 2; (d) amostras do grupo 3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Através de análises da Figura 22, é possível observar que em todas as amostras há uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, o que caracteriza caráter tixotrópico da pasta. O mesmo ocorreu nos trabalhos de de Betioli *et al.* [2009] e Teixeira *et al.* [2014].

As amostras do grupo 1 não apresentaram diferenças significativas entre elas na viscosidade, mas analisando grupo 2 observamos que o tamanho dos grãos das amostras está diretamente relacionado com a viscosidade, a amostra com adição de MC tipo II é a que apresenta maior viscosidade em relação às demais amostras.

A amostra contendo MC tipo II no grupo 2 (indicado pela cor preta), apresentou maior viscosidade quando comparada às demais amostras, comprovando o que afirma Oliveira (2000). A viscosidade do fluido pode estar diretamente relacionada com a distribuição granulométrica do material e de acordo com o ensaio de granulometria o MC tipo II é o mineral que possui maior variedade de tamanho dos grãos.

De um modo geral pode-se observar que as pastas com adição mineral do grupo 1 e 2 apresentam maior fluidez, isto é, menor viscosidade, quando comparado à amostra 0, contendo apenas cimento, assim, comprovando que a trabalhabilidade é consideravelmente melhorada devido a presença de uma quantidade adequada de finos, como afirma Lacerda e Helene (2005).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As matrizes, identificadas como modelo Herschel Bulkley, apresentaram uma tensão de cisalhamento inicial para que houvesse escoamento, sendo as amostras contendo adição de 20% de MC tipo II e de RTCM as que solicitaram um maior esforço para que tal escoamento ocorresse, quando comparadas às demais amostras.

A grande maioria das amostras do grupo 1 e 2 apresentaram uma resposta positiva relacionada ao comportamento tixotrópico. De modo geral, as amostras contendo MC tipo II nos três grupos apresentaram áreas de histereses mínimas quando comparadas às demais amostras indicando uma boa homogeneização das partículas.

As adições minerais pozolânicas do grupo 1 e 2, de um modo geral, apresentaram melhores resultados de fluidez quando comparadas ao grupo 3. A viscosidade das amostras do grupo 2 tiveram grande relação com a distribuição granulométricas dos minerais, quando mais uniforme os grãos mais fluidos a pasta, conseqüentemente, melhor trabalhabilidade.

As adições minerais até 15% de substituição do CP V são suficientes para atingir a melhoria desejada nas pastas cimentícias, como trabalhabilidade, devido a fluidez apresentada, baixas tensões de cisalhamento inicial quando comparadas às do grupo 3 (contendo MC tipo II e RTCM mais especificamente).

REFERÊNCIAS

ANTUNES, R.P.N., Influência da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimento de Argamassa, 2005, 162p, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP.

AZERÊDO, A. F. N., Estudo da reologia de pastas e argamassas cimentícias contendo pozzolanas, Chamada universal mcti/cnpq nº 01/2016, Instituto Federal da Paraíba – IFPB.

AZERÊDO, A. F. N., Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais, Tese de doutorado em engenharia civil pela Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

BARATA, M. S., Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção do CAD com materiais disponíveis em Belém, através do emprego de adição de sílica ativa e metacaulim, Tese de D.Sc., PPGEC da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 1998.

BARBOSA, P.M. et al. Determination of rheological parameters of mortar and concrete by alternative techniques. *Ibracon Structures and Materials Journal*, v. 4, n. 3, 2011.

BARGHIGIANI, T. M., Caracterização experimental de pastas cimentícias de alto Desempenho reforçadas com fibras de polipropileno e pva. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Projeto de Graduação do Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, 2013.

BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. F. R. S., *An introduction to Rheology*, 1989 ELSEVIER Science Publishers B.V. All rights reserved, cap. 7.

BETIOLI, A. M. et al. Caracterização Reológica de Pasta Cimentícia: associação de técnicas complementares. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, out./dez. 2009.

CARDOSO, F. A. et al. Characterisation Ofrendering Mortars by Squeeze-Flow and Rotacionalrheometry. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 79-87, 2014.

CARDOSO, F. A. et al. Parallel-Plate Rotational Rheometry of Cement Paste: influence of the squeeze velocity during gap positioning. *Cement and Concrete Research*, v. 75, p. 66-74, 2015.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento - Manual de utilização. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, v. 1, p. 1-29, 2010, ISSN 0103-9830.

CARNEIRO, A. M. P. Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. São Paulo, 1999. 170p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CARVALHO, C. M., (2016) Caracterização de resíduos da indústria cerâmica e seu emprego em argamassas de cimento Portland Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2016.

CASTRO A. L.; LIBÓRIO J. B. L.; PANDOLFELLI V. C., “Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil”, *Revista Cerâmica*, v. 57, pp. 63-75, 2011.

CASTRO, A. L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. 2007. 302f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, D. J. H., Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais, Dissertação de M. Sc., PPGEC/UFAL, Maceió, AL, Brasil, 2006.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze Flow Theory and Applications to Rheometry: a review. *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanical*, v. 132, n. 1/3, p. 149-175, dez. 2005.

FERRARIS, C.; DE LARRAD, F.; MARTYS, N., “Fresh Concrete Rheology: Recent Developments”, *Natl Inst. Stand Technol*, pp. 215-241, 2001

FEYS, D.; KHAYAT, K.H.; KHATIB, R.; How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?, *Cem. Concr. Compos.* 66 (2016) pag. 38–46.

FOX, R.W. McDonald AT. Introdução à mecânica dos fluidos. 4º ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.

HOFFMAN, A., T., 2001, Influência da Adição de Silica Ativa, Relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em

concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas Ambientais e Econômicas do Concreto Com Altos Teores de Adições Minerais: um estudo de caso. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2004.

JANOTKA, I., PUERTAS, F., PALACIOS, M., KULIFFAYOVA, M., VARGA, C., Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 2009.

KASHANI, A.; NICOLAS, R.S.; QIAO, G.G.; DEVENTER, J.S.J.; PROVIS, J.L., “Modelling the yield stress cement-slag-fly ash pastes based on particle size distribution”, *Powder Technology*, v. 266, pp. 203-209, 2014.

KHAYAT, K.H., Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview, *Cem. Concr. Compos.* 20 (1998), pag. 171–188.

LACERDA, C. S. e HELENE, P. R., Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos. *Boletim Técnico/PCC* - no 419, São Paulo, 2005.

LIBORIO, J. B. L; CASTRO, A. L. A Importância da Avaliação Reológica de Pastas Com e Sem Sílica Ativa Para Produção de Concretos Estruturais Com Cimento Portland Para Obras Marítimas. In: SEMINARY AND WORKSHOP FOR OCEANIC ENGINEERING, Rio Grande, 2004. Proceedings... Rio Grande, 2004.

LIMBACHIYA, M., MEDDAH, M. S., OUCHAGOUR, Y. “Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, pp. 439-449, Feb. 2012.

LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R. D., “Supplementary cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, pp. 1244-1256, December 2011.

LUZ, P. M. S. G., Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2019.

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

MARTINS, A. L. P. Estudo das propriedades reológicas do muco brônquico de pacientes sob fisioterapia respiratória. 2004. 70f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MARYLINDA, S. F.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influência do Procedimento de Mistura em Laboratório nas Propriedades de Argamassas. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 111-124, abr./jun. 2013.

MEETEN, G. H. Yield Stress of Structured Fluids Measured by Squeeze Flow. Rheologica Acta, Berlim, v. 39, n. 4, p. 399-408, 2000.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, 1ª ed. tradução para o Português da terceira edição em inglês, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley, São Paulo, 2008.

MIN, B. H., ERWIN, L. JENNINGS, H. M. Rheological Behavior of Fresh Cement Paste as Measured by Squeeze Flow. Journal of Materials Science, v. 29, n. 5, p. 1374-1381, mar. 1994.

MOURA, E. Q. DE R. Estudo do comportamento reológico de ligante modificado por lignina proveniente de pinus. Trabalho de conclusão de curso (TCC) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Engenharia Civil, pag. 39, 2019.

NACHBAUR, L. et al. Dynamic Mode Rheology of Cement and Tricalcium Silicate Pastes from Mixing to Setting. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 2, p. 183-192, fev. 2001.

NEHDI, M., RAHMAN M.A.; “Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction”. The University of Western Ontario; Ontario, Canada, 2004.

NETO, V. F. de S., Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com nanopartículas de óxido de zinco, Dissertação de mestrado pela Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico. Fazendo Arte Editorial. 2000.

ÖZKAN, N. et al. Rheological Analysis of Ceramic Pastes. *Journal of European Ceramic Society*, v. 19, n. 16, p. 2883-2891, 1999.

PAPO, A.; PIANI, L. Effect of Various Superplasticizers on the Rheological Properties of Portland Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, p. 2097-2101, 2004.

PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V.; TALERO, R., “Determination of characteristic rheological parameters in Portland cement pastes”, *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 484-491.

PHAN, T. H.; CHAOUICHE, M.; MORANVILLE, M. Squeeze Flow of Self-Compacting Cement Pastes. In: international symposium on advances in concrete through science and engineering, 2., 2006, quebec. anais... quebec: rilem, 2006.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. Influência da Adição no Comportamento Reológico da Pasta Auto Adensável de Alto Desempenho. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 30, n. 2, p. 155-159, 2008.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. The Influence of Wall Slip on Yield Stress and Viscoelastic Measurements of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 2, p. 205-212, fev. 2001.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J., Metakaolin an calcined clays as pozzolan for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, p. 441-454, 2001.

SANTOS, P. S., *Ciência e Tecnologia de argilas*, 2 ed. rev. amp., São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

SATO, V. Y.; EVANGELISTA, K. T. C.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; TRISTÃO, F. A., Estudo das propriedades reológicas de pastas de cimento de concretos bombeados, In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54., Anais, Maceió: IBRACON, 2012.

SCHULTZ, M. A. Rheological Studies of Fresh Cement Pastes. Illinois, 1991. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cerâmica) – University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991.

SCHULTZ, M. A.; STRUBLE, L. J. Use of Oscillatory Shear to Study Flow Behavior of Fresh Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 273-282, 1993.

SENFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento Reológico de Pastas de Cimento Com Adição de Sílica Ativa, Nanossílica e Dispersante Policarboxílico. Revista Matéria, v. 15, n. 1, p. 12-20, 2010.

SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, G. S. AND SHTER, G. E. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 405-416, 2003.

SIDIQUE, R. E KLAUS, J., Influence of metakaolin on properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science, vol. 43, p. 392-400, 2009.

SILVA, F. G. S. et al. A. Influência dos Efeitos Pozolânico e Microfiller na Resistência à Compressão do Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., Recife, 2005. Anais... Recife: IBRACON, 2005.

SLEIGH, A.; NOAKES, C. An introduction to fluid mechanic: Fluid mechanics and fluid properties. School of Civil Engineering, University of Leeds, 2009.

STEFFE, J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd. East Lansing: Freeman Press, 418p. 1996.

TATTERSALL, G.H.; Banfill PFG. The reology of fresh concrete. Pitman Advanced Pub, p. 347, 1983.

TEIXEIRA, J. E. S. L.; SATO, V. Y.; AZOLIN, L. G.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L., "Study of cement pastes rheological behavior using dynamic shear rheometer", Ibracon, v.7, 6, pp. 922-939, 2014.

VENÂNCIO, P. B. F., Dosagem de argamassa para estaca raiz, Dissertação de M. Sc., PECC/UNB, Brasília, DF, Brasil, 2008.

VIEIRA, A. A. P., Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), UFPB, João Pessoa, 2005.

WINNEFELD, F.; HOLZER, L. Monitoring Early Cement Hydration by Rheological Measurements. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 11., 2003, Durban, Africa do Sul. Anais... Durban: ICC, 2003.