

## AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ADITIVOS NA REOLOGIA DE MATERIAIS ASFÁLTICOS E CIMENTÍCIOS

**Davidson Menezes Dias**

**Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos**

**Jorge Barbosa Soares**

Universidade Federal do Ceará - UFC

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN

### RESUMO

Reologia de concretos asfálticos (e também de misturas finas e de ligantes) tem assumido relativa importância no cenário mundial da Pavimentação. A análise reológica vem sendo usada como ferramenta para apoio à dosagem de misturas asfálticas, uma vez que possibilita avaliar o efeito de modificações na dosagem (e.g. inclusão de aditivos e teor utilizado) no comportamento mecânico do material. Em reologia de asfalto, a propriedade fundamental buscada mais comumente é o módulo complexo em diferentes frequências e temperaturas, simulando em uma faixa maior as condições reais de campo. Enquanto isso, a caracterização reológica de concreto de Cimento Portland (e de argamassas e pastas de cimento) também constituem contribuição valiosa para a tecnologia de construções (edifícios, estradas, barragens, e outras obras de infraestrutura). Com o desenvolvimento de novos aditivos para suprir as demandas tecnológicas emergentes, são necessários métodos mais confiáveis tanto para se determinar aceitabilidade e dosagem dos constituintes, quanto para delinear efeitos de modificações e facilitar o desenvolvimento de novos materiais. Nesse contexto, este trabalho se propõe a avaliar o efeito dos aditivos na reologia de materiais asfálticos e cimentícios buscando uma análise multiescala buscando prever o comportamento de Misturas Asfálticas Completas e Concretos de Cimento Portland partindo da caracterização de seus constituintes.

### 1. INTRODUÇÃO

Esforços têm sido feitos para a previsão de propriedades de materiais complexos a partir da caracterização de seus constituintes. É exemplo dessa abordagem a metodologia SHStS (*Shift-Homothety-Shift in time-Shift*) para previsão do comportamento Viscoelástico Linear (VEL) de Misturas Asfálticas Completas (MACs) a partir da caracterização do ligante constituinte (CAP) (Olard e Di Benedetto, 2003). Em geral, as previsões ligante-MAC produzem boas aproximações, mas não para o caso específico de modificação do CAP com altos teores de polímeros elastômeros, que levam o ligante asfáltico a se comportar como Material Termorreologicamente Complexo (MTC), apesar da MAC se comportar como Material Termorreologicamente Simples (MTS) (Pouget *et al.*, 2012). A razão para tal fato pode ser melhor caracterizada avaliando-se diferentes teores de modificação por polímero, assim como avaliando o efeito dos agregados na reologia da MAC.

Outra abordagem multiescala de previsão é usada para materiais cimentícios. Consiste na metodologia para previsão de incompatibilidades no concreto partindo da caracterização da pasta de cimento. Constituem-se como incompatibilidades as modificações no material que ocasionem redução no calor de hidratação liberado ou retardação do tempo de pega do concreto. A previsão utilizando reologia é possível por meio da sua associação com dados de calorimetria de pastas de cimento (Jang, 2009). O perfil da calorimetria de hidratação da pasta (reação exotérmica) determina qual a evolução de liberação de calor, assim como a eficiência da hidratação e, portanto, de ganho de resistência do material com o tempo, determinado pela reologia. O comportamento do material pode ser avaliado pela reologia rotacional ou método *Squeeze-flow* (Cardoso *et al.*, 2016), tanto em pastas de cimento quanto em argamassas. Este último método simula o material sob extrusão, e ainda permite o estudo da influência dos agregados na reologia (determinação da viscosidade) do material.

### 1.1. Problema de pesquisa

A diferença entre os perfis VEL dos ligantes com altos teores de modificação por polímero (MTC) e das MACs (MTS) aponta para a necessidade de caracterização dessa variação, pondo em foco a análise de diferentes teores de modificação e avaliação do efeito dos agregados na reologia destes materiais.

Quanto ao concreto, o estudo da incompatibilidade na pasta de cimento almeja previsão de alterações na pega e endurecimento do concreto. Dessa maneira, utiliza-se menor quantidade de material e pode-se ensaiar a amostra em um reômetro universal, de menores dimensões do que reômetros para concreto. Parâmetros de forma, textura e granulometria dos agregados têm influência direta na compacidade dos agregados e resistência ao deslizamento entre partículas. Portanto, faz-se necessário o estudo de sua relação com parâmetros reológicos (e.g. viscosidade plástica e tensão de escoamento) dos materiais cimentícios que compõem.

### 1.2 Objetivos

Como objetivos gerais dessa pesquisa estão a identificação de parâmetros dos aditivos poliméricos e dos agregados que mais influenciam na previsão de comportamento reológico da MAC partindo do comportamento do ligante pela metodologia SHStS, e avaliar a influência dos aditivos e agregados na incompatibilidade em materiais cimentícios. São listados a seguir os objetivos específicos da pesquisa:

- Avaliar agregados de diferentes origens geológicas por Processamento Digital por Imagens (PDI) para obter seus parâmetros de forma e textura, e avaliar a relação entre estes e os parâmetros reológicos das MACs;
- Avaliar a influência de diferentes teores de aditivos poliméricos (elastômeros) na reologia de ligantes asfálticos;
- Avaliar agregados de diferentes origens geológicas por PDI para obter os parâmetros de forma e textura dos mesmos, e avaliar a relação entre estes e os parâmetros reológicos dos materiais cimentícios;
- Avaliar a relação entre os dados de calorimetria e propriedades reológicas de pastas de cimento e argamassas com diferentes aditivos, materiais suplementares e teor de álcali com o fim de determinar eventuais incompatibilidades na pasta;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

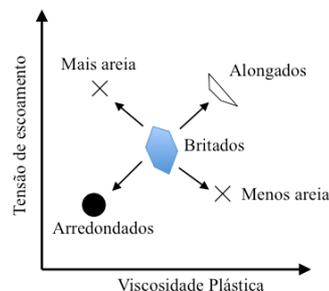
A metodologia de transformação SHStS é definida como uma equação, traduzida graficamente na aplicação de um fator homotético e três fatores de deslocamento na curva Cole-Cole do ligante asfáltico para obtenção da curva correspondente da MAC. Portanto, é pressuposto que o comportamento VEL do ligante tem influência direta na da MAC. Geralmente é associada a metodologia o uso do modelo mecânico 2S2P1D (2 molas, 2 amortecedores parabólicos e 1 amortecedor linear) para obtenção de seus dados de entrada, embora o uso de modelos mecânicos não seja obrigatório (Olard e Di Benedetto, 2003; Di Benedetto *et al.*, 2004).

Pouget *et al.* (2012) observaram que a metodologia SHStS não produz boa previsão em baixas frequências (ou altas temperaturas) para o comportamento VEL de MACs que possuíam ligantes com teores de modificação de polímero acima de 7% (SBS, elastômero termoplástico), devido à inconformidade do ligante com o Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), enquanto as MACs associadas apresentaram conformidade.

Quanto aos materiais cimentícios, no trabalho de Jang (2009), utilizam-se dados reológicos da pasta de cimento para prever a ocorrência de incompatibilidades entre aditivos e o concreto, ou seja, alterações na trabalhabilidade da pasta: tempo de pega (NBR NM 9; NBR NM 65) e/ou desaceleração da liberação de calor na hidratação. Ainda não há uma explicação definitiva para este fenômeno, mas existem fatores chave, sendo os aditivos (superplastificante, melhoradores de resistência, etc.), materiais suplementares (sílica ativa, cal) e variações de teor de álcali no cimento aqueles que precisam ser melhor estudados para melhor compreensão do fenômeno (Jang, 2009).

Existem duas principais configurações de ensaios reológicos em pastas: rotacional, que avalia fluxo e comportamento VEL; *Squeeze-flow*, que avalia o material sob extrusão ou condições de enlogamento. Ambos ensaios podem ser feitos no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). O ensaio de *Squeeze-flow* também é feito em argamassas, em um aparelho específico para tal fim instalado em uma prensa hidráulica. Para ambas escalas, uma amostra cilíndrica do material é puncionada entre superfícies paralelas de forma a ocasionar fluxo do material por extrusão. Este teste cria condições similares àquelas em que os materiais são aplicados (Cardoso *et al.*, 2016).

Segundo Jiao *et al.* (2017), o tipo de agregado influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto. Em contraponto, o autor defende que as características químicas não possuem grande influência, embora estudos como Lucas e Soares (2018) apontem na direção contrária. Em geral, maior teor de agregados graúdos produzem concretos com maior resistência ao fluxo, enquanto que o maior teor de areia leva a maior tensão de escoamento (maior demanda de água), porém menor viscosidade plástica (menor atrito entre partículas). Reógrafos vetorizados podem ser utilizados para mapear os efeitos destes parâmetros na reologia do concreto. Com eles, é possível somar os efeitos de diferentes modificações para obter o efeito final na reologia do concreto (Figura 1).

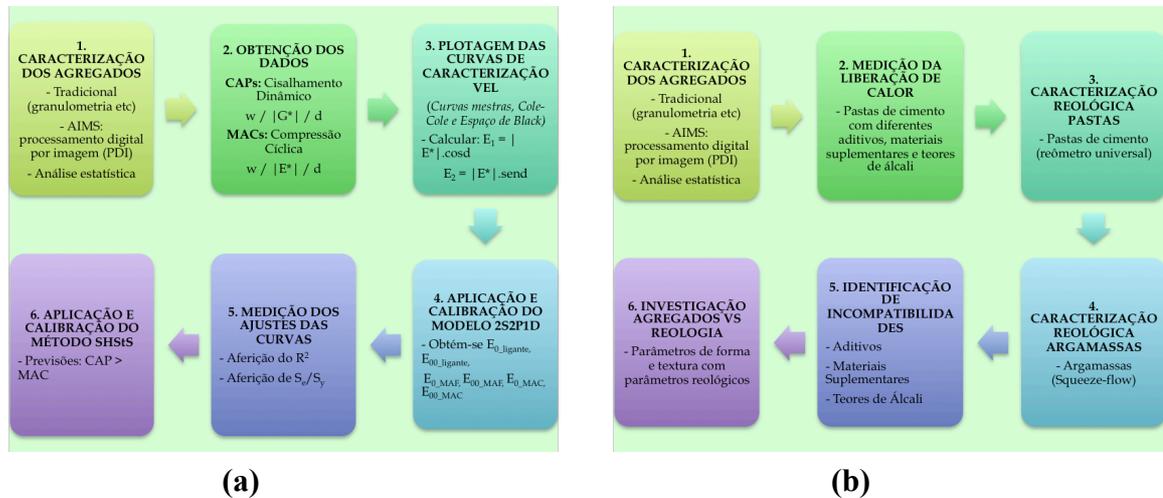


**Figura 1:** Reógrafo sobre variação das características reológicas do concreto com características dos agregados, Adaptado de Jiao *et al.* (2017)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para facilitar a compreensão deste plano de pesquisa, são mostradas na Figura 2 (a) e (b) as metodologias a serem seguidas para estudo dos materiais asfálticos e cimentícios, respectivamente. Inicialmente faz-se necessária a caracterização do agregado, tanto tradicional quanto por meio do PDI, utilizando o equipamento AIMS (*Aggregate Image Measurement System*). Segue, então, para os materiais asfálticos, com a obtenção dos dados reológicos dos ligantes e das MACs, por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e da prensa hidráulica (UTM), respectivamente. Ainda nesta etapa é identificada a influência dos diferentes teores de SBS (0%, 3%, 6% e 8%) na reologia das duas escalas, e também dos agregados na reologia da MAC. Ajustando gráficos de caracterização VEL com base no

modelo 2S2P1D, e medindo-se o ajuste das curvas, procede-se a previsão ligante-MAC com a metodologia SHStS.



**Figura 2:** (a) Metodologia para estudo reológico dos materiais asfálticos; e (b) cimentícios.

Para os materiais cimentícios, é determinado o perfil de calor de hidratação na pasta de cimento, utilizando um calorímetro de condução isotérmica, avaliando o efeito dos diferentes aditivos, materiais suplementares e teores de álcali. A existência de incompatibilidades é determinada uma vez observado diminuição do calor de hidratação em relação a pasta sem modificação, ou alteração do tempo de pega. Segue-se com a caracterização reológica das pastas de cimento no DSR, e das argamassas pelo ensaio de *Squeeze-flow* em prensa hidráulica, também com o intuito de identificar incompatibilidades e relacionar com os perfis do calorímetro. Por fim, é feita uma análise entre as propriedades de forma, textura e granulometria dos agregados com os parâmetros reológicos dos materiais cimentícios, de forma a identificar valores de referência para se obter as propriedades reológicas desejadas. Estas análises, então, levam à construção de reógrafos para facilitar a previsão das propriedades reológicas com base nas modificações em seus constituintes.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2003) *NBR NM 9 - Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1996) *NM 65 - Cimento Portland – determinação do tempo de pega*. Associação Brasileira de Cimento Portland, Rio de Janeiro.
- Cardoso, F.A.; John, V.M.; Pileggi, R.G.; Banfill, P.F.G. (2016) Rheological behavior of mortars: comparison between rotational and Squeeze-flow techniques. *25th Conference Rheology of Building Materials*, Regensburg.
- Di Benedetto, H.; Olard, F.; Sauzéat, C.; Delaporte, B. (2004) Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, v.5, p.163-202.
- Jang, S.H. (2009) Identification of concrete incompatibilities using cement paste rheology. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – *Texas A&M University*, Texas.
- Jiao, D.; Shi, C.; Yuan, Q.; An, X.; Liu, Y.; Li, H. (2017) Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete - a review. *Cement and concrete composites*, v.83, p.146-159.
- Lucas, J.L.O.; Soares, J.B. (2018) Desenvolvimento de metodologia para avaliação da adesividade agregado-ligante com o uso de processamento digital de imagem. *Artigo aprovado na Revista Transportes*.
- Olard, F.; Di Benedetto, H. (2003) General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road Materials and Pavement Design*, v. 4, p. 185-224.
- Pouget, S.; Sauzéat, C.; Di Benedetto, H.; Olard, F. (2012) Prediction of isotropic linear viscoelastic behavior for bituminous materials – forward and inverse problems. *5th Eurasphalt And Eurobitume Congress*, Istanbul.