



**XXVIII CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica  
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

## O efeito de um campo magnético na reologia de uma solução aquosa com distribuição de cristais de sal

Victor Hugo Suarez Solis, suarezvhss17@gmail.com<sup>1</sup>

Igor Dal Osto Pereira, igor.dalosto@gmail.com<sup>2</sup>

Francisco Ricardo da Cunha, frcunha@unb.br<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro. Asa Norte, Brasília-DF. CEP 70.910-900 ,

**Resumo.** Este artigo estuda os efeitos reológicos da aplicação de um campo magnético externo a uma suspensão composta de cristais NaCl dispersos em uma solução aquosa supersaturada do mesmo sal. Foram utilizados protótipos experimentais do Laboratório de Microhidrodinâmica e Reologia da Universidade de Brasília. O dispositivo usado nos experimentos é um reômetro de disco paralelo equipado com uma célula magnética. Testes estáticos em temperatura constante são realizados na ausência de fluxo. Esses testes indicam, por observação microscópica, que o comprimento médio da microestrutura dos cristais após a recristalização é maior quanto mais intenso for o campo magnético aplicado às amostras. Utilizando experimentos reométricos (regime de fluxo laminar), avaliamos o comportamento da viscosidade da suspensão em um regime de fluxo fraco a uma temperatura controlada para seis intensidades de campo magnético crescentes. Estes testes mostram que a viscosidade da suspensão diminui não linearmente à medida que a força do campo magnético aumenta. A suspensão apresenta um comportamento pseudoplástico para cada campo magnético aplicado, que é bem descrito por um modelo de lei de potências.

**Palavras chave:** Campos Magnéticos, Suspensão de Microcristais de Sal, , Recristalização, Pseudoplasticidade

**Abstract.** In this article, the rheological effects of applying an external magnetic field to a suspension composed of NaCl crystals dispersed on an aqueous supersaturated solution of the same salt are studied using experimental protocols of the Laboratory of Microhydrodynamics and Rheology of the University of Brasília. The device used in the experiments is a parallel disk rheometer equipped with a magnetic cell. Static tests at constant temperature are performed in the absence of flow. These tests indicate, by microscopy observation, that the mean length of the crystals microstructure after recrystallization is greater the more intense the magnetic field applied to the samples is. By rheometric experiments (laminar flow regime), we evaluated the behavior of the suspension viscosity in a weak flow regime at a controlled temperature for six increasingly higher magnetic field intensities. These tests show that the suspension viscosity decreases in a nonlinear fashion as the magnetic field intensity increases. The suspensions present a shear-thinning for every applied magnetic field, which is well described by a power-law model

**Keywords:** Magnetic Fields, Salt microcrystal Suspension, Recrystallization, Pseudoplasticity

### 1. INTRODUÇÃO

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise, entre outras, das respostas (na forma deformações ou tensões) de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação. A matéria pode estar no estado líquido, sólido ou gasoso. A descrição fenomenológica das propriedades reológicas de uma suspensão tem por base a definição de três tipos ideais de materiais: materiais viscosos (os quais durante a deformação dissipam todo o trabalho externo aplicado), materiais elásticos (os quais armazenam todo o trabalho externo aplicado) e os materiais viscoelásticos (os quais dissipam e armazenam todo o trabalho externo aplicado) (Rudolph and Osswald, 2014).

A substância que não esteja em conformidade com a lei de viscosidade de Newton é considerada não newtoniana. Em um fluido não newtoniano geralmente a viscosidade tende a diminuir à medida que a taxa de cisalhamento aumenta ( $\dot{\gamma}$ ), um comportamento conhecido como pseudoplasticidade (em inglês, “shear-thinning”). O termo clássico se refere a este comportamento como plasticidade quando existe um ponto de fluxo definido, ou seja, um valor umbral mínimo a partir do qual se produz o fluxo. Também tem sido usado o termo viscosidade estrutural, mas não descreve bem a pseudoplasticidade e pode ser confuso, especialmente quando se considera as propriedades viscoelásticas de um material. Por outro lado, quando a viscosidade aumenta com a velocidade de cisalhamento é dito que o fluido apresenta um comportamento de dilatância (em inglês, “shear-thickening”) (Botella, 2005).

Para a maioria dos materiais líquidos (pseudoplástico), o efeito de cisalhamento é reversível, mas leva algum tempo, ou seja, os líquidos recuperam a sua alta viscosidade original quando o cisalhamento é reduzido ou interrompido (Schramm and Gebroeder, 1994).

O objetivo deste trabalho é verificar a influência de um campo magnético e a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) em microestruturas cristalinas de cloreto de sódio. Para isso, são apresentadas previamente os resultados estáticos onde é realizada uma caracterização microestrutural, em seguida são apresentados os resultados dinâmicos onde é realizada uma caracterização reológica. O presente estudo pode ser importante em aplicações envolvendo tratamentos de formação de cálculos renais por meio de monitoramento de um campo magnético externo.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Microhidrodinâmica e Reologia da Universidade de Brasília. Os materiais utilizados foram os seguintes: cloreto de sódio, microscópio ótico, balança digital, ímãs, termômetro, gaussímetro, aquecedor, béquer, água destilada, pipeta graduada, espátula e um reômetro de disco paralelo equipado com uma célula magnética. O processo utilizado para a obtenção de amostras de uma suspensão de microcristais de cloreto de sódio será descrito abaixo.

No nosso caso, a suspensão de microcristais de cloreto de sódio foi gerada a partir da supersaturação de uma solução de cloreto de sódio. Para obter a suspensão dos microcristais de cloreto de sódio, o método de cristalização por esquentamento foi aplicado a uma solução supersaturada de cloreto de sódio.

Para obter a solução supersaturada de cloreto de sódio, 8,5 gramas de cloreto de sódio e 20 gramas de água destilada foram misturados em um béquer de 50 ml, o que corresponde a uma supersaturação de 121.42%, produzindo uma solução de fração volumétrica de 16.4%. Logo, para produzir microcristais de cloreto de sódio, simultaneamente esquentou-se e aplicou-se agitação magnética à solução supersaturada a 70° Celsius e 900 rpm respectivamente por um intervalo de tempo de 30 minutos e depois foi esfriado à temperatura de ambiente em um béquer de 400 ml contendo água fria por 10 minutos, causando baixa solubilidade na solução supersaturada e, assim, produzindo a recristalização.

Seguindo o procedimento descrito acima, finalmente obtemos uma suspensão de microcristais que se baseia em uma solução supersaturada de cloreto de sódio com fração volumétrica de 16.4% a uma temperatura de 25 graus Celsius.

Uma vez gerada a suspensão, ela foi colocada em 2 lâminas para microscopia ótica, em seguida, as lâminas com seu respectivo conteúdo foram separadas em 2 grupos: grupo 1, chamado de grupo de controle, composto por uma lâmina, sendo definido como as substâncias que não serão submetidas ao campo magnético e grupo 2, chamado de grupo de teste, também formada por uma lâmina, sendo definidas como as substâncias que serão submetidas ao campo magnético. Em seguida, as lâminas do grupo de teste foram submetidas ao campo magnético por um período de 30 minutos, enquanto a do grupo de controle foi colocada distante da influência dos campos magnético também por 30 minutos. No grupo de teste, a lâmina foi submetida a um campo fraco de 850 Gauss.

Logo cada uma das lâminas foi levada ao microscópio ótico para realizar uma caracterização microestrutural.

Para caracterização reológica, utilizou-se um reômetro de disco paralelo da empresa Anton-Paar (Modelo Physica MCR 301) equipado com uma célula magnética, “Fig. 1”, Utilizou-se uma temperatura constante de 25 °C e a “Fig. 3” foi gerada com um espaçamento entre discos (gap) de 0,2 mm.

Este instrumento encontra-se instalado em uma sala a temperatura controlada e disposto em uma mesa rígida, a fim de isolá-lo de vibrações externas.

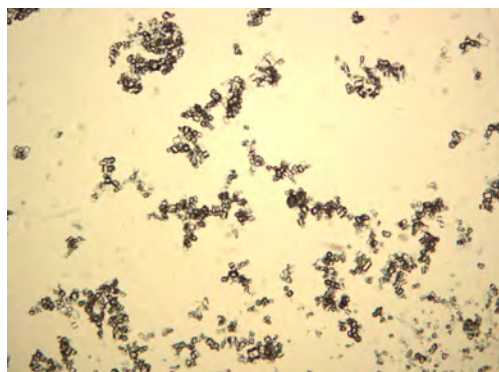


Figura 1: Reômetro Anton Paar- Modelo Physica MCR 301

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1 Caracterização microestrutural

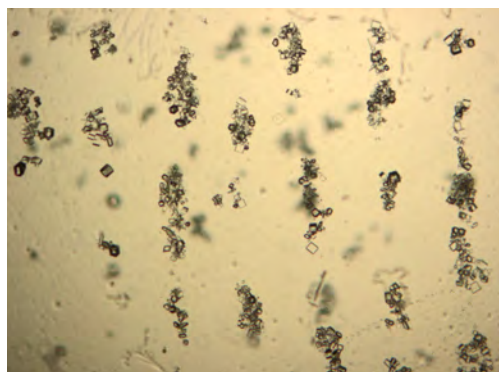
De acordo com o que está indicado na metodologia experimental, esta seção apresenta os resultados experimentais estáticos onde uma caracterização microestrutural é realizada para uma suspensão de microcristais de NaCl ao 16.4% de fração volumétrica.



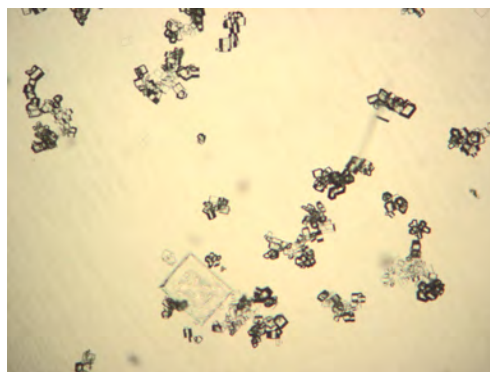
(a) Grupo A



(b) Grupo B



(c) Grupo C



(d) Grupo D

Figura 2: microscopia ótica (ampliação 5x) da recristalização dos grupos de controle (A e B) e grupo de teste (C e D) respectivamente, com cristais de 8.5 gramas de NaCl com um **campo fraco** (850 gauss). Sequência de análises: o grupo A submetido ao campo magnético produz o grupo C e o grupo B submetido ao campo magnético produz o grupo D

#### Grupo Controle (Ausência de Campo Magnético):

- Observou-se que os cristais que compõem as microestruturas têm forma cúbica e octaédrica.
- Foram apreciadas estruturas de microcristais com formas mais heterogêneas (diversas) e indefinidas, algumas delas com formas de dendritas e em alguns casos com formas tipo cadeia.
- Observou-se a formação de microestruturas pouco anisotrópicas (baixa relação de aspecto), macroscopicamente desorganizadas e pouco compactas (porosidade relativamente alta).
- Uma alta sobreposição dos microcristais em sua estrutura não foi observada e como consequência teriam uma espessura mais fina.

#### Grupo Teste (Submetido ao Campo Magnético):

- Observou-se que os cristais que compõem as microestruturas têm forma cúbica e octaédrica
- Foram apreciadas estruturas de microcristais com formas mais homogêneas (uniformes) e definidas (tipo elíptico).
- Observou-se a formação de microestruturas mais anisotrópicas (alta relação de aspecto), mais organizadas macroscopicamente e mais compactas (baixa porosidade).

- Os microcristais em comparação ao caso do grupo de controle estão mais sobrepostos aos outros e, portanto, teriam uma espessura mais grossa.
- As estruturas de microcristais estão compostas por um maior número de cristais no interior em comparação com o grupo de controle.

Observou-se também por microscópio ótico que, ao aplicar um campo magnético (fraco), o diâmetro médio dos microcristais aumenta, obtendo  $113,30 \mu\text{m}$  (sem campo) e  $138,34 \mu\text{m}$  (com campo), aumentando em 22.1% o diâmetro médio do microcristal.

### 3.2 Caracterização reológica

De acordo com o que está indicado na metodologia experimental. Esta seção apresenta os resultados experimentais dinâmicos (experimentos reométricos) onde uma caracterização reológica é realizada para uma suspensão de microcristais de NaCl ao 16.4% de fração volumétrica.

#### 3.2.1 Efeitos reológicos da aplicação de um campo magnético

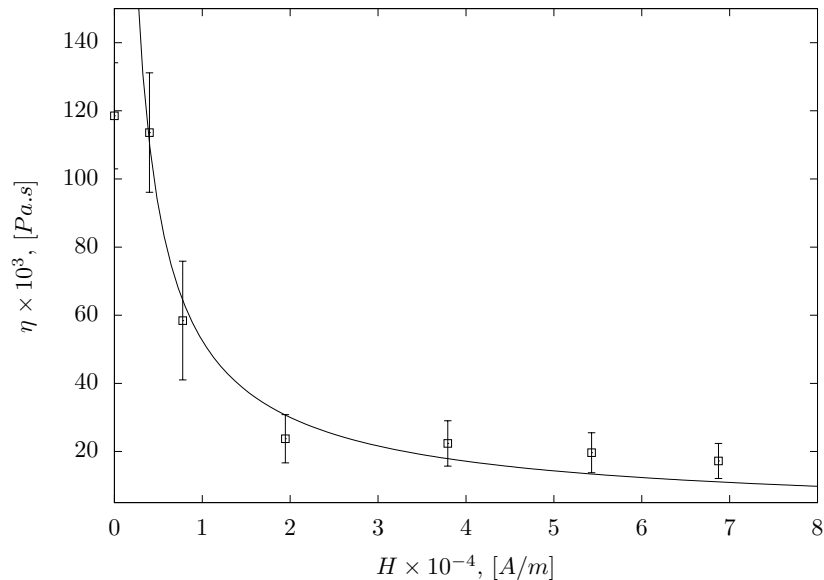


Figura 3: Viscosidade  $\eta$  em função da intensidade do campo magnético externo  $H$  para uma suspensão de microcristais de NaCl. O campo crítico foi determinado como sendo a média entre as intensidades de campo magnético do primeiro e segundo pontos experimentais  $H_{crit} = 1.99 \times 10^3 \text{ A/m}$ . A taxa de cisalhamento foi mantida constante em  $\dot{\gamma} = 5\text{s}^{-1}$

Pode ser visto na “Fig. 3”, que a viscosidade da suspensão diminui não linearmente à medida que a intensidade do campo magnético aumenta. Isso pode ser porque estruturas maiores criadas pelos campos magnéticos mais intensos (evidenciado em experimentos estáticos) se quebram mais rapidamente em comparação com as estruturas que foram submetidas a campos magnéticos menos intensos. Por sua vez, essa quebra ou ruptura dos microcristais pode ser devido ao aumento do tamanho do microcristais e à maior sobreposição destes no interior, tornando o microcristal mais suscetível a ser quebrado pelo **torque** (causado pelo cisalhamento simple permanente).

A partir desses fatos podemos formular a seguinte hipótese, que chamaremos de “**Hipótese Básica**”:

“Ao nível de uma dinâmica de estruturas, podemos hipotizar que o campo magnético torna as microestruturas menos elásticas, mais suscetíveis a serem quebradas por uma taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) e, portanto, mais instável”.

Ou seja, em um nível da dinâmica das estruturas, o campo magnético externo altera a distribuição inicial das microestruturas cristalinas.

Outra questão interessante a notar na “Fig. 3” é o campo crítico, quer dizer, aquele campo que a partir do qual é possível observar a quebra dos microcristais que no nosso caso é a média entre o primeiro e o segundo ponto experimental dando como resultado um campo crítico de  $H_{crit} = 1.99 \times 10^3 \text{ A/m}$ .

A curva contínua é o resultado de fazer um ajuste nos dados experimentais resultando em uma curva do tipo de lei de potências:  $ax^b$ , com  $a = 52.5223$  e  $b = -0.8074$ .

### 3.2.2 Pseudoplasticidade

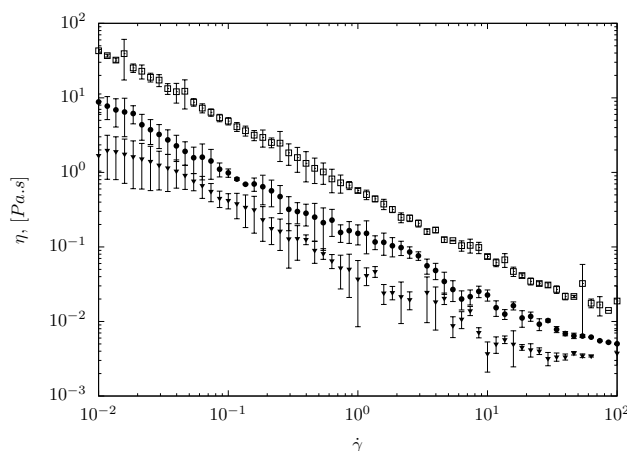


Figura 4: Viscosidade  $\eta$  em função da taxa de cisalhamento para uma suspensão de microcristais de NaCl para los campos:  $H=0$  A/m (linha superior),  $H=0.687 \times 10^5$  A/m (linha intermediária),  $H=1.92 \times 10^5$  A/m (linha inferior)

Para obter a “Fig. 4” foi utilizado um espaçamento entre Discos (gap) de 0.1 milímetros a uma temperatura de 25°C e a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) que foi utilizada variou de  $0.01 \text{ s}^{-1}$  a  $100 \text{ s}^{-1}$ .

As linhas foram obtidas para os campos  $H=0$  A/m (linha superior),  $H=0.687 \times 10^5$  A/m (linha intermediária),  $H=1.92 \times 10^5$  A/m (linha inferior) produzido pelas intensidades da corrente: 0A, 1A e 2A respectivamente.

Pode-se observar na “Fig. 4” que a suspensão para cada campo magnético aplicado (sem campo y com campo) apresenta um comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade aparente da suspensão diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta.

A queda na viscosidade (para cada campo magnético) pode ser explicada devido a dois mecanismos físicos diferentes, Para uma melhor interpretação, será feita uma análise por intervalos.

Do intervalo de  $10^{-2}$  a  $10^0$  há um estiramento, rotação e um alinhamento das microestruturas dos cristais anisotrópicos com as linhas de corrente do escoamento, diminuindo assim a dissipação de energia e, portanto, produzindo uma queda na viscosidade. Para o outro intervalo de  $10^0$  a  $10^2$  há uma quebra de microcristais pela taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), causando assim uma queda na viscosidade.

No nível panorâmico (comparação entre os três campos) podemos ver que no intervalo de  $10^{-2}$  a  $10^0$  que à medida que a intensidade do campo magnético aumenta, a viscosidade da suspensão diminui. Isto se deve ao fato de que o campo contribui para um maior estiramento, rotação dos microcristais e também para um melhor alinhamento dos microcristais com as linhas de corrente, causando uma menor dissipação de energia e, portanto, uma maior queda na viscosidade.

No intervalo de  $10^0$  a  $10^2$  também é possível ver uma queda na viscosidade. Esse fato pode ser explicado através da **hipótese básica** (ver subseção 3.2.1). Ou seja, à medida que o campo magnético aumenta, os microcristais aumentam de tamanho tornando-se mais fáceis de serem quebrados pelo torque (causado pelo cisalhamento simples permanente) e, conseqüentemente, aumentando a velocidade de ruptura dos microcristais.

Fazendo um ajuste nos dados experimentais se obtêm que as curvas se encaixam muito bem na lei de potências:  $ax^b$ , obtendo os seguintes parâmetros de ajuste para cada caso:  $a = 0.631, b = -0.870$  ( $H = 0$  A/m);  $a = 0.118, b = -0.944$  ( $H = 0.687 \times 10^5$  A/m);  $a = 0.109, b = -0.652$  ( $H = 1.92 \times 10^5$  A/m).

## 4. Conclusões

- A partir da caracterização microestrutural ficou evidente que as microestruturas quando submetidas a um campo magnético (fraco) têm formas mais homogêneas (uniformes), definidas (tipo elíptico), anisotrópicas (alta relação de aspecto), formas macroscopicamente mais organizadas e compactas (baixa porosidade). Além disso, observou-se um aumento no tamanho médio dos microcristais quando um campo (fraco) foi aplicado, isso pode ser devido à interação entre as células unitárias de NaCl, íons dissolvidos, moléculas de água e o campo magnético.
- A partir da “figura 3” observou-se que a viscosidade da suspensão diminui não linearmente à medida que o campo magnético aumenta e, portanto, não tem efeito magnetoviscoso. Além disso, observou-se um campo crítico de  $H_{crit} = 1.99 \times 10^3$  A/m.
- A partir da “figura 4” ficou evidenciado que a suspensão de cada campo magnético aplicado apresenta um comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade aparente da suspensão diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta.

- Verificou-se a influência da taxa de cisalhamento e do campo magnético nos microcristais. A taxa de cisalhamento causa rotação, estiramento, alinhamento e quebra dos microcristais; e o campo magnético causa uma maior rotação, estiramento, alinhamento e uma maior velocidade de ruptura dos microcristais.

## 5. Referências

Rudolph, N. and Osswald, T.A., 2014 *Polymer Rheology: Fundamentals and Applications*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, Madison.

Botella, Rodrigo Moreno, 2008. *Reología de suspensiones cerámicas*. Editorial CSIC-CSIC Press, Madrid.

Schramm, G. and Gebrueder Haake, 1994. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. JGebrueder Haake, Germany, 2nd edition.