



## INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO MAGNETO-ÓPTICO EM GLICERINA DOPADA COM FERROFLUIDO

LACZKOWSKI, Ivan Marcelo, PG, Engenharia de Produção Agroindustrial, Fecilcam, [laczkowski@ig.com.br](mailto:laczkowski@ig.com.br)  
FERNANDES, Paulo Ricardo Garcia, OR, UEM, [pricardo@dfi.uem.br](mailto:pricardo@dfi.uem.br)  
MENDES, Renio dos Santos, UEM, [rsmendes@dfi.uem.br](mailto:rsmendes@dfi.uem.br)

### INTRODUÇÃO

Ferrofluidos (ou fluidos magnéticos) são suspensões estáveis de partículas magnéticas dispersas em um meio líquido que pode ser polar ou apolar (Odenbach, 2009). Na ausência de um campo magnético externo, esses pequenos ímãs têm seus pólos norte e sul orientados aleatoriamente, porém, na presença de um campo magnético externo, seus momentos de dipolo assumirão a orientação determinada pelas linhas de campo.

Uma característica muito importante de um ferrofluido é a sua estabilidade, ou seja, a propriedade das partículas magnéticas de permanecerem em suspensão na forma de entidades isoladas, evitando aglomerações e subsequente precipitação. Devido a isso, esses materiais despertam grande interesse para a tecnologia, pois, além da estabilidade, apresentam três propriedades fundamentais: *i)* Fixam-se em ímãs, mas mantêm a forma do recipiente que os contém; *ii)* Mudam sua viscosidade proporcionalmente ao campo magnético externo aplicado (neste caso, chamam-se fluidos magneto-reológicos e *iii)* Na presença de um campo magnético externo, tornam-se opticamente anisotrópicos, e passam a apresentar birrefringência (Scherer, 2005).

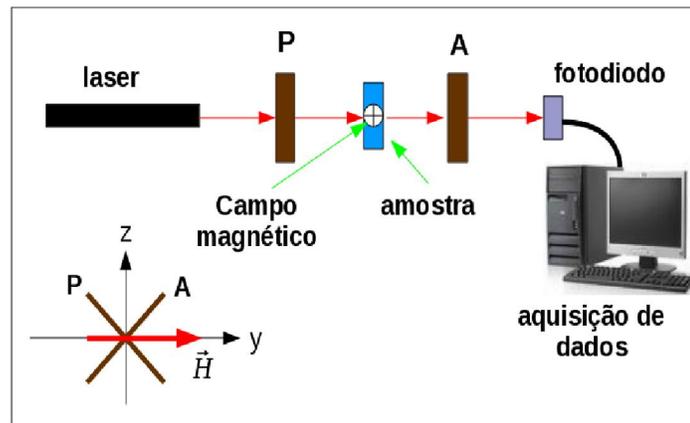
As propriedades que um campo magnético induz em um ferrofluido, geralmente, apresentam comportamentos que estão intimamente relacionados com parâmetros característicos do meio onde as pequenas partículas estão dispersas. Em especial, neste trabalho, dedicamos grande atenção aos processos de indução de birrefringência em glicerina dopada com ferrofluido e, por meio da intensidade de luz transmitida, realizamos estudos quando essas misturas estão sob ação de um campo magnético pulsado.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com intuito de coletar dados para analisar a indução de birrefringência nas amostras de glicerina dopadas com ferrofluido, realizamos uma montagem experimental de transmitância óptica de luz polarizada (conforme ilustrado na figura 1). O experimento funciona da seguinte forma: um feixe de luz laser *He-Ne*,  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  e potência de  $10 \text{ mW}$



atravessam a mistura que está entre polarizadores cruzados. Os ângulos do polarizador **P** e do analisador **A** estão a  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$ , respectivamente, em relação ao eixo z. Esse feixe de luz é captado por um fotodiodo que está interfaceado a um microcomputador. A amostra fica encapsulada em uma cubeta de vidro de seção retangular [50,0 mm x 10,0 mm (caminho óptico) x 10,0 mm] no centro de um eletroímã com campo magnético pulsado, com frequência de um 1,0 Hz, intensidade de 500 Gauss e, onde há, também, um sistema para circulação de água, possibilitando assim, manter o controle de temperatura da amostra com precisão de 0, 1°C.



**Figura 1:** Esquema experimental para determinar a intensidade de luz transmitida pela amostra estudada. Os ângulos do polarizador (**P**) e do analisador (**A**) estão a  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$ , respectivamente, em relação ao eixo z.

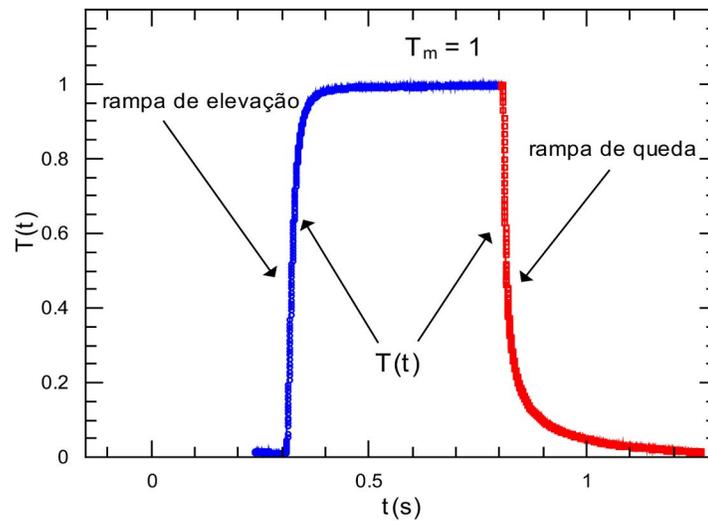
## CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Na óptica, transmitância ( $T_\lambda$ ) é a fração da luz incidente em um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) que passa através de uma amostra (Born, 1999). Equacionando esse conceito temos:

$$T_\lambda = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

em que  $I_0$  é a intensidade de luz incidente e  $I$  é a intensidade de luz que sai da amostra.

Na equação 1, fenômenos de espalhamento e reflexão são considerados próximos de zero ou não contabilizados. A transmitância de uma amostra é, muitas vezes, expressa como uma porcentagem ou são normalizadas, com valores variando entre 0 e 1. Assim, vamos utilizar, para analisar os dados experimentais, a transmitância normalizada.

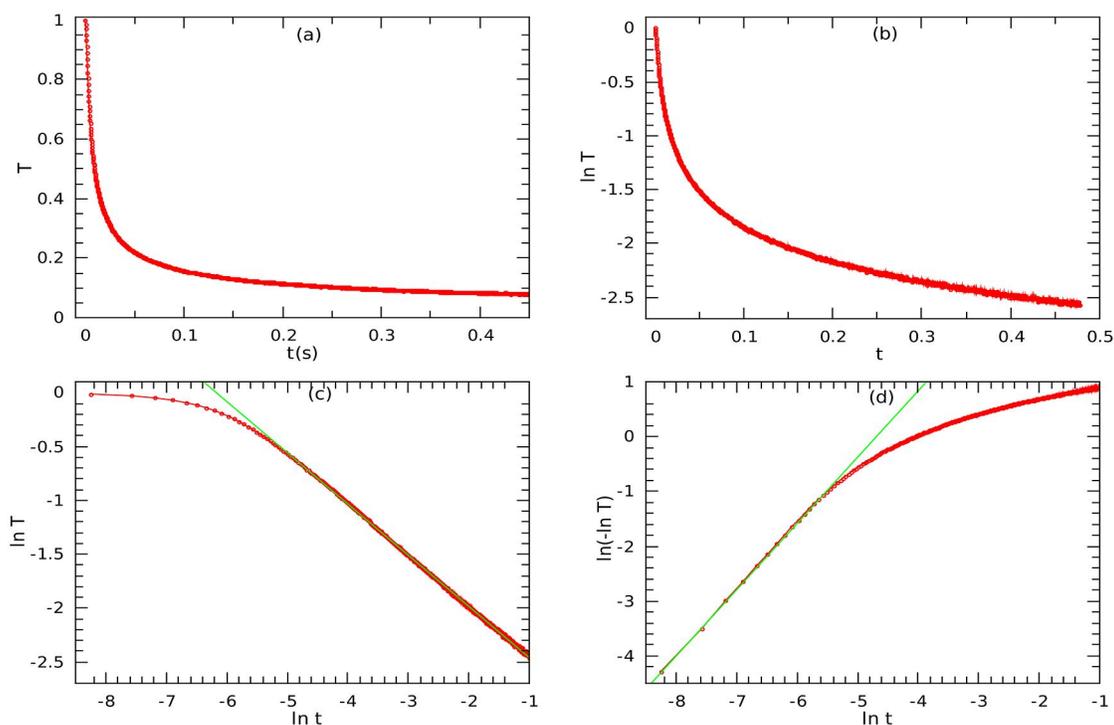


**Figura 2:** Resposta óptica de uma amostra de glicerina dopada com ferrofluido a uma concentração de  $0,3 \mu\text{l/ml}$ . Observa-se uma máxima de transmitância de luz quando o campo magnético é ligado, em azul e, quando o campo magnético é desligado, em vermelho, o sistema relaxa e temos um mínimo de transmitância.

A figura 2 ilustra a resposta óptica de uma amostra de glicerina dopada com ferrofluido na concentração de  $0,3 \mu\text{l/ml}$ . Nesta figura, na parte superior, em azul, temos a transmitância máxima ( $T_m$ ), quando o campo magnético está ligado e, nesta condição, a transmitância normalizada  $T = T/T_m$  será igual a um. Nesta configuração, a maior parte das partículas de ferrofluido está orientada na direção do campo magnético aplicado. Quando o campo magnético é desligado, em vermelho, a energia térmica força as partículas de ferrofluido a assumirem orientações aleatórias no interior da amostra, fazendo com que o sinal de transmitância assumira valor mínimo (Brown, 1963). Neste contexto, temos o processo de relaxação magneto-óptica (rampa de queda, em vermelho). A transmitância normalizada,  $T(t)$ , é a intensidade de luz transmitida através da amostra em função do tempo  $t$  medido em segundos,  $I(t)$ , é dividido por  $I_0$ . Assim:

$$T(t) = \frac{I(t)}{I(0)} \quad (2)$$

Observe que o tempo inicial é tomado no instante em que o campo magnético é desligado (veja a figura 3a).



**Figura 3:** Comportamento típico de uma curva de relaxação (rampa de queda) magneto-óptica para uma amostra de glicerina dopada com ferrofluido na concentração de 0,3  $\mu\text{l/ml}$ .

### RAMPA DE QUEDA

Uma primeira tentativa para avaliar como a transmitância normalizada decai é compará-la com processos de relaxação conhecidos. Como por exemplo:

$$e^{-t/\tau} \quad (3)$$

Sendo  $\tau$  o tempo característico do processo de relaxação. Essa primeira tentativa é motivada porque o decaimento exponencial é uma função muito simples e vem sendo empregada com muito sucesso em inúmeras situações, tanto fenomenológica, como teóricas (Scherer, 2005). Neste caso,  $T(\tau)$  obedece a equação:

$$\frac{dT}{dt} = -\alpha T \quad (4)$$

com  $\alpha = 1/\tau$  e  $T(0) = 1$ .



Observando a figura 3b, em escala monologarítmica, notamos que a curva de relaxação desvia muito de uma linha reta e, portanto, não correspondendo ao comportamento exponencial. Uma segunda tentativa para avaliar como a transmitância normalizada decai, seria supor que  $T(t)$  obedeça a uma lei de potência qualquer, mas observando a figura 3c, em escala dilogarítmica, também, notamos que a curva diverge muito de uma linha reta para  $t$  pequeno. Por outro lado, observando a figura 3c, percebemos que para tempos longos o comportamento do processo de relaxação aproxima-se muito de uma linha reta. Isso indica que a relaxação magneto-óptica pode estar sendo regida por dois processos de decaimento distintos. Temos, portanto, um processo de relaxação pouco comum, anômalo (Tsallis, 1998).

Portanto, um modelo para explicar esse comportamento, generalizações outras do comportamento exponencial devem ser consideradas para representar o comportamento anômalo. Particularmente úteis, seriam generalizações da exponencial que têm parâmetros de controle. Uma possível candidata para descrever o comportamento não-exponencial da relaxação magneto-óptica é a função exponencial alongada, também conhecida como exponencial "stretched":

$$e^{-(t/\tau)^\beta} \quad (5)$$

Note que recuperamos a função exponencial no limite  $\beta \rightarrow 1$ .

Gostaríamos de salientar que esta generalização da exponencial pode ser vista como solução da equação 4 se considerar  $\alpha = -\beta t^{\beta-1}/\tau^\beta$ .

Para investigar graficamente se um conjunto de dados experimentais é bem ajustado por uma exponencial alongada, é uma prática comum verificar se obtemos uma linha reta no gráfico de  $\ln(-\ln(T(t)))$  versus  $\ln t$ . Partindo da equação 5 obtemos que,

$$\ln(\ln(T(t))) = A + Bt \quad (6)$$

em que  $\tau = \exp(-A/B)$  e  $\beta = B$ .

A figura 3d mostra a curva de relaxação obtida por meio dessa técnica, indicando que o comportamento do processo de relaxação é bem ajustado por uma exponencial alongada numa faixa de tempo curta. Ressaltamos que a exponencial alongada é empregada com sucesso no relaxamento da polarização elétrica de materiais vítreos, relaxamento em silício amorfo hidrogenado, economia, relaxamento de tensão quando esta é constante, efeitos de expansão térmica em sistemas granulares (Vargas, 2007), bem como na dinâmica de relaxação de proteínas. Relacionado aos fluidos magnéticos existem vários estudos também (Odenbach, 2009). Além disso, enfatizamos que a função exponencial alongada possui apenas dois parâmetros e se ajusta muito bem aos nossos



dados para uma faixa de tempo curta. Este fato nos motivou direcionar nossa investigação sobre a relaxação magneto-óptica para tempos suficientemente curtos para a equação 5 ser aplicada com sucesso.

Até o presente momento, não tivemos sucesso na identificação de uma função que ajustasse bem as nossas medidas tanto para tempos curtos quanto para tempos longos. Neste ponto, gostaríamos de ressaltar que, em geral, esta ausência de um profundo entendimento do processo de relaxação não exponencial faz parte de muitos problemas, ainda, não solucionados pela física (Ramakrishnan, 1987). Em particular para os ferrofluidos, várias situações complexas podem estar presentes, tais como a aglomeração das partículas magnéticas (Odenbach, 2009).

## RAMPA DE ELEVAÇÃO

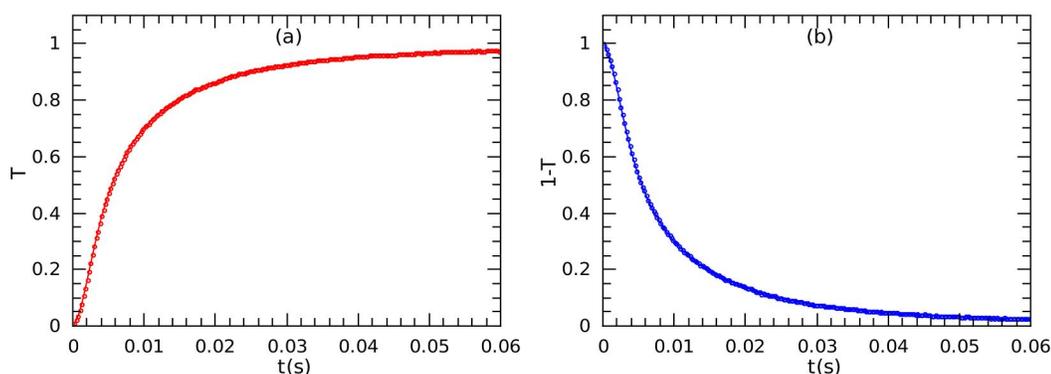
Agora que já analisamos o processo de relaxação, faremos um estudo da rampa de elevação para verificar se existe alguma semelhança com a rampa de queda. Considere a equação abaixo:

$$T(t) = 1 - f(t) \quad (7)$$

em que  $T(t)$  é a transmitância normalizada e  $f(t)$  é uma função do tempo. Isolando  $f(t)$  temos que,

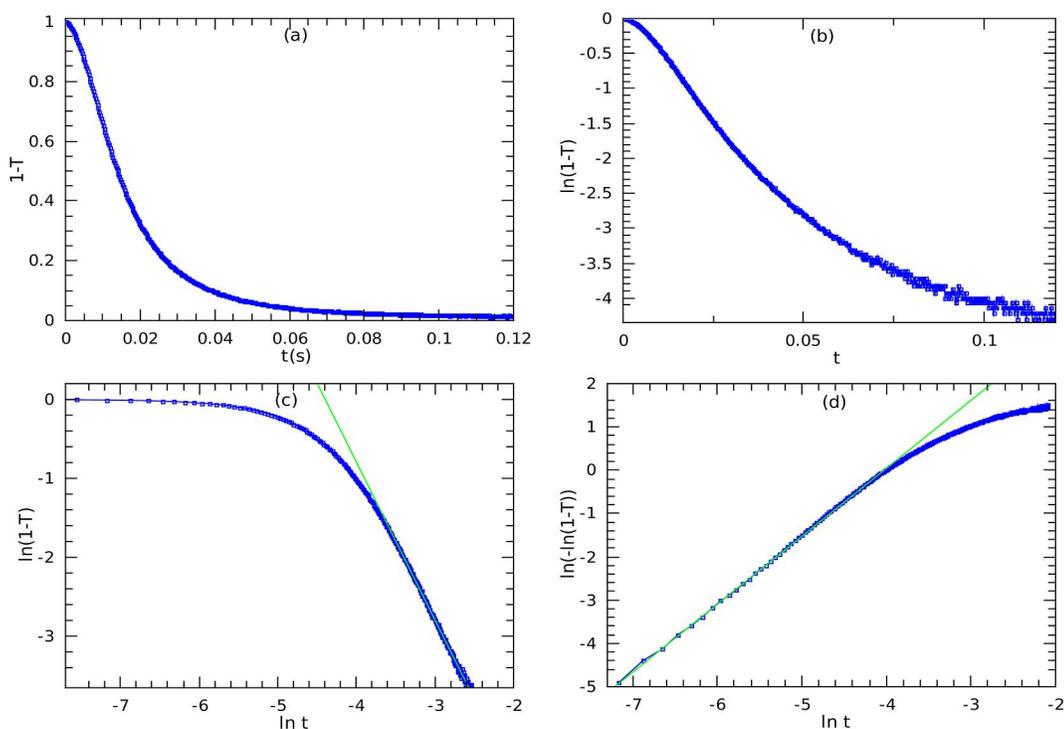
$$f(t) = 1 - T(t) \quad (8)$$

A figura 4a ilustra uma curva de transmitância normalizada para a rampa de elevação, e a figura 4b ilustra a curva  $(1 - T(t))$ , obtida por meio da equação 8. Observe que a curva (figura 4b) se torna muito semelhante àquela que já estudamos até então. Portanto, seguiremos o mesmo raciocínio empregado no caso da rampa de queda.



**Figura 4:** Rampa de elevação: (a)  $T(t)$  versus  $t$ . (b)  $1 - T(t)$  versus  $t$ .

Uma comparação rápida entre as curvas da figura 3d e da figura 5d, notamos que as rampas de queda e de elevação podem ser estudadas por meio de uma exponencial alongada para um pequena faixa de tempo e, para tempos longos, podemos buscar uma caracterização por meio de uma função tipo lei de potência (veja as linha contínuas, em verde).



**Figura 5:** Comportamento típico de uma curva de elevação (rampa de elevação) do efeito magneto-óptico para uma amostra de glicerina dopada com ferrofluido na concentração de  $0,3 \mu\text{l/ml}$ .



## CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentamos um estudo de como pode ser caracterizado o processo de indução de birrefringência em uma amostra de glicerina dopada com ferrofluido. Dentre as principais conclusões, citamos que a relaxação magneto-óptica é um processo de relaxação anômala e, por meio de nossos estudos, estabelecemos um método para análise desse processo. Verificamos que o processo de relaxação (rampa de queda) não segue um decaimento exponencial, mas pode ser muito bem aproximado por uma exponencial alongada para uma faixa de tempo pequena e, para tempos longos, constatamos que o processo de relaxação pode ser caracterizado por uma função tipo uma lei de potência. Entre as diversas perspectivas de estudos, está uma investigação das rampas de queda e de elevação para tempos longos e, em particular, um aprofundamento no estudo das relações entre os tempos característicos ( $\tau$ ) e a viscosidade dos meios onde o ferrofluido está disperso.

## REFERÊNCIAS

- BORN, M., Wolf, E., *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th (expanded) edition (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- BROWN, W. F., *Thermal fluctuations of a single-domain particle*, Phys. Rev. **130**, 1677 (1963).
- ODENBACH, S., *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of ferrofluids* (Springer, Berlin, 2009).
- RAMAKRISHNAN, V., Raj Lakshmi, M., *Non-Debye relaxation in condensed matter* (World Scientific, Singapore, 1987).
- SCHERER, C., Figueiredo Neto, A. M., *Ferrofluids: Properties and Applications*, Brazilian Journal of Physics. **35**, 718-727 (2005).
- VARGAS, W. L., McCarthy, J. J., *Thermal expansion effects and heat conduction in granular materials*, Phys. Rev. E **76**, 041301 (2007).
- TSALLIS, C., *Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics*, J. Stat. Phys. **52**, 479-487 (1988).