

Aplicação de planejamento experimental na otimização do processo de pós-cura de pastilhas de freio em forno contínuo

Daniel Matté^{*,†}, Ademir R. Menetrier[†] e Cláudio A. Perottoni^{*}

Resumo

Frequentemente o engenheiro se depara com situações onde o principal objetivo é otimizar um processo, em termos de uma ou mais respostas, respeitando as especificações do produto e vínculos impostos sobre o processo. Com o mercado automobilístico cada vez mais competitivo, a inserção de processos mais rápidos e de menor custo é de extrema importância para a sustentabilidade das empresas. Contribuindo no desenvolvimento dos processos de fabricação de materiais de atrito utilizados em pastilhas de freio para automóveis, este trabalho tem como objetivo otimizar o processo de pós-cura em fornos contínuos (em substituição ao processo realizado em fornos estacionários). Para isso, foram avaliadas as propriedades do material de atrito (dureza Gogan, massa específica, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e ruído), em função das variáveis de processo, tempo de residência e temperatura de trabalho. Com auxílio da metodologia de superfície de resposta foram construídos modelos matemáticos que descrevem o comportamento das propriedades do material de atrito em função das variáveis de processo, que permitiram determinar as condições ótimas de processo. Por fim, foi realizada a análise termomecânica do material de atrito, fornecendo informações sobre o comportamento mecânico do material durante o processo em forno contínuo.

Palavras-chave

Materiais de atrito, pastilhas de freio, fornos contínuos, otimização de processos, análise termomecânica.

Application of experimental design in optimization of the post-curing process of brake pads in a continuous oven

Abstract

Often the engineer is faced with situations where the main objective is optimizing a process in terms of one or more responses, respecting product specifications and constraints imposed on the process. In the very competitive automotive market, the insertion of a faster process with lower costs is essential to the sustainability of companies. This work aims to optimize the post-curing processing of friction materials used in automotive brake pads manufacturing, using continuous furnaces substituting for the nowadays employed stationary furnaces. Several properties of the friction materials were evaluated (more precisely, Gogan hardness, specific mass, compressibility, shear strength and noise generated under operating conditions) as a function of the process variables (residence time and furnace set-up temperature). Mathematical modeling using the response surface methodology allowed to describe the above mentioned physical properties/material responses as functions of the process variables and, thus, to determine the optimal process conditions. Finally, a complimentary thermomechanical analysis provided information about the evolution of the elastic response of the friction material under conditions that emulates the post-curing in continuous furnaces.

Keywords

Friction materials, brake pads, continuous furnace, processes optimization, thermomechanical analysis.

I. INTRODUÇÃO

Existem diversas ferramentas estatísticas que podem ser utilizadas para avaliar dados experimentais e fornecer informações sobre o processo em análise. A metodologia

* Universidade de Caxias do Sul, Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 CEP 95070-560 Caxias do Sul - RS - Brasil; † Fras-le S.A., RS 122, Km 66, 10945 CEP 95055-010 Caxias do Sul - RS - Brasil

Emails: daniel.matte@hotmail.com, ademir.menetrier@fras-le.com.br, caperott@ucs.br

Data de envio: 25/06/2017

Data de aceite: 15/10/2017

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v6iss1p1>

de superfície de resposta constitui uma ferramenta estatística efetiva nos casos onde uma determinada grandeza deve ser otimizada, satisfazendo-se determinadas especificações [1]. Fornos contínuos são amplamente utilizados na indústria e são um bom exemplo de processo em que a metodologia de superfície de resposta pode ser aplicada. Na fabricação de pastilhas de freio para automóveis, há uma tendência mundial da utilização de fornos contínuos, em substituição aos fornos estacionários, no processo conhecido como pós-cura. Nos fornos estacionários as pastilhas de freio estão sujeitas a diferentes perfis de aquecimento, de acordo com a posição ocupada na carga. Esse problema é praticamente extinto nos

fornos contínuos, devido ao fato de que as pastilhas de freio se encontram distribuídas através da esteira motorizada. Como ela percorre toda a extensão do forno em contato direto com o fluxo de ar, garante-se uniformidade na aplicação da temperatura em todas as peças. A pós-cura tem por função assegurar a estabilidade dimensional da pastilha e a completa cura do agente aglomerante [2]. Os materiais de atrito utilizados em pastilhas de freio são produzidos com mistura seca, em que os componentes estão no estado sólido em forma de pós, fibras de pequeno tamanho e partículas [3]. Os aditivos que compõem materiais de atrito são: aglomerantes, fibras de reforço, cargas e modificadores [4]. A função do aglomerante é manter os demais componentes do material de atrito juntos (matriz do compósito), conferindo integridade estrutural sob carga mecânica e/ou térmica [2]. Por possuírem várias propriedades desejáveis, como boa resistência mecânica e térmica, estabilidade dimensional, alta resistência a solventes, ácidos e água, as resinas fenólicas são muito populares em uma extensa gama de aplicações, incluindo a aplicação como aglomerante em materiais de atrito [5]. As resinas fenólicas do tipo novolaca são produzidas por catalisador ácido e com razão molar formaldeído/fenol menor que 0,9 e necessitam de um co-reagente, normalmente hexametileno tetramina (HMTA), para se tornarem termorrígidas [6], [7]. Duas transições principais ocorrem durante a formação da rede polimérica: gelificação e vitrificação (transição vítrea). A gelificação envolve uma mudança abrupta de um comportamento líquido para um comportamento mais parecido com um sólido e pode ser definida como a conversão onde a massa molar média tende ao infinito. As propriedades mecânicas são afetadas pelo aumento da quantidade de ligações cruzadas e, para baixas tensões, os módulos de engenharia, por exemplo, o módulo elástico, são suficientes para descrever o comportamento após a vitrificação [8], [9]. Visando entender e otimizar o processo contínuo de pós-cura de pastilhas de freio foram realizados experimentos de otimização com base nos parâmetros de tempo de residência e temperatura no forno contínuo. Também foi estudado o comportamento da resina fenólica durante o processo de pós-cura, sendo este o principal componente do material de atrito afetado nesta etapa do processo.

II. MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental proposto neste trabalho visa identificar a influência da temperatura e tempo de residência no processo de pós-cura de pastilhas de freio em forno contínuo.

A. Materiais

Foram utilizadas 280 pastilhas de freio de dimensões intermediárias entre o portfólio de produtos para automóveis da Fras-le, sendo 140 pastilhas de freio da formulação A e 140 pastilhas de freio da formulação B. Ambas as formulações utilizam resina fenólica novolaca em sua composição, tendo como principal diferença a utilização de borracha com menor resistência a temperatura na formulação B.

B. Produção das amostras

De forma geral, o processo produtivo de pastilhas de freio utilizado segue as seguintes etapas: produção de plaqueta,

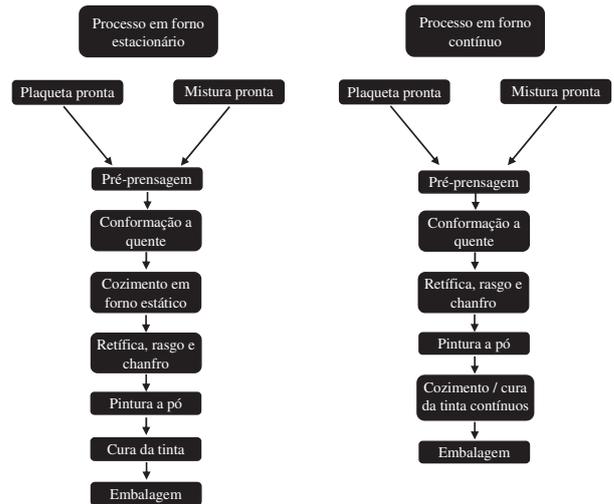


Fig. 1: Fluxograma comparativo entre os processos estacionário e contínuo.

preparação do material de atrito, pré-prensagem, conformação a quente, ajustes dimensionais, pintura e embalagem. A plaqueta, ou reforço metálico, é produzida a partir de uma chapa metálica plana, a qual é cortada conforme formato específico. Na superfície da plaqueta aplica-se um adesivo que nas operações seguintes propiciará a adesão da plaqueta com o material de atrito. O material de atrito é preparado separadamente por meio da mistura seca dos diferentes componentes. Na operação de pré-prensagem, a mistura e a plaqueta são compactadas a frio, formando uma pré-forma. A pré-forma é então conduzida até a etapa de conformação a quente, que consiste em um ciclo de prensagem associando temperatura, pressão, tempo sob pressão e degasagem (nesta etapa, ocorre a adesão integral entre o material de atrito e a plaqueta, além da cura do agente aglomerante). Após a conformação a quente, submete-se a pastilha ao cozimento. Nas etapas seguintes realizam-se os ajustes dimensionais, pintura e embalagem [2]. A produção das amostras seguiu o fluxo normal produtivo até a etapa de conformação a quente. Após a etapa de conformação iniciou-se a diferenciação dos processos estacionário e contínuo. A utilização do processo em forno contínuo permite que a etapa de cura da tinta em pó seja feita em conjunto com a pós-cura da peça, fazendo com que haja redução de uma operação e também alteração na ordem de realização das etapas. A Figura 1 apresenta o fluxo comparativo entre os processos estacionário e contínuo. O experimento fatorial realizado totalizou seis combinações entre os fatores tempo de residência e temperatura. Para cada experimento foram processadas 20 amostras por formulação. A Tabela I ilustra o experimento fatorial realizado.

C. Avaliação das propriedades

Foram analisadas seis propriedades adequadas à caracterização de materiais de atrito. Cada uma das propriedades foi avaliada nas amostras geradas em cada combinação do experimento fatorial e também nas amostras do processo normal (base para comparação).

TABELA I: Experimento fatorial

Tratamento	Tempo de residência (min)	Temperatura (°C)
1	25	230
2	75	230
3	25	265
4	75	265
5	25	300
6	75	300

1) *Dureza Gogan*: ensaio não destrutivo que mede a compressibilidade de um material. Diferentemente de outras escalas de dureza, a escala Gogan não fornece resultados em relação a mecânica do material, e sim verifica a consistência do material de atrito [10]. Valores maiores de dureza indicam menor rigidez do material. Ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 5520:1990 utilizando o durômetro de leitura direta Gogan, modelo 911. Foram realizadas duas medições por peça, em cinco amostras de cada condição.

2) *Massa específica*: para obtenção da massa específica utilizou-se uma balança semi-analítica Ohaus com precisão de 0,01g, de acordo com a norma NBR 5544:1998. A massa específica fornece informações sobre a porosidade, compactação e integridade do material de atrito [11]. Realizou-se uma medição por peça, em cinco amostras de cada condição.

3) *Compressibilidade*: a medição de compressibilidade foi realizada com auxílio do equipamento Link modelo 620. O procedimento seguido foi o descrito na norma ISO 6310:2009 e foi realizado em temperatura ambiente [12]. Define-se compressibilidade como a deflexão exibida por uma única pastilha de freio quando sujeita a uma carga que reproduz uma certa pressão de frenagem do sistema de freio [2]. Realizou-se uma medição por peça, em cinco amostras de cada condição.

4) *Resistência ao cisalhamento*: com auxílio do equipamento de cisalhamento Continental Teves foi medida a resistência ao cisalhamento. A carga aplicada foi de $4,5 \text{ kN.s}^{-1}$ em direção paralela a superfície de trabalho do material de atrito até sua ruptura. Com este ensaio é possível conhecer a força de adesão entre a plaqueta metálica e o material de atrito pela cola. Realizou-se uma medição por peça, em cinco amostras de cada condição.

5) *Avaliação de ruído*: para a avaliação de ruído utilizou-se um dinamômetro inercial marca Link com caixa selada e microfone, posicionado próximo à pastilha de freio. Este ensaio foi realizado de acordo com a Norma SAE J2521, em que se verificou o percentual de ruído das pastilhas de freio acima de 70 dB [13]. Realizou-se uma medição em cada condição.

6) *Análise termomecânica (TMA)*: realizaram-se ensaios de tensão-deformação por compressão nos três níveis de temperatura utilizados no planejamento fatorial (230°C, 265°C e 300°C). Para tais ensaios foram utilizadas cargas cíclicas com taxa de aplicação de 4 N.min^{-1} e posterior manutenção da carga máxima por 1 min seguida da retirada da força. Utilizou-se com carga base 0,5 N para garantir o assentamento correto da amostra. A carga máxima correspondeu a 4,5 N. O tempo total de cada ensaio foi de 110 min. O equipamento utilizado foi o analisador termomecânico Shimadzu TMA 60. A Figura 2 esquematiza os ciclos de aplicação de carga após o equipamento estar na temperatura pré-estabelecida. Realizou-

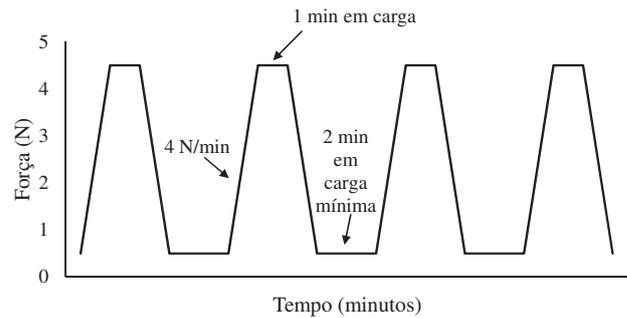


Fig. 2: Ciclos de aplicação de carga.

se um ensaio para cada condição.

D. Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada por meio do software Microsoft Office Excel mediante a criação de uma planilha de cálculo que permitiu a análise dos resultados, utilizando-se de conceitos estatísticos. A representação gráfica das superfícies de resposta foi construída por meio do software Gnuplot.

III. RESULTADOS

Por meio do uso da metodologia de análise de variância foi possível determinar a influência das variáveis (fatores), nas propriedades estudadas (respostas). Mediante regressão linear foram construídos os modelos matemáticos para cada propriedade. Com os modelos matemáticos definidos foram construídas as superfícies de resposta, permitindo a determinação do ponto ótimo. Os resultados obtidos na análise termomecânica do material de atrito permitiram analisar o comportamento do material durante o processo de pós-cura.

A. Influência das variáveis estudadas

Com o valor crítico de F calculado foi possível fazer a comparação com o valor de F tabelado no nível de significância escolhido ($\alpha = 0,05$), se o valor calculado for maior do que o valor tabelado, conclui-se que existe diferença significativa entre os níveis do fator. A Tabela II apresenta o resumo dos valores de F calculados para cada variável estudada. Os valores de F em negrito na tabela, por serem menores que os valores de F tabelados, representam que a propriedade em questão não é significativa no modelo de regressão linear.

Para a propriedade ruído, em função de restrições no uso do equipamento, foi realizada apenas uma amostragem em cada condição, não sendo possível proceder com a análise de variância. Assim, os fatores tempo e temperatura foram considerados no modelo de regressão. A interação entre os fatores, ou seja, a dependência das respostas dos níveis de um fator em relação a cada nível do outro fator, pode ser analisada de forma gráfica. Conforme Figura 3, mostrou ser influente pela falta de paralelismo entre as linhas.

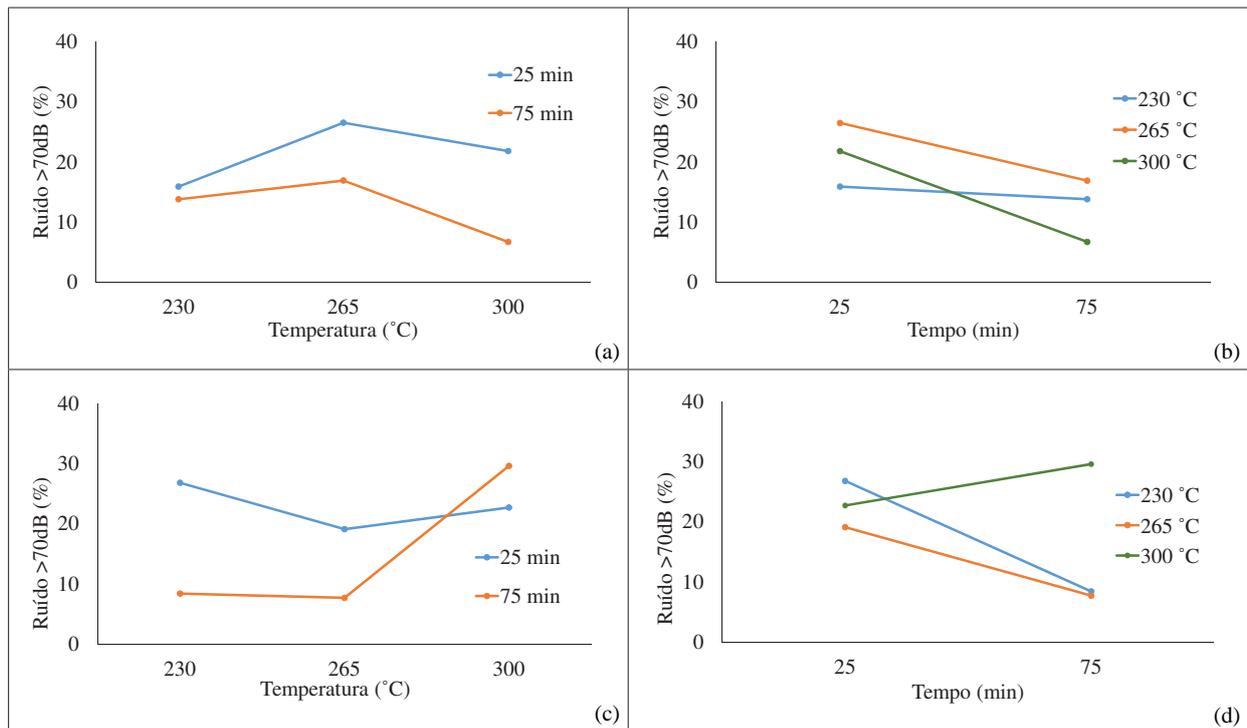


Fig. 3: Representação gráfica da interação entre os fatores tempo e temperatura para a característica de ruído: (a) ruído x temperatura para a formulação A; (b) ruído x tempo para a formulação A; (c) ruído x temperatura para a formulação B; (d) ruído x tempo para a formulação B.

TABELA II: Resumo das análises de variância calculadas para cada variável.

Fonte de variação	Razão entre a média quadrática decorrente da regressão em relação a média quadráticas dos resíduos (F calculado)					
	Tempo		Temperatura		Interação	
	A	B	A	B	A	B
Compressibilidade	10,66	6×10^{-6}	38,96	14,71	0,50	0,63
Massa específica	18,35	1,74	17,07	13,41	2,34	1,48
Resistência ao cisalhamento	80,60	9×10^{-4}	64,13	3,82	5,40	0,39
Dureza Gogan	21,88	11,13	28,86	45,25	0,53	5,13

B. Modelamento Matemático

A regressão linear foi realizada por meio de uma planilha de cálculo criada no software Excel utilizando-se as matrizes descritas em [8], [14], [15]. Como o experimento foi realizado em três níveis para o fator temperatura, isso permite que um termo quadrático seja ajustado para este fator, caso o modelo linear não seja satisfatório [16]. Já para o fator tempo, o termo quadrático não foi possível de ser ajustado em função do tempo possuir apenas dois níveis. As equações matemáticas obtidas e o coeficiente de determinação são apresentados na Tabela III.

Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2), foi baixo para algumas características, principalmente para a formulação B. Porém, separando-se a variação aleatória em torno dos dados (erro puro), verificou-se valores consideravelmente altos, justificando-se os valores baixos do coeficiente de determinação, pois nenhum modelo é capaz de explicar o erro puro. Por meio da Tabela IV é possível comparar o percentual explicado por cada modelo em relação ao percentual máximo explicável. O percentual máximo explicável é a diferença entre a soma quadrática total e soma quadrática do erro puro. Já o percentual máximo explicado é a razão entre a soma quadrática referente a regressão e a soma quadrática total. Considerando-se a variação possível de ser explicada, os modelos descrevem de forma satisfatória os dados para a formulação A, porém para a formulação B existe um grande erro puro associado aos resultados, fazendo com que o máximo de variação explicável seja pequeno.

C. Superfícies de resposta

Utilizando-se as equações apresentadas na Tabela III e por meio do software Gnuplot foi possível construir as superfícies de resposta para cada uma das propriedades. As superfícies de respostas para a formulação A são apresentadas na Figura 4. Na Figura 5 estão dispostas as superfícies de resposta para a formulação B. Por meio das superfícies de resposta encontradas observa-se que para maiores tempos e temperaturas, a formulação A apresenta aumento nos valores de compressibilidade e dureza Gogan, acompanhados da redução nos valores de massa específica e resistência ao cisalhamento. O percentual de ruído acima de 70 dB tende a aumentar para combinações de tempo baixos e temperaturas entre 260°C e

TABELA III: Expressões matemáticas para as propriedades estudadas em função da temperatura (x_1) e do tempo (x_2). R^2 representa o coeficiente de determinação.

Propriedade	Formulação	Equação	R^2
Compressibilidade (%)	A	$y = 0,2642 + 0,0032x_1 + 0,0014x_2$	0,78
	B	$y = 0,2707 + 0,0026x_1 + 0,00001x_2$	0,54
Massa específica (g/cm ³)	A	$y = 2,6402 - 0,0007x_1 - 0,0006x_2$	0,65
	B	$y = 2,5637 - 0,0007x_1 + 0,0002x_2$	0,51
Resistência ao cisalhamento (N/cm ²)	A	$y = 1324,38 - 2,4214x_1 - 2,2067x_2$	0,85
	B	$y = 690,74 - 0,5214x_1 + 0,0067x_2$	0,22
Dureza Gogan (GC)	A	$y = -5,9714 + 0,1686x_1 - 0,1187x_2$	0,76
	B	$y = 6,6286 + 0,0886x_1 + 0,0360x_2$	0,73
Ruído > 70 dB (%)	A	$y = -426,19 + 3,2706x_1 + 0,8056x_2 - 0,0058x_1^2 - 0,0037x_1x_2$	0,99
	B	$y = 570,26 - 3,9060x_1 - 2,0682x_2 - 0,0069x_1^2 - 0,0072x_1x_2$	0,97

TABELA IV: Percentual máximo de variação explicável e percentual máximo explicado para as propriedades compressibilidade, massa específica, resistência ao cisalhamento e dureza Gogan.

Formulação	% máximo de variação explicável		% de variação explicado pelo modelo	
	A	B	A	B
Compressibilidade	10,66	6×10^{-6}	38,96	14,71
Massa específica	18,35	1,71	17,07	13,41
Resistência ao cisalhamento	80,60	9×10^{-4}	64,13	3,82
Dureza Gogan	21,88	11,13	28,86	45,25

280°C. Com maiores valores de temperatura, a formulação B apresenta aumento nos valores de compressibilidade e dureza Gogan, acompanhados da redução nos valores de massa específica e resistência ao cisalhamento. Para as propriedades compressibilidade e resistência ao cisalhamento as variações no tempo de atravessamento não alteraram significativamente estas propriedades, o que pode ser evidenciado pela falta de inclinação nas faixas de valores das superfícies de resposta. O percentual de ruído acima de 70 dB tende a ser maior com os valores mínimos de tempo e temperatura e também para temperaturas próximas a 300°C.

D. Determinação das condições ótimas de processo

Inicialmente considerou-se como ponto ótimo para as propriedades o valor médio com desvio padrão encontrado nas amostras produzidas em forno estacionário, exceto para a propriedade ruído, a qual considerou-se a faixa de zero por cento até o valor encontrado nos testes em amostras do processos estacionário. A análise das faixas foi realizada de forma gráfica, por meio da sobreposição das áreas das propriedades (o ponto ótimo é o ponto onde todas as faixas se sobrepõem). Para tal análise, os valores máximos (médias acrescidas dos desvios padrões), e mínimos (médias decrescidas dos desvios padrões) das propriedades foram igualadas nas equações de

regressão e o parâmetro tempo (representado por x_2), foi isolado. Assim, gera-se um gráfico onde as faixas representam combinações de tempo e temperatura que satisfazem a equação para uma determinada propriedade. Observa-se que não existe uma combinação de tempo e temperatura para a formulação A em forno contínuo que atenda as condições descritas anteriormente, evidenciado pela falta de um ponto comum entre todas as faixas, conforme representado pelo Figura 6. Para formulação B evidencia-se uma região comum em torno de $245 \pm 5^\circ\text{C}$ e 68 ± 1 min, destacada em vermelho pontilhado no gráfico (f) da Figura 7.

O resultado inicial na formulação A indica que o critério para a determinação do ponto ótimo no processo em forno contínuo necessita ser ajustado para alguma das propriedades, possibilitando resultados satisfatórios no material de atrito. Considerando-se agora como ponto ótimo, a faixa obtida entre os valores máximos e mínimos das medições de cada propriedade do material branco (ao invés do desvio padrão) e considerando valores de resistência ao cisalhamento maiores como benéficos para o desempenho do produto final (utiliza-se com restrição apenas o valor mínimo desta propriedade), verifica-se a existência de um ponto comum entre as superfícies em torno de $235 \pm 5^\circ\text{C}$ e 69 ± 1 min, evidenciado em vermelho pontilhado no gráfico (f) da Figura 8.

IV. COMPORTAMENTO DO MATERIAL

Por meio da análise de TMA foi possível analisar o comportamento do módulo elástico* do material de acordo com o tempo de exposição às temperaturas pré-determinadas. Para tal análise foi considerado o comprimento inicial da amostra a medida obtida ligeiramente antes do início de cada ciclo de aplicação de carga, e então, determinou-se um intervalo de tempo para a análise tensão x deformação. Este intervalo deve ser o mesmo para todos os ciclos, possibilitando uma análise comparativa. A Figura 9 apresenta a evolução do módulo elástico em função do tempo de exposição para diferentes temperaturas estudadas.

Verifica-se que com o aumento da temperatura o comportamento da formulação A tende a se estabilizar de forma

* Este não é o valor absoluto do módulo elástico, visto que o material apresenta comportamento viscoelástico.

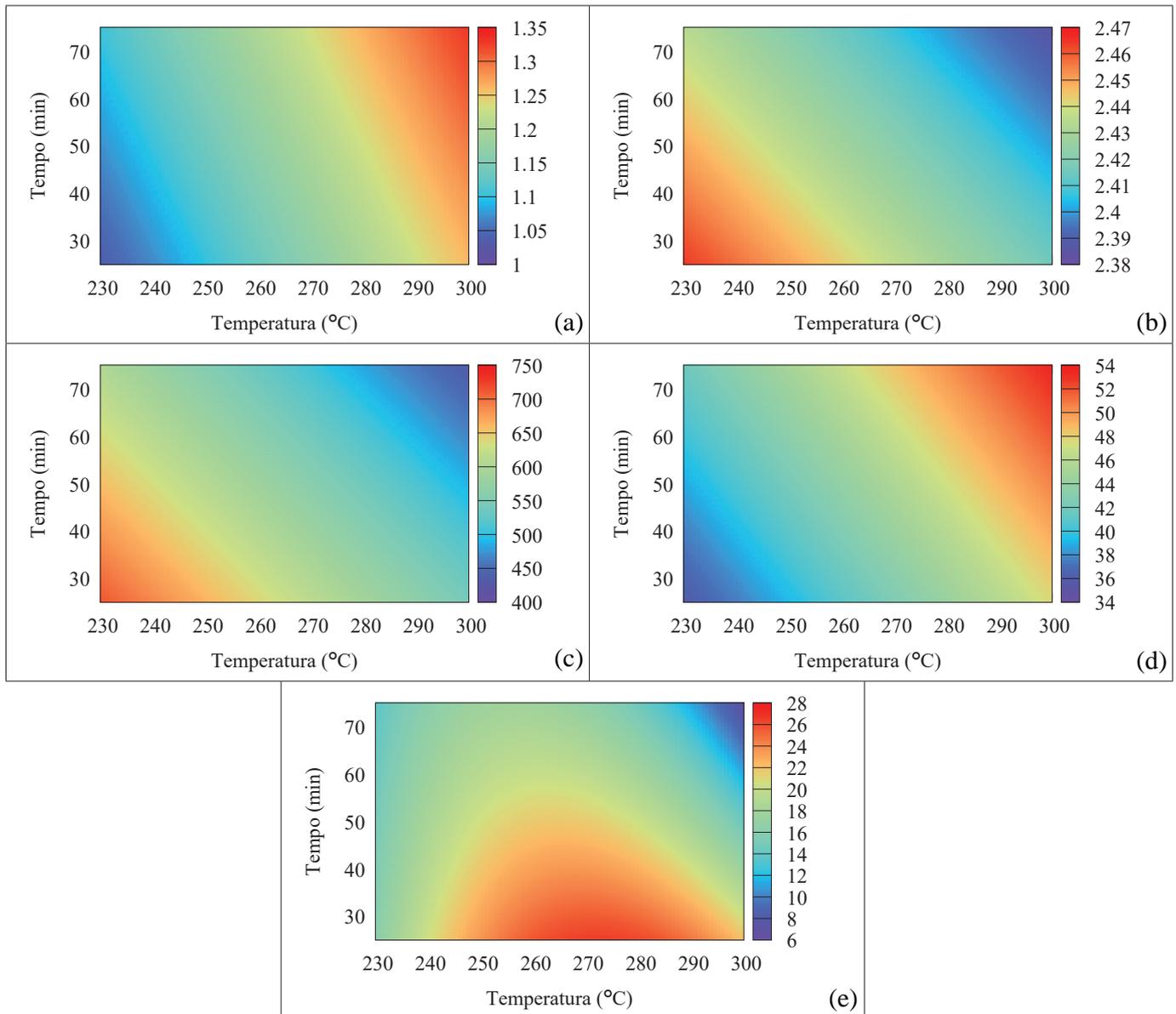


Fig. 4: Superfícies de resposta das propriedades estudadas para a formulação A: (a) compressibilidade (%); (b) massa específica (g/cm^3); (c) resistência ao cisalhamento (N/cm^2); (d) dureza Gogan (GC); (e) ruído $> 70\text{dB}$ (%).

mais rápida e que o valor do módulo elástico aumenta para as temperaturas de 265°C e 300°C , comportamento este característico do aumento no número de ligações cruzadas da resina fenólica (aglomerante), propiciado pela maior quantidade de energia fornecida ao material de atrito. A formulação B também apresenta uma estabilização mais rápida com aumento da temperatura, considerando as temperaturas de 230°C e 265°C . Com 300°C houve redução dos valores encontrados para o módulo elástico, tendo como provável causa a degradação da borracha utilizada como carga na formulação B (não presente na formulação A). Também é possível inferir se a condição ótima determinada anteriormente é compatível com condições onde o material apresenta estabilidade no módulo elástico. Neste ponto, faz-se necessário salientar que na condição real de processo no forno contínuo, cerca de um terço do tempo total compreende a região de resfriamento, portanto os tempos ótimos totais estabelecidos anteriormente devem ser reduzidos em um terço para uma

análise comparativa com os ensaios de TMA, visto que durante todo o tempo apresentado no ensaio, as amostras estão sob temperatura. Considerando a formulação A, verifica-se que com 230°C um tempo mínimo de 45 minutos é suficiente para estabilizar o material. Esta temperatura é muito próxima a temperatura de 235°C estabelecida como ótima e, portanto, o tempo de estabilização do módulo é muito próximo deste valor, confirmando que na condição ótima o material já está com um comportamento estável. Com relação a formulação B, a condição ótima com temperatura de 245°C e 68 min (intermediária entre os valores de 230°C e 265°C estudados), não está muito próxima da condição de tempo necessária para estabilização nesta temperatura (descontando-se um terço no tempo total). Pode-se perceber este comportamento por meio da análise dos dados para 230°C e 265°C na Figura 9, evidenciado pelo maior aumento no módulo com temperatura de 265°C para um mesmo tempo de exposição, em comparação com a temperatura de 230°C . A partir de 60 min a 265°C o

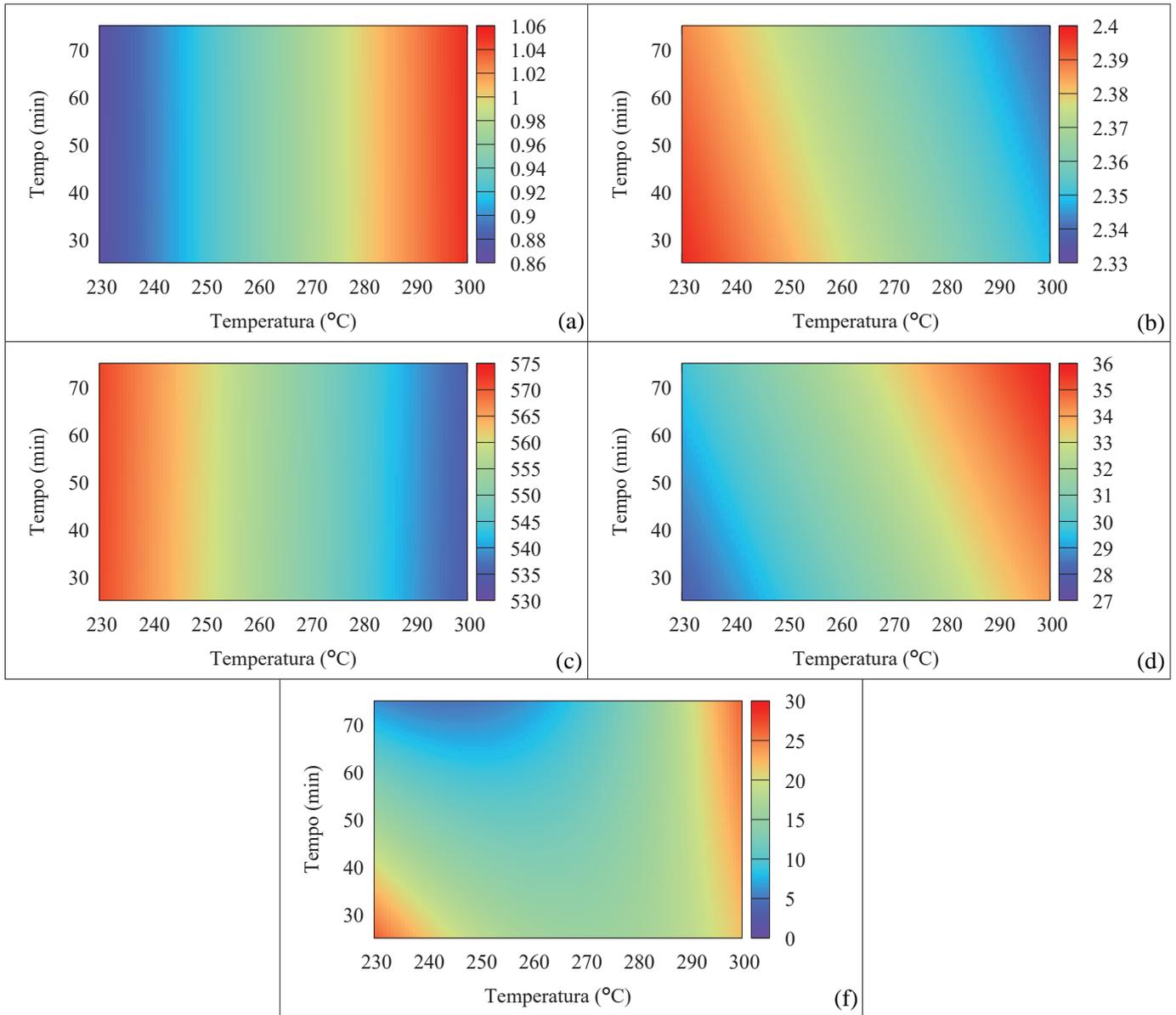


Fig. 5: Superfícies de resposta das propriedades estudadas para a formulação B: (a) compressibilidade (%); (b) massa específica (g/cm^3); (c) resistência ao cisalhamento (N/cm^2); (d) dureza Gogan (GC); (e) ruído $> 70\text{dB}$ (%).

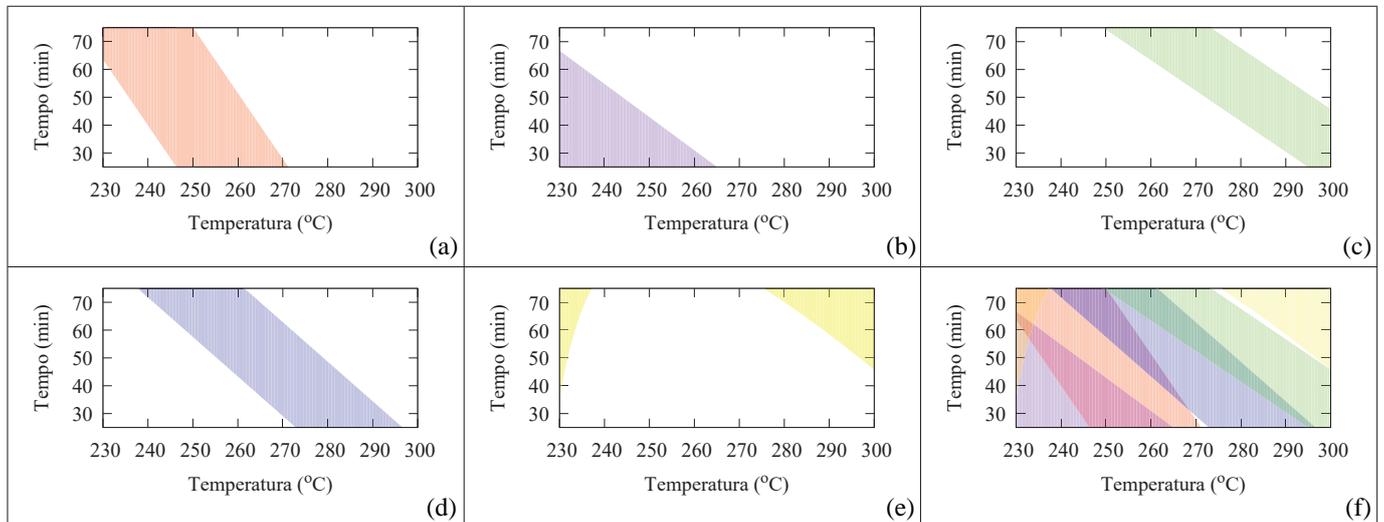


Fig. 6: Análise do ponto ótimo para a formulação A: (a) compressibilidade; (b) massa específica; (c) resistência ao cisalhamento; (d) dureza Gogan; (e) ruído $> 70\text{dB}$; (f) todas as propriedades sobrepostas.

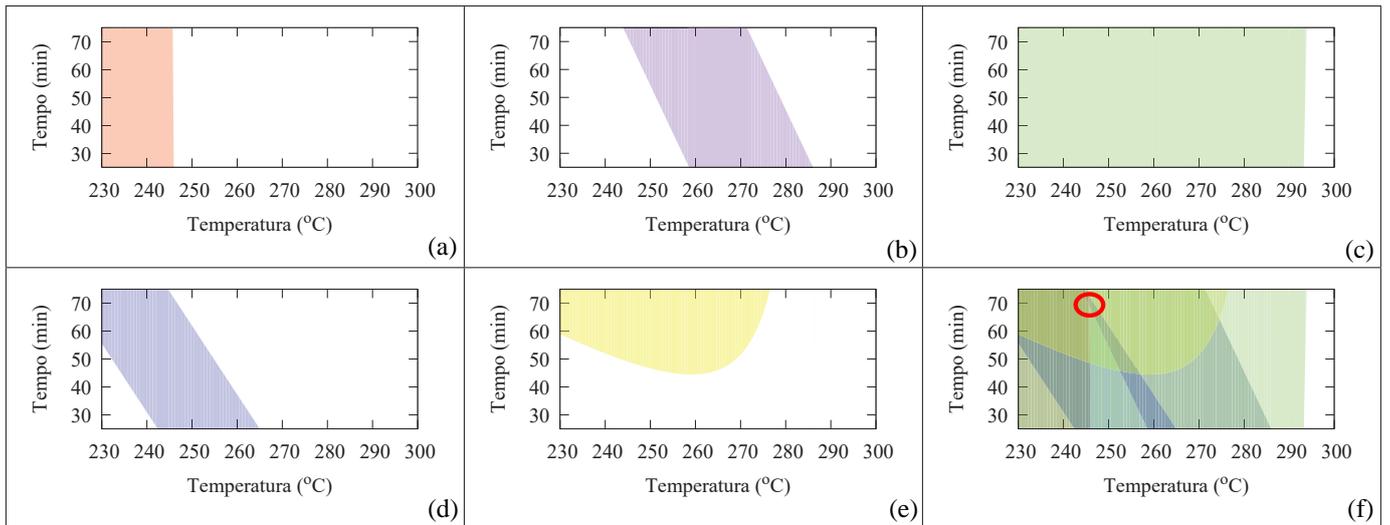


Fig. 7: Análise do ponto ótimo para a formulação B: (a) compressibilidade; (b) massa específica; (c) resistência ao cisalhamento; (d) dureza Gogan; (e) ruído > 70dB; (f) todas as propriedades sobrepostas.

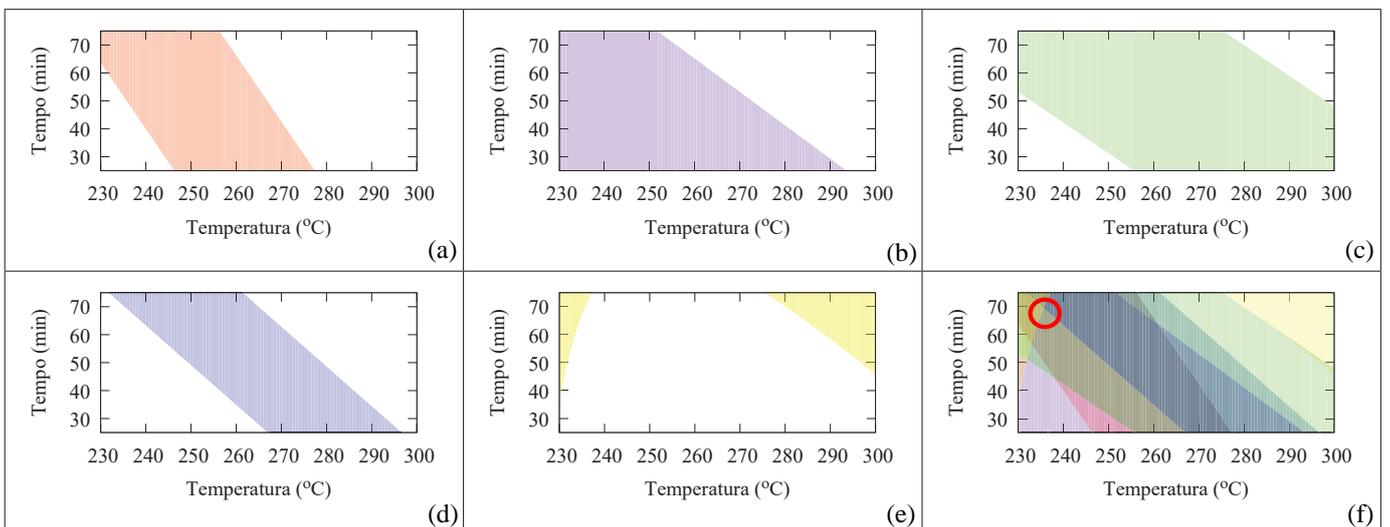


Fig. 8: Análise do ponto ótimo para a formulação A considerando-se os valores mínimos e máximos do material branco: (a) compressibilidade; (b) massa específica; (c) resistência ao cisalhamento; (d) dureza Gogan; (e) ruído > 70dB; (f) todas as propriedades sobrepostas.

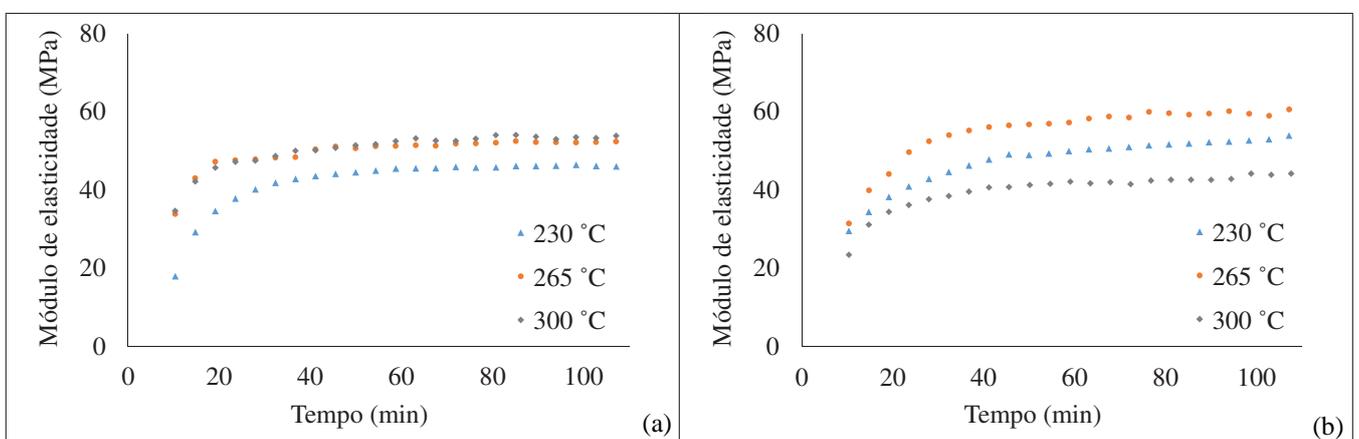


Fig. 9: Evolução do módulo elástico em função do tempo de exposição às temperaturas estudadas: (a) formulação A; (b) formulação B.

módulo tende a se estabilizar de forma bem mais lenta em comparação com o comportamento do módulo na temperatura de 230°C. Na condição ótima determinada, a formulação B encontra-se em uma região onde o aumento no tempo de exposição acarretará pequenas mudanças em sua estabilidade, se comparado as mudanças observadas na faixa de tempos menores, pode-se inclusive afirmar que, o material encontra-se em condição de estabilidade. O fato da formulação B necessitar de mais tempo para sua estabilização contribui para o maior erro aleatório encontrado na medição das propriedades para esta formulação, visto que em praticamente toda faixa do experimento fatorial realizado o material estava sofrendo modificações em maior escala se comparado a formulação A (que atingiu estabilidade de forma mais rápida). De forma geral, constata-se que os melhores resultados observados nas propriedades analisadas (compressibilidade, massa específica, dureza Gogan, resistência ao cisalhamento e percentual de ruído), estão relacionados com condições de estabilidade do material de atrito. Além do mais, nota-se uma deformação permanente no material em função das aplicações de cargas subsequentes utilizadas no ensaio TMA, que conforme [17], é característica de materiais viscoelásticos.

V. CONCLUSÕES

Considerando-se como ponto ótimo os resultados médios com desvio padrão, encontrados para o processo em forno estacionário, verificou-se que para a formulação B, a combinação de $245 \pm 5^\circ\text{C}$ e 68 ± 1 min resulta em resultados semelhantes aos encontrados no processo em forno estacionário. Em relação a formulação A observou-se que a combinação $235 \pm 5^\circ\text{C}$ e 69 ± 1 min atende ao critério de otimização, utilizando-se como critério os valores máximos e mínimos das medições de cada propriedade do material branco (ao invés do desvio padrão) e considerando valores de resistência ao cisalhamento maiores benéficos para o desempenho do produto final. Por meio da análise TMA foi possível observar aumento no módulo de elasticidade do material com o aumento da temperatura de cozimento. Também observou-se a saturação do módulo elástico, independentemente da temperatura, para tempos superiores a 30 min, resultados estes compatíveis com o comportamento observado na análise de otimização do processo de pós-cura em forno contínuo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Fras-le pela disponibilidade dos recursos, fundamentais para a conclusão deste trabalho. Também agradecem ao professor Gláucio de Almeida Carvalho da Universidade de Caxias do Sul pelo apoio e disponibilidade no desenvolvimento e realização do ensaio de TMA.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] B. D. B. Neto; I. S. Scarminio; R. E. Bruns, *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*, Editora da Unicamp, Campinas, 2001.
- [2] A. R. Menetrier, *Estudo de variáveis de composição e processo para controle de compressibilidade*, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.
- [3] G. Nicholson, *Facts about friction*, P&W Price Enterprises, Inc., 1995.

- [4] S. Kim; H. Jang, "Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp," *Tribology International*, vol. 33, n.7, pp. 477 – 484, 2000.
- [5] C. P. R. Nair, "Advances in addition-cure phenolic resins," *Progress in polymer science*, vol. 29, n.5, pp. 401 – 498, 2004.
- [6] American Society for Materials, *Composites ASM Handbook*, ASM International, 2001.
- [7] A. Gardziella; L.A. Pilato; A. Knop, *Phenolic resins: chemistry, applications, standardization, safety and ecology*, Springer-Verlag, Germany, 2 edition, 2000.
- [8] Mariane M. S. P. de Abreu et al., "Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-amina por análises dielétrica e dinâmico-mecânica," 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007.
- [9] J. P. Pascault, *Thermosetting Polymers*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5520 Determinação de dureza Gogan de materiais de fricção tipo orgânico para sistemas de freio*, ABNT, Rio de Janeiro, 1991.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5544 Determinação de densidade relativa para guarnições da embreagem e do freio*, ABNT, Rio de Janeiro, 1998.
- [12] International Organization for Standardization, *ISO 6312 Road vehicles - Brake linings - Shear test procedure for disc brake pad and drum shoe assemblies*, ISO, Suíça, 2012.
- [13] Society of Automotive Engineers, *J2521 Disc and Drum Brake Dynamometer Squeal Noise Test Procedure*, SAE, United States of America, 2013.
- [14] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley Sons, Inc., United States of America, 4 edition, 1997.
- [15] D. C. Montgomery; G. C. Runger, *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*, LTC, Rio de Janeiro, 2 edition, 2003.
- [16] C. R. Hicks; K. V. Turner Jr, *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, Oxford University Press, Inc., New York, United States of America, 5 edition, 1999.
- [17] Willian D Callister Jr., *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*, LTC Editora, Rio de Janeiro, 5 edition, 2002.



Daniel Matté é graduado em Engenharia de Materiais (2016) pela Universidade de Caxias do Sul (UCS, Caxias do Sul-RS). Seus principais interesses de pesquisa incluem materiais de atrito.



Cláudio A. Perottoni é Licenciado em Ciências - Habilitação em Física (1991) pela Universidade de Caxias do Sul, Mestre em Física (1996) e Doutor em Ciências, área de concentração Física Experimental (2000) pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Membro do corpo docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul (PGMAT/UCS), atua principalmente em física de altas pressões e cálculo ab initio de propriedades físicas de materiais.

É revisor de 18 periódicos científicos internacionais.



Ademir Reus Menetrier é graduado em Eng. Química(1986) pela Universidade de Caxias do Sul e possui Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais(2007) pela Universidade de Caxias do Sul. Seus principais interesses de pesquisa incluem materiais de atrito.