Aplicação do Projeto de Experimentos para Análise e Otimização do Processo de Emborrachamento Têxtil

Jair Carlos Bitello da Silva (PPGEP/UFRGS) jair.bitello@uol.com.br

Karina Rossini (PPGEP/UFRGS) karinarossini@hotmail.com

Samanta Yang (PPGEP/UFRGS) samantayang@producao.ufrgs.br

Danilo Cuzzuol Pedrini (PPGEP/UFRGS) danilo@producao.ufrgs.br

Carla Schwengber ten Caten (PPGEP/UFRGS) tencaten@producao.ufrgs.br

Resumo: Constantemente, as empresas, através de seus setores de pesquisa e desenvolvimento, necessitam criar ou aprimorar seus produtos como alternativa de permanência no mercado. Na busca por estas exigências o conceito de projeto de experimentos e otimização de produtos e processos permite o aumento da produtividade, melhoria da qualidade, redução de tempo e custos de produção. Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a otimização da adesão borracha-fibra têxtil numa linha de calandragem para emborrachamento de tecidos. Empregou-se a metodologia de projeto experimento, realizando um projeto fatorial 2^k e a modelagem da variável de resposta através da regressão linear. A análise de variância revelou que aumentos no mH e na velocidade da linha causam um aumento na adesão da borracha-fibra têxtil, enquanto que um aumento na abertura do cilindro misturador provoca uma diminuição na adesão. O ajuste ótimo dos fatores controláveis estudados equivalem a 8,4 lib/pol mH da massa, a abertura do cilindro misturador em 7 mm, a temperatura dos cilindros da calandra em 50°C e a velocidade da linha em 50 m/min encontrando-se, assim, um valor de aproximadamente 764,7 kgf para a adesão fibra-borracha.

Palavras-chave: Projeto de experimento, Otimização, Processo de emborrachamento, Grau de adesão.

1. Introdução

Constantemente, as empresas, através de seus setores de pesquisa e desenvolvimento, necessitam criar ou aprimorar seus produtos como alternativa de permanência no mercado (MOSKOWITZ, 1995). Este processo almeja a adequação dos produtos às demandas geradas pelos desejos e preferências do consumidor.

Na busca por estas exigências os conceitos de projeto de experimentos e otimização de processos permitem o aumento da produtividade, melhoria da qualidade, redução de tempo e custos de produção. Entre as metodologias empregadas de maior freqüência estão os experimentos 2^k, que são úteis em estágios iniciais de uma pesquisa quando muitos fatores devem ser investigados. Estes experimentos permitem, também, que o estudo seja realizado com um menor número de corridas comparando-se com outros tipos de projetos experimentais (MONTGOMERY, 2005a). Os projetos 2^k são especialmente úteis em situações onde se deseja identificar quais são os fatores mais influentes sobre as variáveis de resposta e qual a melhor condição de operação para os fatores considerados significativos (BELEM et al., 2002)

A indústria de pneus, por sua vez, compartilha com estas necessidades, haja vista a

complexidade dos materiais utilizados para confecção de seus produtos bem como o compromisso com o correto desempenho destes. Entre os diversos componentes constituintes do pneu, o tecido emborrachado tem função estrutural importante, tornando-se necessária a investigação de determinados aspectos do processo e sua influência sobre a característica de adesão borracha-fibra.

O tecido emborrachado têxtil, produzido através da aplicação simultânea de folhetas de borracha numa calandra, é empregado na estrutura de um pneu tipo *cross-ply* utilizado em linhas convencionais para caminhões e motos. Entre as principais características de qualidade, relevantes para o desempenho do produto final deste tecido estão: (i) a adesão borracha-fibra, (ii) ensaios de *peeling* e (iii) distribuição peso-espessura ao longo da seção transversal. Para obtenção de níveis satisfatórios destas variáveis, além do controle sobre o composto elastomérico e da fibra têxtil, é necessário um correto desempenho do processo de emborrachamento têxtil.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo otimizar o processo de emborrachamento têxtil. Para isso, utilizou-se um projeto experimental fatorial de forma a estabelecer a influência dos fatores de controle sobre a mais importante das características de qualidade e utilizou-se um algoritmo simplex para a definição dos níveis dos fatores de controle que otimizam a variável de resposta utilizada.

2. Referencial Teórico

2.1 Projeto de Experimentos

Conforme Montgomery (2005b), o projeto de experimentos é uma poderosa ferramenta tanto para o desenvolvimento de produtos e processos quanto para o aprimoramento no rendimento e estabilidade no processo de produção. Ainda, segundo Hahn (1977), planejar um experimento é como um planejar o desenvolvimento de um produto onde cada produto serve a um propósito assim como cada experimento.

Ribeiro e Caten (2000) afirmam que se pode utilizar o projeto de experimentos para encontrar um ajuste ótimo dos parâmetros do processo, maximizando o desempenho do mesmo, minimizando custos e buscando alternativas que produzam sistemas pouco sensíveis aos efeitos dos fatores de ruído. Para tanto, realiza-se uma seqüência de ensaios e, a seguir, analisa-se o estatisticamente os resultados.

O projeto de experimentos compreende um conjunto de diferentes componentes e condições de processos. Um típico projeto de experimentos envolve de 1 a 6 diferentes fatores de controle que quando alterados podem afetar as características de qualidade resultantes do sistema (MOSKOWITZ, 1995; RIBEIRO e CATEN, 2000). Além disso, segundo Moskowitz (1995), o projeto de experimentos garante que os fatores físicos controlados sejam estatisticamente independentes entre si e desta forma seus efeitos podem ser medidos separadamente.

A estratégia geral de um projeto de experimentos consiste em identificar os parâmetros que possam alterar a variável de resposta. A fim de se estudar as alterações causadas nesta variável devem ser definidas quais serão as variáveis controláveis do sistema estudadas e quais serão mantidas constantes, (RIBEIRO e CATEN, 2000 e MONTGOMERY, 2005).

As variáveis controláveis compreendem os parâmetros do processo eleitos para serem estudados a vários níveis do experimento. Geralmente, são aquelas em que se identifica uma necessidade de investigação numa primeira instância. De acordo com Hahn (1977), podem ser utilizadas variáveis quantitativas ou qualitativas como fatores de controle.

Em qualquer processo, também sempre existem os fatores de ruído, designação destinada aos fatores que podem influenciar no desempenho do processo, mas não são possíveis de serem controlados e, portanto são responsáveis pelo erro experimental (RIBEIRO e CATEN, 2000). O conjunto formado pelas variáveis e pelos fatores de ruído constitui as variáveis de entrada do sistema. Este conjunto quando processado tem como resultado as variáveis de resposta, as quais são os aspectos do produto ou processo que permitem quantificar as características da qualidade.

O uso de projeto de experimentos na otimização de formulações possui ampla aplicação em uma grande variedade de setores industriais (PASA, RIBEIRO E NUNES, 1996). Através da literatura, verifica-se uma intensa aplicação da metodologia de projeto de experimentos na área de engenharia. Potenciais aplicações incluem a otimização de produtos, análises de configurações, seleção de materiais, seleção de tolerância de componentes e otimização de processos. Abaixo são demonstrados benefícios da aplicação de projeto de experimentos (ANTONY, HUGHES e KAYE, 1999):

- redução do tempo de desenvolvimento de produto;

- assistência na obtenção de melhores projetos de processos, assegurando a qualidade do produto final;

- aumentar a satisfação do consumidor com o produto;

- reduzir a excessiva variabilidade tanto no desempenho do produto quanto no processo;

- reduzir custos de produtos e processos;

- reduzir a sensibilidade de produtos e processos em relação ao ambiente e variações de produção;

- ajudar a determinar os parâmetros ótimos de processo;

- assistência no desenvolvimento de novos processos e tecnologias de produção;

- melhorar o rendimento e capacidade do processo.

A alternativa mais simples para um experimento é o estudo de um fator a cada tempo, mas esse experimento é ineficiente para o estudo da interação entre as variáveis de resposta. A interação entre os fatores é caracterizada pela falha de um fator em produzir o mesmo efeito na variável de resposta em diferentes níveis dos outros fatores (MONTGOMERY, 2005b).

Para sanar este problema existem os estudos multifatoriais como os experimentos 2^k, que são muito úteis no processo de desenvolvimento e melhoramento de processo, já que permitem estudar k fatores cada um a dois níveis (MONTGOMERY, 2005b). As principais vantagens na realização deste tipo de experimento são a facilidade de análise e quando muitos fatores são investigados (RIBEIRO e CATEN, 2000).

2.2 Processo de Emborrachamento

A linha de emborrachamento têxtil consiste em uma calandra de quatro cilindros com configuração Z, três cavaletes de tração, estufa com duas zonas de temperaturas independentes, pulmão de alimentação e recolhimento, tambores de resfriamento, prensa de junção, grupo de expansores e centradores, cavaletes de alimentação e recolhimento, roll-bender, grupos de motorização e grupo de cilindros misturadores compostos por quebradores, pré-alimentadores e alimentadores.

O controle da calandra é realizado através da medição da gramatura da camada de

borracha depositada sobre as duas superfícies do tecido tratado. Esta medição é feita por medidores nucleares (sensores e emissores de raio-X e sensor e emissor de radiação Beta proveniente de uma fonte de estrôncio 90). Um *software* apropriado realiza a coleta das informações e automaticamente corrige a abertura entre cilindros atuando, também, na correção da curvatura central lateral do bender.

O processo de emborrachamento inicia-se com a alimentação do composto de borracha nos cilindros misturadores com o intuito plastificá-lo. A abertura dos cilindros misturadores influencia no coeficiente de fricção e conseqüentemente na condição de plastificação. O composto elastomérico deve possuir uma viscosidade e temperatura que possibilite a aplicação e formação das folhetas que serão aplicadas sobre o tecido da calandra de emborrachamento.

Simultaneamente ao processo anterior, o tecido têxtil é carregado e tracionado ao longo da linha passando por uma estufa a qual eliminará a umidade residual e fornecerá a temperatura desejada para realização do emborrachamento. A linha dispõe de um conjunto de centradores e expansores automatizado e outros dispositivos que mantém o tecido na posição, largura e distribuição do urdume corretas para o emborrachamento.

As características de qualidade do produto emborrachado dependerão do tipo de composto elastomérico, tipo de fibra têxtil tratada, temperatura da fibra e do composto e forças aplicadas ao longo da seção transversal dos cilindros da calandra. Desta forma, a velocidade da calandra altera a resultante de forças e a temperatura do cilindro interfere no perfil dos cilindros e no comportamento reológico do composto. Uma esquematização do processo pode ser visualizada na Figura 1.

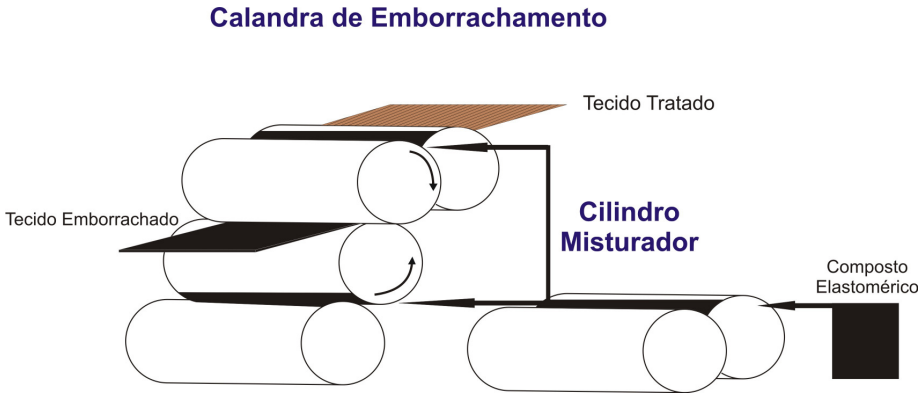

Figura 1 - Processo de emborrachamento do tecido têxtil

3. Estudo Aplicado

A metodologia empregada para a aplicação do projeto de experimentos deste trabalho envolve quatro etapas, conforme sugerido por Fogliatto (1997): (i) identificação do problema, abrangendo a variável de resposta, as variáveis controladas e seus níveis, as variáveis mantidas constantes e os possíveis fatores de ruído; (ii) projeto do experimento; (iii) realização dos ensaios; (iv) análise e conclusão dos resultados.

No presente trabalho, como afirmado anteriormente, pretende-se aplicar o projeto de experimentos no processo de emborrachamento realizado em uma calandra z de uma indústria de pneus. Após reunião com a equipe técnica da empresa, foram levantadas as possíveis características da qualidade do processo, que são: a adesão borracha-fibra, ensaios de *peeling*

e distribuição peso-espessura ao longo da seção transversal. Estas variáveis de resposta compreendem os parâmetros que podem ser medidos e que permitem quantificar as características da qualidade, como sugerido por Montgomery (2005b). Assim, seguindo a priorização das características de qualidade apresentada por Ribeiro e Caten (2000), decidiu-se por utilizar a adesão TQ borracha-fibra como variável de resposta para o experimento, já que esta é a variável que apresenta maior impacto sobre o resultado final.

Para a identificação dos fatores de controle e seus níveis a serem utilizados, bem como a definição dos fatores constantes e dos fatores de ruídos utilizou-se os métodos apresentados por Coleman e Montgomery (1993) e Ribeiro e Caten (2000). A equipe técnica apontou 10 variáveis do processo que podem influenciar na adesão TQ borracha-fibra, que são apresentadas na Tabela 1.

Apesar de todos os parâmetros de processo exercerem influência sobre as características de qualidade, estudá-los de forma integral demandaria muito tempo e investimentos elevados, desta forma fez-se necessário definir quais fatores seriam utilizados no experimento. Dessa forma, a priorização dos parâmetros de processo e a posterior seleção dos fatores controlados e mantidos constantes foi feita seguindo o método apresentado por Ribeiro e Caten (2000), o qual leva em conta principalmente a importância teórica que o fator de controle exerce sobre as características de qualidade, a importância de cada característica de qualidade e a facilidade de ajuste de cada fator de controle. Nesta etapa é essencial um conhecimento prévio do processo, resultado da combinação da experiência prática com o entendimento teórico (MONTGOMERY, 2005b).

Assim, foram escolhidos como fatores controláveis no processo em análise somente quatro: (i) o módulo alto (mH) do lote de massa, o qual se caracteriza por ser uma medida de torque e está relacionado com as características físicas da matéria-prima, (ii) a temperatura dos cilindros da calandra; (iii) abertura dos cilindros da calandra e (iv) a velocidade da linha conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 1 – Descrição dos parâmetros do processo.

Parâmetro do processo	**Ajuste atual**	**Intervalo de pesquisa MIN**	**Intervalo de pesquisa MAX**	**Facilidade ajuste**
Lote da massa (mH)	8±0,8 lb/pol	7,2 lb/pol	8,8 lb/pol	5
Temperaturas dos cilindros da calandra	50±5ºC	50 ºC	60 ºC	10
Temperatura dos cilindros de misturadores	70±5 ºC	60 ºC	80 ºC	7
Abertura dos cilindros de misturadores	8±1 mm	7 mm	9 mm	8
Coeficiente de fricção	0,27 %	0,24 %	0,30 %	4
Altura do banco de massa nos misturadores	10±1 cm	9 cm	11 cm	2
Emprego de resfriamento nos cilindros homogeneizadores	*On/off*	-	-	10
Altura do banco de massa na calandra	6±1 cm	4 cm	8 cm	4
Velocidade da linha	45 m/min	45 m/min	50 m/min	10
Lote do tecido tratado	-	-	-	2

TABELA 2 – Descrição dos fatores controláveis.

Fatores controláveis	**PR**	**Número de Níveis**	**Níveis Reais**
mH do Lote de massa	61	2	7,5 – 8,4 lb/pol
Temperatura dos cilindros da calandra	54	2	50 – 55 ºC
Abertura do cilindro misturador	61	2	7 – 9 mm
Velocidade da linha	54	2	45 – 50 m/min

Durante a priorização, o coeficiente de fricção recebeu o mesmo grau de priorização (PR) da temperatura e velocidade dos cilindros das calandras, porém não foi escolhido como fator a ser estudado devido à dificuldade ser modificado no equipamento. Os demais parâmetros de processo que não foram escolhidos para serem estudados são mantidos constantes ao longo do experimento para que não influenciem no resultado final do estudo (RIBEIRO e CATEN, 2000; MONTGOMERY, 2005a).

Todo experimento realizado é composto por um erro experimental. A fonte geradora deste erro é denominada de fator de ruído, os quais são os fatores que não podem ser removidos nem controlados. Após uma análise do processo, identificou-se como um fator de ruído a temperatura ambiente, já que esta afeta a consistência e viscosidade da matéria-prima utilizada.

De acordo com Coleman e Montgomery (1993) e Ribeiro e Caten (2000), as restrições experimentais são condições que limitam ou prejudicam a execução do experimento e devem ser levantadas, permitindo a definição do design experimental que melhor se adapte à situação do processo a ser estudado. No trabalho em questão, o emborrachamento do tecido em seus diferentes parâmetros foi planejado para ser executado em um único turno vespertino, pois neste período a amplitude térmica é menor. Desta forma, aplicou-se um experimento fatorial 2^4, sem blocos e com 5 repetições, totalizando 80 ensaios a serem utilizados.

Os testes foram realizados na calandra Z após *setup* da máquina para o composto elastomérico e tecido específicos. Para cada uma das condições definidas para o experimento foram retiradas 5 amostras sempre 15 minutos depois de fixada as condições de cada teste, este tempo de espera é necessário de forma a garantir o equilíbrio do sistema.

A adesão borracha-tecido foi definida através de um dinamômetro que mede a carga necessária para separação por cisalhamento/deslocamento das duas camadas de tecido emborrachado vulcanizadas em uma prensa sob condições pré-determinadas. O valor de adesão é dado pela relação carga /unidade de superfície. Os valores são medidos com o corpo de prova a temperatura ambiente. Os resultados da adesão foram omitidos de forma a preservar o sigilo da empresa estudada.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) gerados pelo software Minitab 15 são apresentados na tabela 3.

TABELA 3 – Descrição dos resultados da ANOVA gerados pelo Minitab.

Fonte	Gl	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F	Valor p
X1	1	102603	102603	29,44	0,00
X2	1	87848	87848	25,20	0,00
X3	1	8968	8968	2,57	0,11
X4	1	48857	48857	14,02	0,00
X1*X2	1	679	679	0,19	0,66
X1*X3	1	7315	7315	2,10	0,15
X1*X4	1	6534	6534	1,87	0,18
X2*X3	1	64809	64809	18,59	0,00
X2*X4	1	1505	1505	0,43	0,51
X3*X4	1	4606	4606	1,32	0,25
X1*X2*X3	1	1593	1593	0,46	0,50
X1*X2*X4	1	24887	24887	7,14	0,01
X1*X3*X4	1	31960	31960	9,17	0,00
X2*X3*X4	1	16503	16503	4,73	0,03
X1*X2*X3*X4	1	1911	1911	0,55	0,46
Erro	64	223074	3485,53		
Total	79	633650	8020,89		

Como é possível observar na Tabela 3, os efeitos principais de mH, abertura do cilindro e velocidade da linha demonstraram ser estatisticamente significativos para a adesão borracha-tecido, bem como a interações de dois fatores e abertura do cilindro x temperatura. Ainda, entre as interações de três fatores, destacam-se como significativas, ao nível de 5%, as que contêm o fator velocidade da linha.

Na Figura 3, apresenta-se o gráfico de efeitos principais para os fatores controláveis. Nesta figura, é possível observar que o efeito principal da temperatura é desprezível quando comparado aos efeitos principais dos demais fatores de controle, confirmando os resultados da análise de variância. Também é possível observar que as variáveis mH e velocidade apresentam um efeito positivo sobre a adesão fibra-borracha, enquanto a abertura do cilindro exerce um efeito negativo sobre esta característica de qualidade.

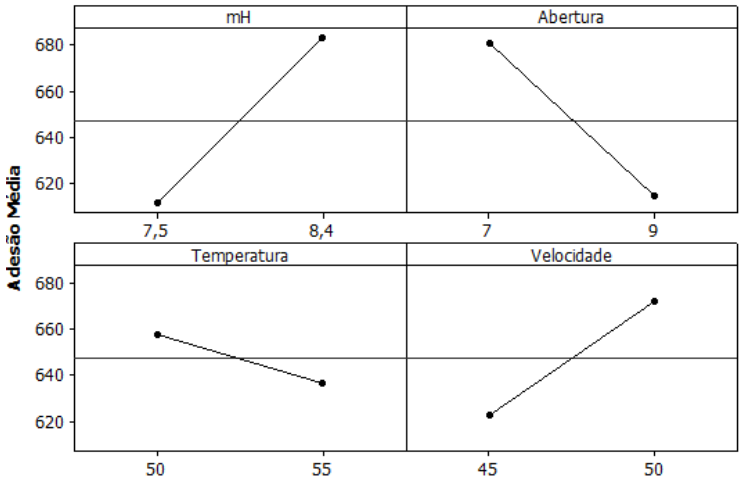

FIGURA 3 – Gráfico de efeitos principais sobre a variável de resposta adesão tecido.

Na Figura 4, apresenta-se o gráfico de interações entre os fatores de controle. Através da análise desta figura, a única interação significativa evidenciada é a interação entre os fatores abertura e temperatura, o que está de acordo com a análise de variância anterior.

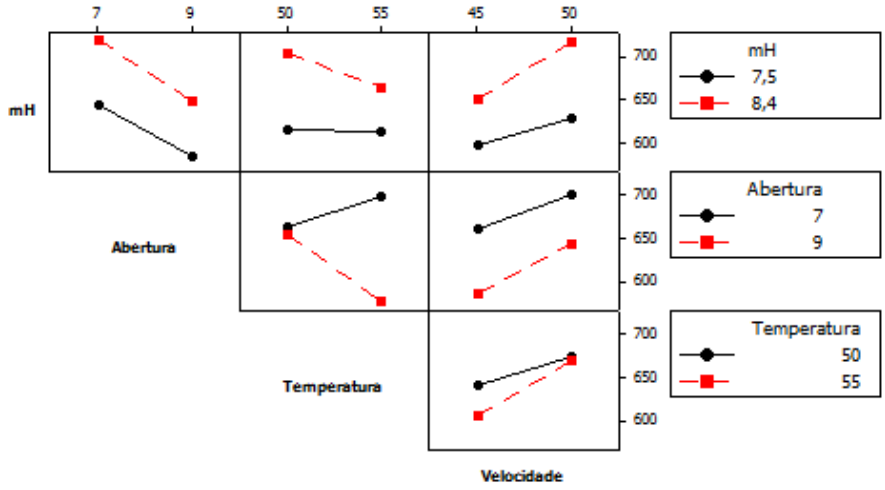

FIGURA 4 – Gráfico de efeitos das interações sobre a característica de qualidade adesão fibra-borracha.

Os pressupostos de uma análise de variância de que os resíduos são normalmente distribuídos com média zero e desvio-padrão constante devem ser verificados (MONTGOMERY, 2005a). Para verificar a constância da variância, constrói-se um gráfico de resíduos *versus* os valores preditos de Y e para verificar a normalidade dos resíduos utiliza-se o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Na Figura 5 apresentam-se os gráficos dos resíduos *versus* valores estimados da adesão e o gráfico de normalidade dos resíduos. Através da análise destes gráficos, é possível observar que o desvio-padrão dos resíduos pode ser considerado como aproximadamente constante e que os resíduos podem ser considerados como normalmente distribuídos. O valor p para o teste de Kolmogorov-Smirnov foi superior a 0,15, o que confirma a normalidade dos resíduos ao nível de 5% de significância.

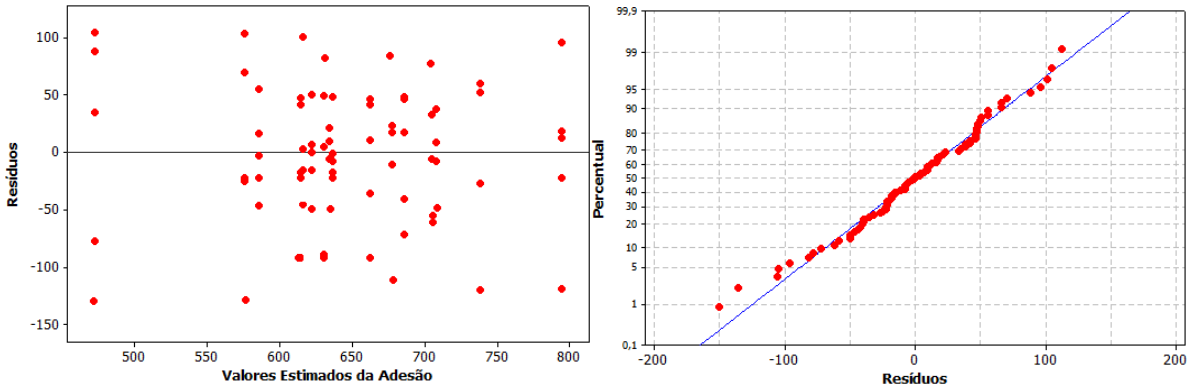

FIGURA 5– Gráfico de Resíduos versus valores estimados e gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

A partir dos resultados do experimento faz-se uma modelagem através da regressão múltipla, tendo apenas os efeitos significativos apontados pela análise de variância como regressores. A regressão linear múltipla emprega o principio de mínimos quadrados,

estimando uma equação matemática onde através dos valores das variáveis independentes, prevê o valor da variável dependente. Ajusta-se um modelo de regressão para a média de cada uma das variáveis de resposta em função dos fatores controláveis. No ajuste dos modelos de regressão, utilizam-se níveis codificados dos fatores controláveis, pois isso permite estudar o efeito puro e poder comparar os coeficientes obtidos da regressão, facilitando o ajuste dos modelos. A equação de regressão gerada pelo Minitab foi:

$$Adesão = 647{,}488 + 35{,}813x_1 - 33{,}138x_2 + 24{,}713x_4 - 28{,}463x_1x_2 - 17{,}638x_1x_2x_4 - 19{,}987x_1x_3x_4 + 14{,}362x_2x_3x_4$$

R^2=59,6%

Esta equação foi utilizada para a otimização do processo, utilizando-se o algoritmo Simplex através do Solver do Excel. Ressalta-se que a característica de qualidade adesão fibra-borracha é do tipo maior-melhor. Através desse procedimento, chegou se ao seguinte ajuste ótimo:

TABELA 4 – Resultados da Otimização

mH	Abertura	Temperatura	Velocidade	Adesão
8,4 lib/pol	7 mm	50°C	50 m/min	764,676 kgf

Destarte, dentro do experimento realizado, o máximo valor de adesão que pode ser atingido é de aproximadamente 764,7 kgf. Analisando tecnicamente esses resultados, observa-se que uma diminuição da abertura dos cilindros misturadores causa um aumento de fricção, o que favorece a plastificação do composto, beneficiando, conseqüentemente a adesão fibra-borracha. Da mesma forma, o efeito da velocidade está intimamente relacionado com a força de aplicação das folhetas de borracha sobre o tecido resultando na melhora da adesão fibra-borracha. Finalmente, um mH mais elevado indica cargas de ruptura maiores para o composto vulcanizado, melhorando, conseqüentemente a adesão.

5. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência dos fatores do processo (velocidade da linha, o nível de plastificação do composto e a temperatura de processamento) de emborrachamento têxtil, assim como otimizar a adesão borracha - fibra-têxtil, com redução da variabilidade e elevação dos valores médios (característica desejável) para características de adesão. Na abordagem proposta, realizou-se um projeto de experimento fatorial 2^k contemplando quatro fatores controláveis com cinco repetições.

O planejamento do experimento estudou como variável de resposta de maior relevância a adesão TQ borracha-fibra, levando em consideração fatores controláveis como mH do lote de massa, a temperatura dos cilindros da calandra, a abertura do cilindro misturador e a velocidade da linha.

Os fatores controláveis significativos foram mH do lote de massa, a abertura do cilindro misturador e a velocidade da linha. Além dos efeitos principais citados observou-se

que a interação de dois fatores abertura do cilindro misturador e temperatura dos cilindros da calandra foi significativa. Entre as interações de três fatores, as seguintes interações foram consideradas significativas: mH do lote de massa, abertura do cilindro misturador e velocidade da linha; mH do lote de massa, velocidade da linha e temperatura dos cilindros da calandra; e abertura do cilindro misturador, velocidade da linha e temperatura dos cilindros da calandra.

Através da análise de variância, foi possível observar que aumentos no mH e na velocidade da linha causam um aumento na adesão TQ borracha fibra, enquanto que um aumento na abertura do cilindro misturador provoca uma diminuição na adesão.

Após a estimação de um modelo de regressão, utilizou-se o algoritmo simplex para a definição dos níveis dos fatores controláveis que maximizam a característica de qualidade. Desta forma, ajustando o mH da massa em 8,4 lib/pol, a abertura do cilindro misturador em 7 mm, a temperatura dos cilindros da calandra em 50°C e a velocidade da linha em 50 m/min, é possível obter um valor de aproximadamente 764,7 kgf para a adesão fibra-borracha, o qual representa o valor otimizado para este parâmetro.

Referências

ANTONY, J.; HUGHES, M.; KAYE, M. Reducing manufacturing process variability using experimental design technique; a case study. Integrated Manufacturing Systems, 1999.

BELEM, A. C. V.; PEREIRA, A. M. T.; DARÉ, C. T.; et al. **Programa seis sigma Black Belt**. FDG, volume II, 2002.

COLEMAN, D. A.; MONTGOMERY, D.C. A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. **Technometrics**, v. 35, n. 1, p. 1-12, 1993.

FOGLIATTO, F. S. A statistical tool to analyse the efficiency of experimental designs prior to their execution – a case study. **Revista Produto e Produção**, vol. 1, n.1, pág. 12-21, 1997.

GOEL, P. S.; GUPTA, P.; JAIN, R.; TYAGI, R. K. **Six sigma for transactions and service**. McGraw-Hill: New York, 2004

HAHN, GERALD J. Some things engineers should know about experimental design. **Journal of Quality Technology**, vol. 9, n. 1, p. 13-20, 1977

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6º Ed. John Wiley & Sons Inc: Estados Unidos, 2005. 643p. (a)

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 5° ed. John Wiley & Sons Inc: Estados Unidos, 2005. 759p. (b)

MONTGOMERY, D. C. The use of statistical process control and design of experiments in product and process improvement. **IIE Transactions**, vol 24, n. 5, p. 1-17, 1992

MOSKOWITZ, H. R. One practitioner´s overview to applied product optimization. **Food Quality and Preference**, vol. 6, p. 75 – 81, 1995

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. . **Projeto de experimentos**. 1º Ed. FEENG: Porto Alegre, 2000. 128p.