



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

AMANDA LEMOS LIMA

**MELHORIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UMA INDÚSTRIA DE
FABRICAÇÃO DE ESPUMAS FLEXÍVEIS DE POLIURETANO UTILIZANDO A
METODOLOGIA SEIS SIGMA
ESTUDO DE CASO: REDUÇÃO DE RACHOS NA ESPUMA D38**

FORTALEZA

2018

AMANDA LEMOS LIMA

MELHORIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UMA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO
DE ESPUMAS FLEXÍVEIS DE POLIURETANO UTILIZANDO A
METODOLOGIA SEIS SIGMA
ESTUDO DE CASO: REDUÇÃO DE RACHOS NA ESPUMA D38

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes

FORTALEZA

2018

AMANDA LEMOS LIMA

**MELHORIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UMA INDÚSTRIA DE
FABRICAÇÃO DE ESPUMAS FLEXÍVEIS DE POLIURETANO UTILIZANDO A
METODOLOGIA SEIS SIGMA
ESTUDO DE CASO: REDUÇÃO DE RACHOS NA ESPUMA D38**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em: 18/06/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ivanildo José da Silva Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L696m Lima, Amanda Lemos.
Melhoria do processo produtivo em uma indústria de fabricação de espumas flexíveis de poliuretano utilizando a metodologia Seis Sigma Estudo de caso: redução de rachos na espuma D38 / Amanda Lemos Lima. – 2018.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes.

1. Poliuretano Flexível. 2. Seis Sigma. 3. DMAIC. I. Título.

CDD 660

A Deus.

Aos meus pais, Ernando e Nilcimar.

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, que me deu força, coragem e saúde durante toda a minha vida.

A minha família, pelo apoio que me foi dado e pela confiança depositada em mim. Aos meus pais Ernando e Nilcimar, por nunca terem medido esforços para que eu tivesse a melhor educação, por acreditarem nos meus sonhos, por sonharem junto comigo e por sempre acreditarem que eu era capaz.

Ao meu namorado Jackson Gurgel, por todo apoio, suporte, carinho e amor durante todos esses anos de graduação e, principalmente, por tanto ter me ajudado na realização deste trabalho.

Aos amigos que fiz durante o curso, que foram essenciais nesta trajetória, por todo o apoio durante os cinco anos. Em especial, Alexandre, Santangela, Paula, Thainá, André, Cícero, De Assis, Ítalo, Camila, Amando e Kennedy.

Aos meus irmãos de vida do grupo secal, Renan, Carlos Eduardo, Daniella, Geovana, Hannah, Analia e Beatriz, por todo o companheirismo durante tantos anos.

As minhas amigas Priscila e Yasmin, por tantos momentos compartilhados, por todo apoio e carinho.

Ao meu gestor Henrique Delgado, por toda paciência e todos os conhecimentos compartilhados.

Aos meus companheiros de trabalho do setor espumação, por toda ajuda durante a realização do projeto.

Ao Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes pela oportunidade de sua orientação profissional para a realização deste trabalho.

Aos professores doutores participantes da banca, Ivanildo José, Rílvia Saraiva e Fabiano Fernandes pelo tempo dedicado.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu persistisse e chegasse até aqui.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

O Seis Sigma é uma metodologia que vem sendo amplamente utilizada em melhoria de processos industriais por possuir ferramentas diversificadas que se adequam aos mais diferentes seguimentos. O processo industrial de fabricação de espumas flexíveis de poliuretano é simples, constituído pela reação de isocianato, polióis e água. Os produtos obtidos, que possuem uma ampla diversidade de densidades e dureza, são amplamente utilizados pela indústria moveleira e de confecção. Entretanto, mesmo simples, o processo possui muitas variáveis que podem gerar oportunidades de problemas. O trabalho teve como objetivo utilizar um dos métodos do seis sigma, o método DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), para avaliação e melhorias do processo de fabricação de espumas de poliuretano, com foco na espuma D38, visto que esta é uma espuma com alta incidência de rachos fora de padrão. Foram utilizadas as ferramentas computacionais Minitab e Excel. Desta forma, foi possível analisar os dados históricos para obter dados estatísticos e gráficos indicativos do problema. A metodologia apresentou resultados satisfatórios para o processo de fabricação e ganho financeiro.

Palavras-chave: Poliuretano flexível. Seis Sigma. DMAIC.

ABSTRACT

The Six Sigma is a methodology that has been widely used in industrial process improvement because it has diversified tools that fit the most different segments. The industrial process of manufacturing flexible polyurethane foams is simple, consisting of the reaction of isocyanate, polyols and water. The resulting products, which have a wide diversity of densities and hardness, are widely used by the furniture and confection industry. However, although simple, the problem has many variables that can generate opportunities for problems. This work had as objective to use the six sigma methods, DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve and Control), for evaluation and improvement of the polyurethane foam manufacturing process, focusing on D38 foam, since this foam has a high incidence of out-of-standard cracks. It were used the computational tools Minitab and excel. Thus, it was possible to analyze the historical data to obtain statistical data and charts indicative of the problem. The methodology presented satisfactory results for the manufacturing and financial gains.

Keywords: Flexible polyurethane. Six Sigma. DMAIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de polimerização e formação da uretana	16
Figura 2 – Reação de expansão e formação da ureia	16
Figura 3 – Isômeros do tolueno diisocianato	19
Figura 4 – Formação do alofanato	19
Figura 5 – Formação do biureto	19
Figura 6 – Produção de espumas pelo processo descontínuo em caixote	23
Figura 7 – Produção de espumas pelo processo contínuo	24
Figura 8 – Componentes X qualidade da espuma	28
Figura 9 – Ciclo DMAIC	30
Figura 10 – Etapas do método DMAIC	32
Figura 11 – Diagrama de causa e efeito para rachos na espuma D38	40
Figura 12 – Mapa de processo para fabricação de espumas	41
Figura 13 – Configurações dos tanques de armazenagem	44
Figura 14 – Telas encontradas na saída da tubulação (a) antes da melhoria e (b) depois da melhoria	44
Figura 15 – (a) novo agitador utilizado e (b) configuração do batedor	46
Figura 16 – Representação esquemática (a) processo e (b) caixas	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Séries temporais para porcentagem de rachos	36
Gráfico 2 – Histograma para porcentagem de rachos	37
Gráfico 3 – Teste P-Valor para normalidade	38
Gráfico 4 – Gráfico de Pareto para tipos de problema	39
Gráfico 5 – Gráfico de colunas para porcentagem de rachos	48
Gráfico 6 – Gráfico de séries temporais para quantidade de blocos produzidos e com rachos durante o mês de abril	49
Gráfico 7 – Diagrama de Pareto para resultados obtidos	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes para fabricação de espuma	17
Tabela 2 – Escala de qualidade sigma	29
Tabela 3 – Métricas	38
Tabela 4 – Causas priorizadas na etapa análise	42
Tabela 5 – Análise química da espuma D38	45
Tabela 6 – Meta alcançada	47
Tabela 7 – Economia atingida	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PU	Poliuretano
EFPU	Espumas Flexíveis de Poliuretano
TDI	Tolueno Diisocianato
MDI	Difenilmetano Diisocianato
PDCA	Planejar, Executar, Planejar, Agir
MAIC	Medir, Analisar, Melhorar, Controlar
DMAIC	Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar
RPM	Rotações Por Minuto
D	Densidade
cP	Centipoise
Kg	Quilograma
m	Metro
g	Gramma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Espumas flexíveis de poliuretano	15
2.2	Aspectos químicos da síntese de EFPU	15
2.3	Reagentes para síntese de EFPU	17
2.3.1	<i>Poliol</i>	17
2.3.2	<i>Isocianato</i>	18
2.3.3	<i>Catalisadores</i>	20
2.3.4	<i>Surfactantes</i>	21
2.3.5	<i>Agentes de expansão</i>	21
2.4	Processos de fabricação	22
2.4.1	<i>Processo descontínuo tradicional – caixote</i>	23
2.4.2	<i>Processo contínuo</i>	24
2.5	Problemas na produção de espumas em caixote	24
2.5.1	<i>Relacionados ao caixote</i>	25
2.5.2	<i>Relacionados à agitação e ao misturador</i>	26
2.5.3	<i>Relacionados às mudanças ambientais</i>	26
2.5.4	<i>Relacionados aos produtos químicos</i>	27
2.6	Seis Sigma	29
2.7	DMAIC	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	DMAIC	32
3.1.1	<i>Definir</i>	32
3.1.2	<i>Medir</i>	33
3.1.3	<i>Analisar</i>	33
3.1.4	<i>Melhorar</i>	34
3.1.5	<i>Controlar</i>	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Definição	36
4.2	Medição	39
4.3	Análise	42

4.4	Melhoria	43
4.4.1	<i>Mudança na configuração dos tanques</i>	43
4.4.2	<i>Análise química de formulações</i>	45
4.4.3	<i>Troca do agitador e aumento da rotação</i>	46
4.4.4	<i>Produção não sequenciada</i>	47
4.5	Controle	47
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O interesse pela utilização do Seis Sigma vem crescendo a cada dia diante da necessidade das indústrias de melhorarem seus processos e serem cada vez mais competitivas no mercado. A metodologia Seis Sigma foi desenvolvida, principalmente, para melhoria contínua de processos utilizando pouco ou nenhum recurso financeiro, atingindo valores altos de economia.

As ferramentas utilizadas para a realização dos projetos são com bases estatísticas, assim como as utilizadas nos sistemas de qualidade. Entretanto, por ser mais bem estruturado e focado no ganho financeiro, o Seis Sigma tende a trazer melhores resultados que as ferramentas de qualidade tradicionais (DUARTE, 2011). O método DMAIC é um dos modelos que direciona de forma satisfatória o Seis Sigma, seguindo as cinco etapas: definição, medição, análise, melhoria e controle.

As espumas flexíveis de poliuretano, produzidas desde 1937 e utilizadas principalmente pelas indústrias moveleiras e de confecções, são produzidas pela reação simultânea entre isocianato, poliois e água. Já o balanceamento das reações químicas é feito pela utilização de catalisadores e silicones surfactantes. Os processos de fabricação podem ser contínuos ou descontínuos. O processo contínuo permite alta eficiência do processo, entretanto não é possível fabricação de variedades de densidades de espumas. Já o processo descontínuo, mais conhecido como processo em caixote, permite a fabricação de espumas em formato cilíndrico ou retangular, são produzidas espumas por processos em batelada e, por isso, espumas de diversas densidades podem ser produzidas em curto período de tempo, além disso, é o processo com menor custo entretanto com menor eficiência (VILAR, 2002).

Diversos problemas podem ser observados durante a produção de espumas flexíveis, desde problemas químicos relacionados às quantidades e proporções de produtos ou qualidade da matéria prima, até problemas operacionais, como erro de pesagem, máquinas sem ajustes e com necessidade de reparos ou mistura ineficiente (SANTOS, 2016).

Perante o que foi exposto, o presente trabalho teve como objetivo reduzir a quantidade de problemas do tipo rachos em espumas de uma densidade específica, 38Kg/m^3 , em uma indústria de fabricação de espumas flexíveis de poliuretano para uso nos seguimentos de confecções e calçadistas, utilizando o modelo DMAIC da metodologia Seis Sigma. Foram realizadas análises estatísticas de dados e aplicações de melhorias no processo produtivo, além do estudo do ganho financeiro da instituição ao fim do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Espumas flexíveis de poliuretano

Os Poliuretanos (PU), um dos principais polímeros das últimas décadas, foram desenvolvidos por Otto Bayer e outros colaboradores no laboratório da indústria alemã I.G.Farben em 1937. O grupo estudava a reação de poliadição de um isocianato com um polioliol, esta reação viria a tornar-se uma história de sucesso e move até hoje bilhões de dólares no mundo inteiro (ALMEIDA, 2014).

A primeira produção em planta piloto de espumas flexíveis de poliuretano (EFPU) foi anunciada na Alemanha em 1952 e a produção comercial teve início em 1954. As primeiras espumas foram produzidas baseadas na reação entre isocianato aromático e polioliol poliéster, logo depois, em 1957, melhores resultados foram obtidos utilizando polioliol poliéster, alavancando a indústria de fabricação de EFPU (HERRINGTON, 1997).

Ainda segundo Herrington (1997), em 1958, a combinação entre polióis poliéster, novos catalisadores amínicos e organometálicos e novos silicones surfactantes tornou possível a técnica de fabricação “one shot” (uma só etapa) que dispensa o uso de prepolímeros, formados pela mistura entre polioliol e isocianato, e possibilita que todos os reagentes sejam misturados em uma só etapa. Hoje, esse ainda é o processo mais utilizado industrialmente por permitir a produção de grandes volumes de EFPU.

É possível observar ao redor a diversidade de aplicações e formas em que aparecem os poliuretanos. Em próteses, calçados, colchões, móveis, equipamentos esportivos, peças de automóveis e até em construção civil, sendo a indústria moveleira a que mais utiliza do poliuretano da forma flexível para fabricação de colchões e estofados. Já as espumas rígidas são amplamente utilizadas em isolamento térmico (SANTOS, 2016).

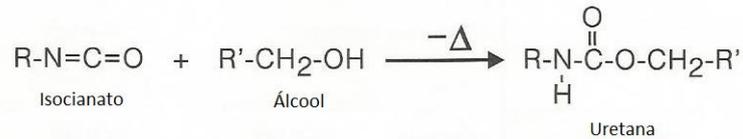
2.2. Aspectos químicos da síntese de EFPU

Os Poliuretanos são baseados na reação exotérmica de isocianatos que contenham dois ou mais grupos - NCO com moléculas de polióis que possuem grupamentos hidroxila (-OH) ou outros compostos que possuam dois ou mais hidrogênios ativos. Existem poucos tipos de isocianato, sendo os mais conhecidos o TDI (Tolueno Diisocianato) e o MDI (Difenilmetano Diisocianato). Já os polióis são encontrados em variedade com peso molecular entre 300 e 6000 gramas/mol (VILAR, 2002).

A química para formação da EFPU é simples e envolve duas reações principais que são responsáveis pela polimerização e expansão da espuma.

A reação responsável pela polimerização é a de formação da uretana:

Figura 1 – Reação de polimerização e formação da uretana.

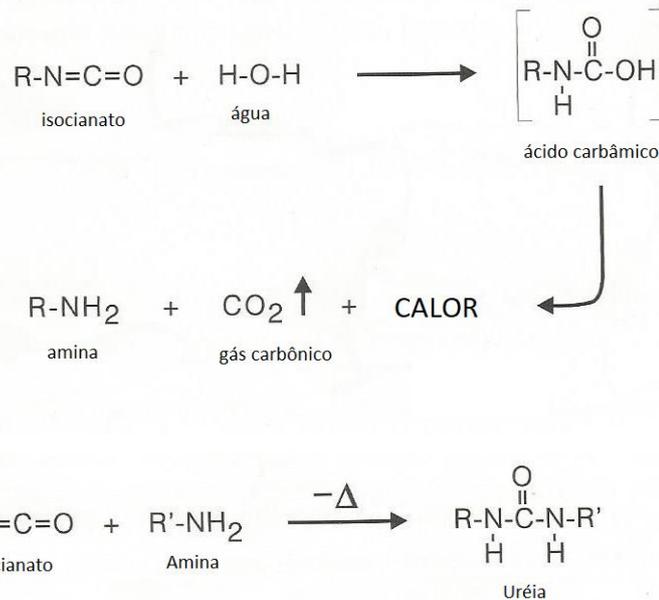


Fonte: Adaptado de Herrington (1997).

Para fabricação da espuma, o polímero de poliuretano deve ser expandido pela introdução de gás. Esta fonte de expansão é o dióxido de carbono produzido pela reação entre um grupo isocianato e água (HERRINGTON, 1997).

Durante a reação de expansão e formação de ureia é formado um produto intermediário instável, ácido carbâmico, que rapidamente se decompõe em amina e dióxido de carbono.

Figura 2 – Reação de expansão e formação da ureia.



Fonte: Adaptado de Herrington (1997).

No processo em uma única etapa, estas reações deverão ser aceleradas e balanceadas com o uso de catalisadores para evitar que a espuma colapse, ou seja, não consiga atingir o objetivo e formação polimérica final (SANTOS, 2016).

2.3. Reagentes para a síntese de EFPU

Para fabricação de EFPU, são necessários vários componentes selecionados para alcançar as características desejadas para a espuma. Na tabela 1, são listados os principais reagentes para produção das EFPU.

Tabela 1 — Componentes para fabricação de espuma.

Componente	Partes em Peso
Poliol	100
Água	1.5 - 5
Silicone Surfactante	0.5 - 2.5
Catalisador Amínico	0.1 - 1
Catalisador Organometálico	0.1 - 0.5
Aditivos	variável
Isocianato	25 - 85

Fonte: Próprio autor

O principal componente é o polioliol, e todas as partes em peso dos demais são calculadas com base nos cem por cento desse reagente.

Nos tópicos a seguir, será discutido o efeito geral de cada classe.

2.3.1 Polioliol

O polioliol já é um polímero, ou seja, uma molécula grande composta por muitas unidades de repetição. Diversos tipos de poliolióis são utilizados para a fabricação de EFPU. Os poliolióis poliéter trioliol, obtidos a partir da polimerização de óxidos de propileno, etileno e butileno, são os mais utilizados nos processos industriais. O peso molecular médio desse tipo de polioliol é de 3000 g/mol e possui número de hidroxila médio de 56. Além desses, existem também os poliolióis poliéster, empregados para obtenção de espumas de alta performance (VILAR, 2002).

O polioliol é um dos produtos mais importantes para a fabricação de EFPU, visto que todos os produtos da formulação estão relacionados a 100 partes de polioliol. Essa unidade partes significa que existem na formulação “x” partes de um determinado produto para 100 partes do polioliol básico conforme mostrado, anteriormente, em tabela. Além disso, a escolha do tipo de polioliol utilizado para fabricação também determinará as características mecânicas da espuma, como resiliência, dureza, resistência a rasgo, tensão de ruptura entre outras características. Outros tipos de poliolióis podem ser empregados na fabricação de EFPU como forma de aditivos, para ganho de propriedades específicas (SANTOS, 2016).

Existem, também, os poliolióis poliméricos denominados copolímeros, que são poliolióis poliéteres com sólidos de poli(estireno-acrilonitrila) dispersos, que funcionarão como um tipo de carga orgânica já dissolvida no polioliol. Esse tipo de polioliol é utilizado, principalmente, para aumentar a dureza da EFPU bem como melhorar a resistência ao rasgamento. Entretanto, após a adição de copolímero, a resiliência do bloco é piorada. Esse tipo de polioliol pode compor até 80% da massa de poliolióis totais e é muito utilizado na indústria de moda na fabricação de bojos para sutiã.

Portanto, não existe um único polioliol que supra todas as necessidades melhorando todas as características da espuma. Cada tipo de polioliol vai atuar em um conjunto de atividades, positiva ou negativamente, por isso é tão importante a análise criteriosa dos objetivos a serem alcançados durante a formulação das EFPU.

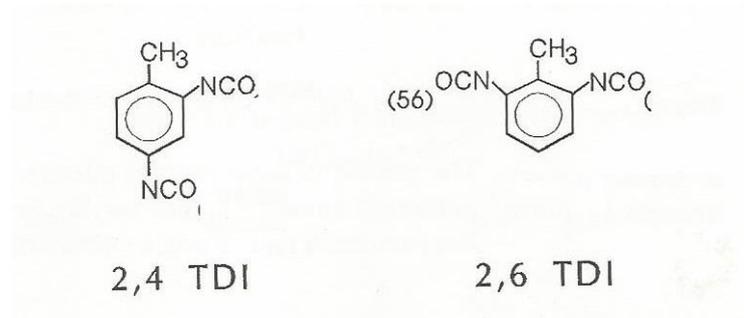
2.3.2 Isocianato

O isocianato fornece os grupos NCO para reagirem com poliolióis, água, extensores de cadeia e formadores de ligações cruzadas. Todos os isocianatos usados na indústria hoje possuem, pelo menos, dois grupos isocianato por molécula. A reatividade no grupo NCO dependerá da estrutura do isocianato, por exemplo, isocianato alifáticos são mais reativos que os aromáticos, pois substituintes que elevem a carga positiva no carbono do grupo NCO aumentam a reatividade.

Em espumas flexíveis, o isocianato mais comumente utilizado é o TDI, tolueno diisocianato, obtido a partir do tolueno produzido após as reações químicas de nitração, hidrogenação e fosgenação no setor petroquímico. É um produto altamente reativo com substâncias que contenham hidrogênio ativo, por isso, reage com polioliol, água e a amina resultante da reação de expansão.

O tolueno diisocianato geralmente é comercializado em misturas isômeros 2,4 e 2,6, principalmente nas proporções 80/20, 65/35 e 100/0, sendo a maior proporção sempre do isômero 2,4, que é o isômero mais reativo.

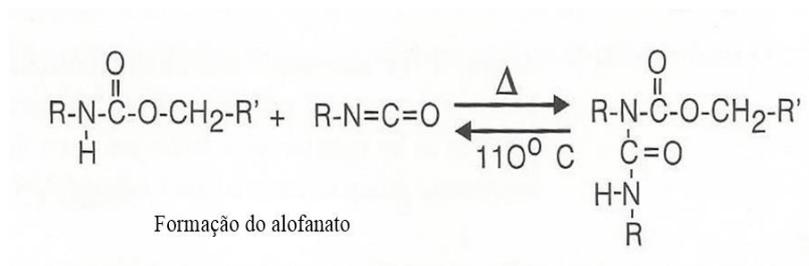
Figura 3 — Isômeros do tolueno diisocianato.



Fonte: Adaptado de Herrington (1997)

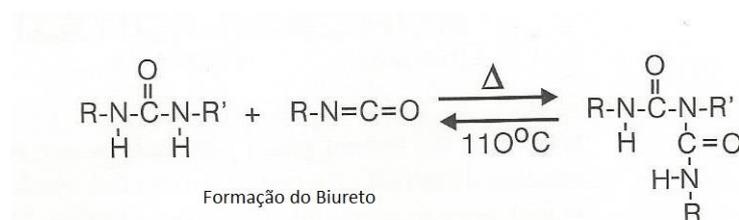
Quando o TDI está em excesso na formulação, o que é muito natural na fabricação de EFPU, outras duas reações ocorrem simultaneamente às reações principais, a formação de biureto e de alofanato. Essas reações serão importantes para as propriedades mecânicas da espuma.

Figura 4 — Formação do alofanato.



Fonte: Adaptado de Herrington (1997)

Figura 5 — Formação do biureto.



Fonte: Adaptado de Herrington (1997)

Este excesso de diisocianato de tolueno é avaliado através do índice de TDI que é o teor de TDI na formulação de EFPU. A faixa de índice mais utilizada para as espumas flexíveis é entre 105 e 125, o que representa 5% até 25% de excesso de TDI.

Existe também outro tipo de isocianato, o MDI, difenilmetano diisocianato, que começou a ser utilizado, principalmente, por apresentar baixa volatilidade e menor toxicidade que o TDI (VILAR, 2002).

Este diisocianato é utilizado, principalmente, para fabricação de espumas rígidas e moldadas, mas, recentemente, já vem sendo empregado na fabricação de espumas flexíveis em conjunto com o TDI a fim de obter melhores propriedades mecânicas.

2.3.3 Catalisadores

Catalisadores são substâncias utilizadas para acelerar e balancear as reações. Industrialmente, a ausência de catalisadores faz com que isocianato reaja lentamente com os polióis e água. Além disso, os catalisadores são utilizados para aumentar a seletividade, visto que diferentes reações acontecem simultaneamente na fabricação de EFPU. As propriedades finais das espumas, também, são dependentes das reações de polimerização, expansão e da formação de biureto e alofanato.

Aminas terciárias, alifáticas ou aromáticas e compostos organometálicos são os mais utilizados para fabricação das espumas. As aminas atuam na catálise da reação de expansão, já os organo metais são utilizados, principalmente, na catálise da reação de polimerização entre isocianato e polióis (VILAR, 2002).

As aminas atuam em diversas funções no processo produtivo. Na gelificação, que é a reação de formação do poliuretano, quando ele passa da forma líquida para o gel logo antes da expansão, na expansão promovendo, fortemente, a reação entre isocianato e água e na cura da pele, que é o envoltório da espuma para que ela se mantenha firme e adquira suas propriedades em menos tempo. Além disso, essas aminas também podem ter ação retardada quando bloqueadas com ácidos carboxílicos, dessa forma é possível aumentar o tempo de formação da espuma quando este estiver muito rápido, o que é prejudicial para o processo.

A reação de formação do polímero ou a gelificação entre isocianato e os polióis é promovida por catalisadores organometálicos. Dos muitos metais disponíveis, os compostos de estanho são os mais utilizados. Contudo, são compostos com instabilidade hidrolítica, ou seja, na presença de água são oxidados facilmente. Para fabricação de EFPU, o catalisador organometálico mais utilizado é o octoato de estanho.

A falta do catalisador octoato de estanho na formulação pode gerar problemas como rachos devido à polimerização ineficiente em relação à pressão exercida pelos gases de expansão. Já o excesso do catalisador fará com que o tempo de gelificação seja muito curto e a espuma adquira paredes celulares tão rígidas que promoverão o encolhimento, fechamento, da espuma.

2.3.4 Surfactantes

A maioria das EFPU é feita com auxílio de surfactantes não iônicos a base de silicone. Esses surfactantes exercem várias funções, entre elas diminuir a tensão superficial, emulsionar ingredientes incompatíveis na formulação, promover a nucleação das bolhas formadas durante a mistura e estabilizar o crescimento da espuma reduzindo as tensões nas paredes celulares, sendo essa a função mais importante.

Os silicones surfactantes atuam, então, baixando a tensão superficial permitindo que seja introduzido, na mistura, o ar formador dos núcleos das células. Ao aumentar a quantidade de silicone serão obtidas maiores quantidades de células de tamanhos menores e o inverso, menos células de tamanhos maiores. Se utilizado em quantidades adequadas, o surfactante estabiliza a mistura e a polimerização, evitando a coalescência das bolhas. O excesso de surfactante tem resultados parecidos com o excesso de catalisador organometálico, causando fechamento da célula e enrugamento da espuma. Na produção industrial, o silicone pode ser pré-misturado com catalisadores amínicos e água, desde que seja um silicone não hidrolisável, pois os hidrolisáveis poderão perder sua atividade após 24 horas de mistura.

2.3.5 Agentes de expansão

Espumas flexíveis de poliuretano têm sua densidade controlada, principalmente, através de seus agentes de expansão. A água é o principal agente, que reage com o TDI gerando o crescimento da espuma. Entretanto, para densidades leves, o alto teor de água pode gerar incêndio e, por isso, são utilizados outros agentes expansores. O agente auxiliar mais utilizado atualmente é o cloreto de metileno, embora já venham tentando substituí-lo devido a questões ambientais.

O teor de água influencia bastante nas propriedades mecânicas da espuma. O uso de água como expansor gera segmentos rígidos com maior dureza, por isso o cloreto de metileno, também, pode ser utilizado para obtenção de espumas mais macias. O teor de

agentes de expansão é inversamente proporcional à densidade, quanto maior o teor de agentes, menor a densidade encontrada na espuma. No entanto, essa diminuição de densidade é linear em relação ao teor de água e não linear em relação ao teor de cloreto de metileno, dessa forma, o uso de cloreto desestabiliza a reação e, por isso, ao fazer uso desse agente auxiliar é necessário haver o aumento de catalisador organometálico e silicone surfactante (SANTOS, 2016).

2.4. Processos de fabricação

A reação química entre o polioliol e o isocianato é instantânea, ou seja, começa imediatamente após a mistura dos dois componentes quanto na presença dos catalisadores adequados, essa polimerização é exotérmica até a conclusão. Independente do método de mistura e dispersão utilizado, alguns requisitos determinam a qualidade da espuma flexível (HERRINGTON, 1997).

A temperatura de condicionamento dos produtos deve ser controlada, visto que propriedades como viscosidade, densidade e reatividade de polióis e isocianatos variam com a temperatura. Controlar a temperatura é essencial pra que seja garantida a reprodutibilidade do processo (HERRINGTON, 1997).

A medição de quantidades deve ser precisa, uma vez que os ingredientes devem ser misturados nas corretas proporções formuladas para que a reação ocorra conforme previsto.

Outro fator crítico para o processo de fabricação é a mistura efetiva. Esta deve ser suficiente para que todos os componentes, que possuem características de viscosidade diferentes e elevadas, formem uma mistura perfeitamente homogênea (SANTOS, 2016).

A mistura, também, deverá estar livre de contaminantes, materiais alheios à formulação de líquidos ou sólidos que possam causar problemas à espuma finalizada.

O processo de cura, também, deve ser acompanhado, pois as espumas não adquirem todas as suas características logo após a fabricação. São necessárias cerca de 48 horas até que todas as propriedades físicas estejam garantidas.

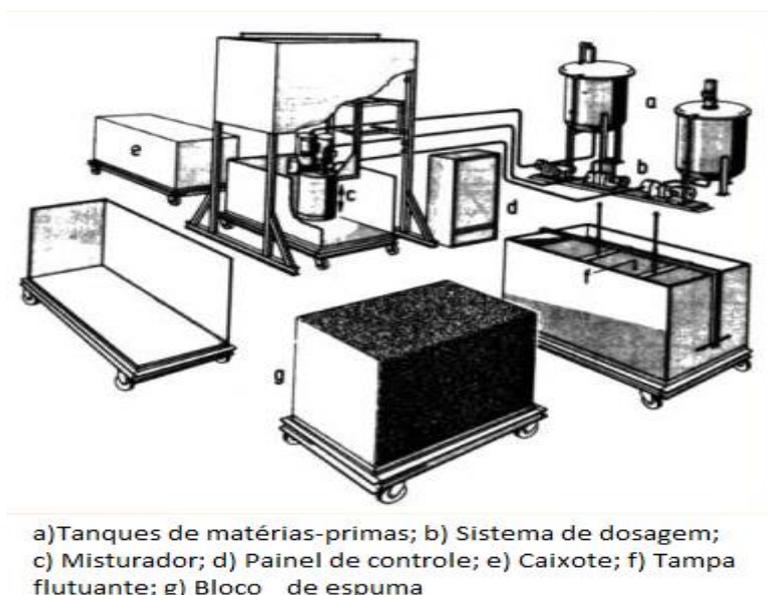
Para a produção de EFPU, podem ser utilizados os processos em bloco ou moldados, porém os blocos possuem maior representatividade no mercado. Estes blocos podem ser fabricados em processos contínuos e descontínuos conforme mostrado nos tópicos seguintes.

2.4.1 Processo descontínuo tradicional – caixote

Nesse processo, as espumas são fabricadas individualmente, por isso é indicado para escalas de produção reduzidas. Durante o processo, uma pré-mistura é feita em um vaso com agitação suficiente para garantir a homogeneização dos produtos. Primeiramente, são misturados os polióis, corantes e aditivos, logo após são adicionados água, silicone surfactante e catalisador de amina. Uma terceira mistura é iniciada com o catalisador organometálico, visto que este apresenta sensibilidade à água. Cada uma dessas misturas deve ser de cerca de 50 segundos. O último misto acontece após a adição do TDI e, por ser uma reação instantânea, deverá ter em média de 5 a 8 segundos. É importante evitar a formação de bolhas durante o processo de mistura e derramamento dos produtos, pois poderá acarretar falhas na estrutura celular (VILAR, 2002).

Os produtos são, então, despejados no caixote onde a espuma ganhará forma. É importante que as paredes do caixote sejam cobertas de desmoldantes para evitar o atrito durante o crescimento. Uma tampa móvel, também, deve ser utilizada para garantir que o bloco cresça de forma retilínea e uniforme. Após cerca de 4 minutos, o bloco pode ser retirado do caixote e levado para um espaço onde passará pelo processo de cura.

Figura 6 — Produção de espumas pelo processo descontínuo em caixote.



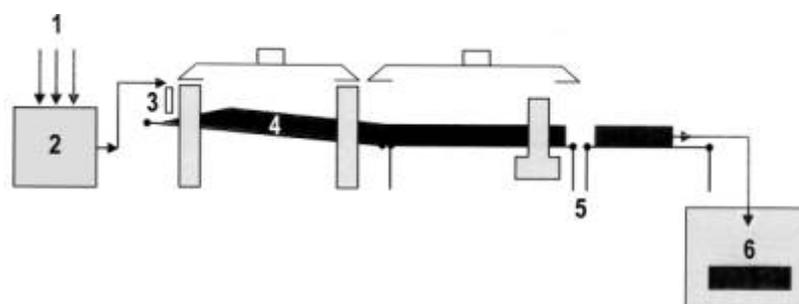
Fonte: Vilar (2002).

O processo permite que espumas com diferentes densidades sejam produzidas em curto espaço de tempo. Podem ser produzidas em formato cilíndrico e retangular, além de ser um processo a baixo custo. Entretanto, além da capacidade produtiva limitada, o bloco de espuma pode apresentar variações das características físicas em seu corpo (VILAR, 2002).

2.4.2 Processo contínuo

O processo contínuo permite que seja obtida uma alta eficiência na fabricação de EFPU. As espumas conquistadas pelo processo contínuo convencional possuem alta qualidade por não apresentar variações de características ao longo da espuma e possuir bolhas reduzidas. O processo também é simples, os reagentes condicionados para controle de temperatura são medidos e misturados, e, para a formação do bloco, o crescimento e cura são feitos em esteira móvel, em seguida a espuma é cortada em blocos e seguem para cura final de cerca de 48 horas (VILAR, 2002).

Figura 7 — Produção de espumas pelo processo contínuo.



- 1) Matérias-primas; 2) Tanques diários; 3) Cabeça misturadora;
4) Bloco da espuma; 5) Corte vertical; 6) Cura final.

Fonte: Vilar (2002).

2.5. Problemas na produção de espumas em caixote

Segundo Vilar (2002), problemas como células fechadas, colapsos ou rachos podem ocorrer na produção de blocos de espuma flexível devido a erros na formulação, ou mesmo por problemas mecânicos. As complicações são resolvidas por ajuste na formulação e controle do processo. Por isso, é importante que existam registros de todas as ocorrências e alterações realizadas.

É importante lembrar que duas reações principais ocorrem simultaneamente, as reações de polimerização e expansão. Essas duas reações precisam estar balanceadas para que o material possa ser formado adequadamente; qualquer perturbação nesse equilíbrio acarretará má formação do bloco de EFPU (SANTOS, 2016).

Os rachos podem ocorrer em qualquer parte do bloco, dependendo da causa. Colapso é quando a espuma cresce total ou parcialmente e depois cai. Já as espumas com células fechadas ocorrem quando as bolhas de gás não estouram ao fim da expansão, resultando espumas com baixa elasticidade e possível encolhimento.

Os tópicos seguintes explanarão as diferentes possíveis causas de rachos nas EFPU.

2.5.1 Relacionados ao caixote

Um dos principais problemas relacionados ao caixote refere-se ao carrinho, ou fundo do caixote. No caso do misturador com fundo falso, o próprio carrinho será a base do misturador. É importante que ele seja liso e regular; desníveis ou aquecimento demasiado podem gerar rachos nos blocos de espuma. Por isso, é importante observar sempre as condições do carrinho e mantê-lo sempre úmido para que o calor do bloco anterior não influencie nos blocos seguintes.

As condições do caixote em si, também, devem ser observadas, pois ranhuras e desníveis, também, influenciam a ocorrência de problemas. Enquanto a espuma cresce, ela está em atrito com o caixote, por isso é importante que este esteja em perfeito estado e que em todo ele seja usado um desmoldante para que a espuma em crescimento deslize com facilidade, pois o atrito age como uma força contrária ao crescimento do bloco e pode, também, ocasionar problemas.

É importante, também, que o caixote não sofra com empurrões ou solavancos durante o fechamento do caixote do momento do creme, nem durante o processo de crescimento da espuma; estes empurrões podem ocasionar rachos internos e da parte média ao topo do bloco (SANTOS, 2016).

Além disso, o caixote conta com uma tampa móvel que necessita de atenção. Essa tampa é utilizada como contrapeso, permitindo variação de pressão sobre a espuma em fase final de crescimento. Esta tampa deve possuir furos regularmente espaçados e cantos chanfrados que facilitem a saída de gases após o “blow off”, que é a liberação dos gases da espuma.

Segundo Santos (2016), caso a tampa esteja com peso excessivo, rachos nas bordas e nas extremidades superiores podem surgir. Esse peso demasiado influencia negativamente, principalmente, em espumas de densidade baixa. A altura em que a tampa é colocada, também, pode causar problema, pois ela deve ter contato com o bloco apenas nas fases finais do crescimento do bloco. Apenas espumas de alta densidade podem ter tampas mais baixas. Os problemas são bem parecidos com os percebidos pelo peso em excesso. A tampa não pode estar torta e deve deslizar no caixote com suavidade para evitar trepidações que causem rachos semelhantes aos citados anteriormente.

Os furos da tampa, também, devem ser sempre desobstruídos, evitando que o ar fique preso e seja liberado pelas laterais do bloco, ocasionando rachos, principalmente, no meio da espuma.

2.5.2 Relacionados à agitação e ao misturador

Um dos fatores críticos para a obtenção de uma espuma de qualidade é a eficiência de mistura. Mistura ineficiente pode causar células grossas, perda de propriedades físicas ou rachos nas espumas. Por outro lado, mistura excessiva ocasiona a formação de muitas bolhas que causarão buracos na estrutura celular.

É importante, também, atentar para o tipo de agitador utilizado e sua dimensão, pois mudanças podem ocasionar necessidades de variações na formulação. Durante a manutenção, é importante verificar se não houve inversão do lado da hélice e se a rotação indicada é a mesma realizada. Caso ocorra alguma variação, pode acarretar fechamento de célula e falha de uniformidade na estrutura celular.

O uso de chicanas no misturador, também, deve ser analisado. Caso o agitador não consiga atingir uma mistura homogênea e eficiente, as chicanas devem, então, ser instaladas, atentando para que, também, não ocorra o excesso de mistura.

O misturador deve estar sempre limpo, pois sujeiras e incrustações na parte interna podem desprender-se e causar rachos pontuais na parte interna da espuma.

2.5.3 Relacionados às mudanças ambientais

Problemas relacionados às variações ambientais são clássicos na fabricação de EFPU. A velocidade de reação é diretamente proporcional à temperatura. Portanto, em dias quentes, a velocidade de reação aumenta e, em dias frios, diminui. Para controlar essas

variações são feitas modificações na quantidade de catalisadores. Se a temperatura já está agindo como catalisador, a quantidade de estanho ou amina terciária deve ser reduzida; se é um dia frio, deficiente de temperatura, a catálise é completa com catalisadores. Caso não seja realizado o ajuste, poderá ocorrer rachos na espuma e blocos enrugados. Por isso, é importante controlar a temperatura e verificar parâmetros como tempo de creme e crescimento da espuma. Esse aumento de temperatura externo irá influenciar na temperatura de reação e dos produtos. Por isso, é tão importante, também, que os produtos sejam condicionados em temperatura estável antes de serem levados para o misturador.

2.5.4 Relacionados aos produtos químicos

Se os blocos apresentam rachos continuamente ou em intervalos regulares, o problema pode ser químico e é necessário ajuste de formulação (VILAR, 2002). Produtos fora de especificação ou contaminados podem gerar problemas, e, até que seja identificado o produto causador, serão produzidos muitos blocos defeituosos. Por isso, é importante que os fabricantes de EFPU comprem os insumos de empresas sérias e cobrem sempre os laudos técnicos dos lotes de produtos.

É importante, também, que os produtos sejam bem acondicionados. Os componentes da formulação de EFPU possuem porcentagem baixa de água em sua composição, mas são altamente higroscópicos. Então, se o armazenamento não for adequado, o produto absorverá água e essa água desbalanceará a reação, visto que essa água pode reagir com TDI ocasionando expansão maior que o esperado e gerando rachos.

Na figura 8, podemos ver o comportamento de cada um dos principais produtos causadores de problemas caso utilizados em proporções incorretas.

2.6. Seis Sigma

De acordo com Rotondaro (2014)

Seis Sigma é uma metodologia estruturada que incrementa a qualidade por meio da melhoria contínua dos processos envolvidos na produção de um bem ou serviço, levando em conta todos os aspectos importantes de um negócio. O objetivo do Seis Sigma é conseguir a excelência na competitividade pela melhoria contínua dos processos.

O Seis Sigma teve início com a Motorola em 1987, a fim de produzir produtos com melhor qualidade e menor preço para enfrentar concorrentes no mercado. Em 1988, a empresa foi premiada com o Prêmio Nacional da Qualidade Malcolm Baldrige e, assim, a metodologia ficou conhecida como a responsável pelo sucesso atingido pela organização. A partir de então, várias outras empresas, incluindo a General Eletric, começaram a utilizar o programa e obtiveram êxito, tornando o Seis Sigma conhecido mundialmente (WERKEMA, 2006).

Para Rotondaro (2014), o sigma (σ) mede a capacidade de ter o processo livre de falhas. Cada Sigma representa uma redução de falhas conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 — Escala de qualidade sigma.

Nível de Qualidade	Defeitos por Milhão	Percentual de Conformidade
1 sigma	691463	30,85%
2 sigma	308537	69,15%
3 sigma	66807	93,32%
4 sigma	62010	93,799%
5 sigma	233	99,977%
6 sigma	3,4	99,99966%

Fonte: Próprio autor.

Desta forma, o Seis Sigma representa 99,99966% de conformidade em qualquer processo.

2.7. DMAIC

O Seis Sigma é uma metodologia disciplinada que utiliza ferramentas e modelos estatísticos para auxiliar a resolução de problemas, a fim de alcançar etapas ótimas que gerem um ciclo de melhoria contínua. Um desses modelos é o DMAIC, que garante uma sequência ordenada, lógica e eficaz para o gerenciamento dos projetos (DUARTE, 2011).

Inicialmente, foram introduzidos o Ciclo PDCA (Planejar, Executar, Controlar, Agir) e o modelo MAIC (Medir, Analisar, Melhorar, Controlar) até que a General Electric adotou, também, a etapa de Definição, construindo o DMAIC como melhoria dos modelos anteriores.

Figura 9 – Ciclo DMAIC.



Fonte: Werkema (2004).

Na primeira etapa, definir, o problema e o escopo do projeto são definidos com precisão. O gerador do problema é identificado e a meta global é definida.

Na etapa medir, o foco do problema é determinado através da análise quantitativa dos dados.

A etapa analisar identifica a causa raiz do problema por fatos e dados, portanto é direcionada ao melhor entendimento da falha e sua quantificação (WERKEMA, 2006). Os dados coletados nas etapas anteriores serão agora analisados utilizando ferramentas estatísticas e devem ser descobertas as fontes de variação do processo (ROTONDARO, 2014).

Já a etapa melhorar, propõe soluções, avalia o risco de execução e define e aplica o plano de ação, ou seja, distribui as responsabilidades entre a equipe para garantir o sucesso do projeto.

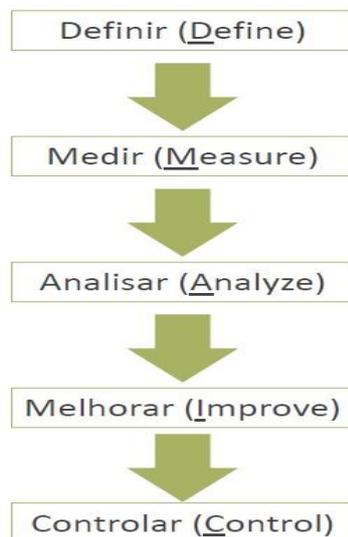
A última etapa, controle, tem como objetivo monitorar o andamento dos processos e antecipar ações corretivas e prevenção de desvios. Além disso, definir mecanismos que garantam a sustentabilidade das melhorias alcançadas.

3 METODOLOGIA

3.1. DMAIC

O protocolo geral usado nesse trabalho baseou-se no método DMAIC da metodologia Seis Sigma. As ferramentas computacionais utilizadas para obtenção de dados e fórmulas foram o Excel e o Minitab. As cinco etapas foram empregadas a fim de solucionar um problema industrial conforme mostrado nos tópicos a seguir.

Figura 10 – Etapas do método DMAIC.



Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Definir

Nesta etapa foram identificados problemas com potencial para melhorias. Esta etapa também é importante para identificar quais processos estão impactando no faturamento da empresa.

Segundo Matos (2003), algumas questões devem ser respondidas antes de iniciar o projeto de melhoria. São elas:

1. Qual o problema a ser abordado com base em resultados prévios indesejados e com potencial melhoria?
2. Quais clientes e consumidores são afetados pelo problema?

3. Qual o custo do problema?
4. Qual a meta a ser atingida?
5. Qual o retorno financeiro?

Depois de respondidas todas essas questões e em conversa com toda a direção da empresa, o responsável pelo projeto avalia se este é um projeto possível de ser melhorado.

Inicialmente, em conversa com gestores da empresa, foi encontrado um problema crescente de rachos em espumas flexíveis sem que as causas fossem necessariamente conhecidas. O aumento acelerado desse tipo de defeito, também, impulsionou o projeto de melhoria.

Foi utilizado nessa etapa, um gráfico de séries temporais, com dados dos últimos seis meses, responsável por identificar as variações do problema ao longo do tempo.

As métricas de estatística descritiva, média, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo, também, foram responsáveis pelo maior entendimento do comportamento dos dados e definição da meta. Outra ferramenta utilizada foi o histograma a fim de observar se o problema segue uma distribuição do tipo normal.

3.1.2 Medir

A etapa medir envolve o entendimento das características críticas para o processo, ou seja, nela será feito um *brainstorming* de todas as principais causas do problema em questão. A principal ferramenta utilizada foram os gráficos. Desta forma, foi possível visualizar e entender melhor o comportamento da variável e determinar o foco do problema.

Todos os dados utilizados para construção dos gráficos foram obtidos a partir do próprio sistema computacional da indústria de fabricação de espumas.

Os gráficos utilizados foram:

- Gráfico de Pareto;
- Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa);
- Mapa de processo.

3.1.3 Analisar

Nesta etapa, foram estreitadas as causas potenciais e identificadas as causas prioritárias com o auxílio de uma matriz de priorização.

Desta forma, também foi possível reduzir o número de variáveis a serem aprimoradas na etapa de melhoria.

3.1.4 Melhorar

De posse das causas potenciais encontradas na etapa anterior, analisar, as melhorias estabelecidas para serem aplicadas foram:

- Mudança na configuração dos tanques de armazenamento;
- Troca do agitador utilizado e aumento da rotação em rotações por minuto, RPM;
- Utilização de produção alternada;
- Manutenção da máquina de fabricação;
- Realização de análise química de formulação.

Nesta etapa de análise química, os principais pontos analisados foram:

➤ Índice de TDI

O índice de TDI indica quanto TDI possui em excesso na formulação. O valor é decidido previamente de acordo com as propriedades mecânicas que desejar atingir; para a espuma D38, o valor encontra-se entre 120 e 125. Durante a análise, é importante verificar se esse intervalo está sendo respeitado.

➤ Alfa e Delta de silicone e catalisador organometálico.

Esses valores indicarão se estão sendo utilizadas as quantidades corretas de silicone e catalisador estanho, que são componentes essenciais para a produção da espuma. Esses valores são aproximados, cabe à avaliação técnica identificar os tipos de silicone, principalmente, a serem utilizados, e outras características que possam crescer ou diminuir a quantidade de catalisador organometálico empregado na formulação.

3.1.5 Controlar

A última etapa do método DMAIC consiste em avaliar se a meta foi atingida. Com o resultado positivo, é necessário que as melhorias sejam padronizadas para que o processo continue com bons resultados para a variável rachos.

Foram utilizadas novamente ferramentas estatísticas para avaliar o sucesso do projeto. Foram elas:

- Séries temporais;
- Gráfico de Colunas;
- Gráfico de Pareto.

Esses gráficos foram comparados com os obtidos nas etapas anteriores para que fosse possível quantificar o ganho financeiro obtido após a utilização do método:

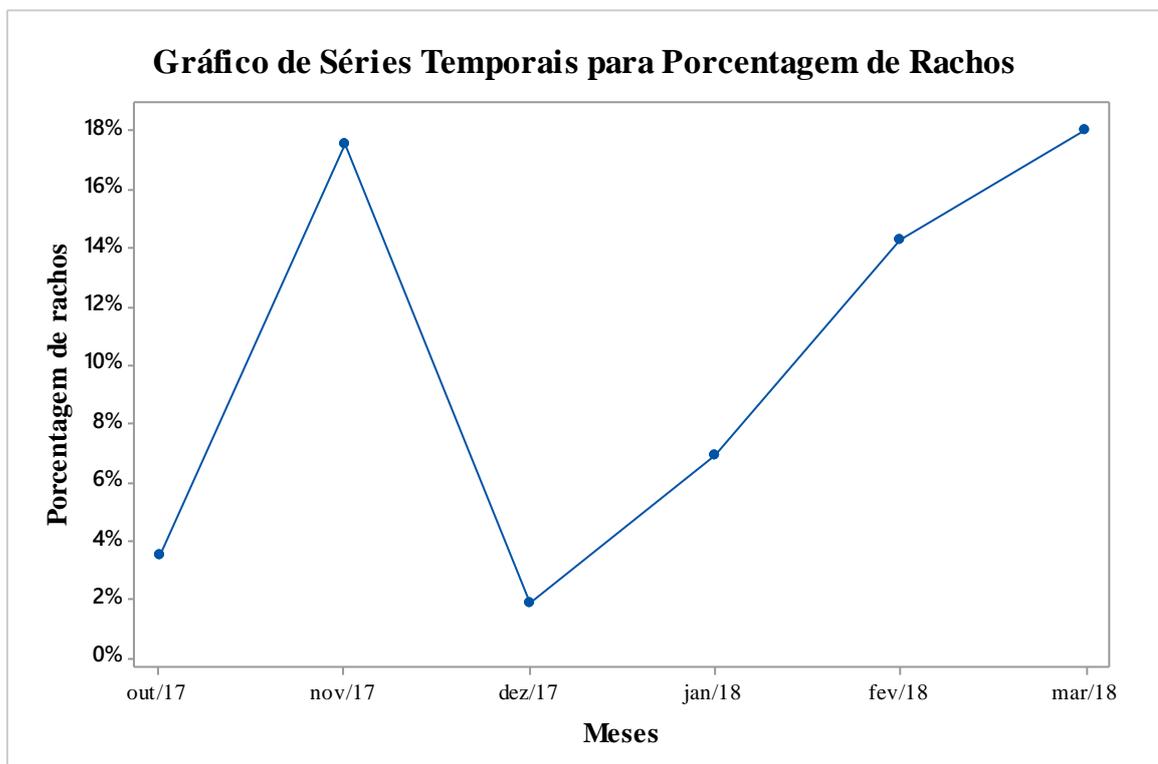
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Definição

O estudo de caso escolhido foi a espuma D38, por ser uma espuma que representa cerca de 15% do faturamento, conforme conhecido pela empresa e ter apresentado alta quantidade de rachos nos últimos seis meses de forma irregularmente distribuída. Além disso, por ser uma espuma de alta densidade (38 Kg/m^3), é utilizada em sua fabricação grande quantidade de produtos, tornando o custo de produção também alto, fazendo com que sua perda represente ainda mais prejuízos para a instituição. O preço médio para cada bloco de espuma D38 é de R\$1.500,00. Portanto, a variável a ser analisada será rachos na espuma D38.

Por meio de um gráfico de séries temporais, indicado pelo gráfico 1 foi possível observar como a variável se comportou de forma irregular entre os meses outubro e março.

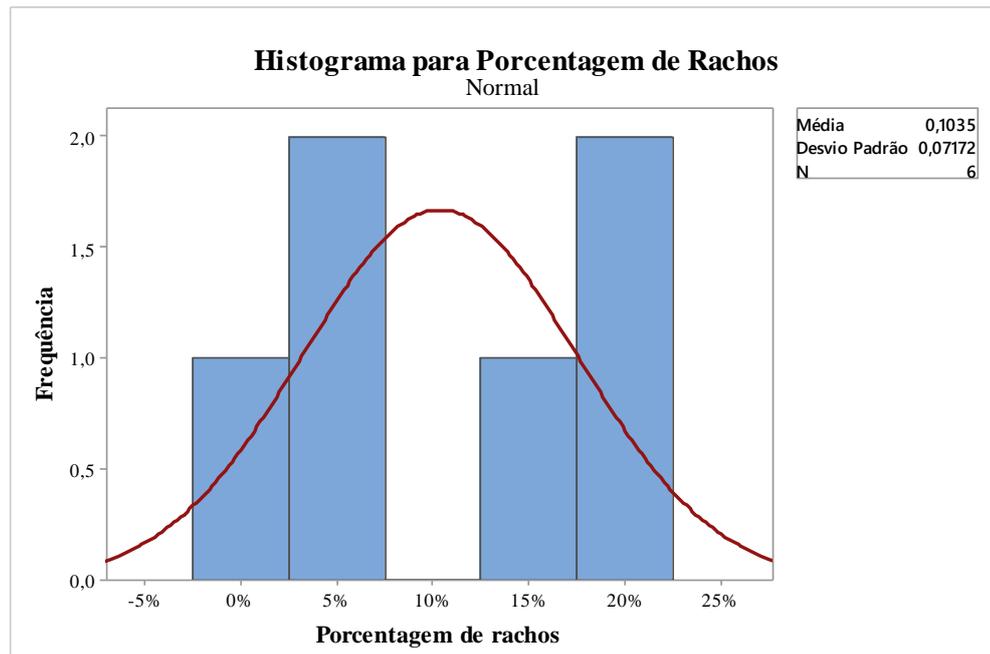
Gráfico 1 — Séries temporais para porcentagem de rachos.



Fonte: Próprio autor.

Já com a utilização de um histograma indicado pelo gráfico 2, foi possível observar se os dados seguem uma distribuição do tipo normal.

Gráfico 2 — Histograma para porcentagem de rachos.

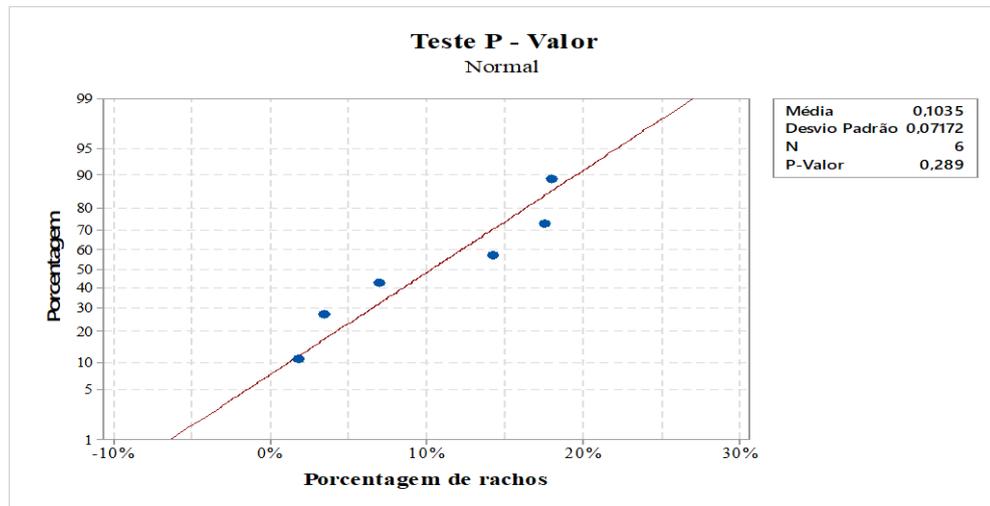


Fonte: Próprio autor.

Embora o histograma também possa mostrar uma possível distribuição binomial, visto que existem apenas dois resultados possíveis, blocos com ou sem rachos, verificamos que o histograma aproxima-se da normal. A curva normal para o histograma é construída com base na média e no desvio padrão, a média indica o topo da curva, e embora não existam valores de porcentagem em 10% de rachos, é nesta faixa em que a média se concentra.

A fim de sanar qualquer dúvida quanto à normalidade, foi realizado o teste P-Valor. Valores de P-Valor maiores que 0,05 indicam que a distribuição segue a distribuição normal, confirmando a normalidade dos dados analisados.

Gráfico 3 – Teste P-Valor para normalidade.



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se, então, pelo gráfico de séries temporais que os rachos ocorreram de forma desordenada nos últimos meses, mas seguiu uma distribuição simétrica, ou seja, o processo segue uma distribuição normal. Essa análise é importante para sabermos se os dados são possíveis de serem trabalhados, ou seja, se são dados com os quais pode ser realizado um projeto de melhoria. Desta forma, os dados rachos em espuma D38 são dados em que podemos obter melhorias significativas.

As métricas mostradas na tabela 3, também foram importantes para definição da meta.

Tabela 3 – Métricas.

Média	10,42%
Mediana	10,61%
Desvio Padrão	6,63%
Máximo	18%
Mínimo	2%

Fonte: Próprio autor.

O valor de benchmarking, valor ideal da variável no processo, é considerado a mínima porcentagem atingida nos seis meses analisados. Esse valor foi de 2% no mês de dezembro do ano 2017.

Decidiu-se, então, que seria suprida, na meta inicial, 50% da lacuna de performance do processo. Essa lacuna é a diferença entre a média e o benchmarking. Desta forma, foi definida a meta para o mês de abril. As fórmulas são mostradas a seguir:

$$\text{Lacuna de Performance} = \text{Média} - \text{Benchmarking} \quad (1)$$

$$\text{Lacuna}/2 = 50\% \text{ Lacuna} \quad (2)$$

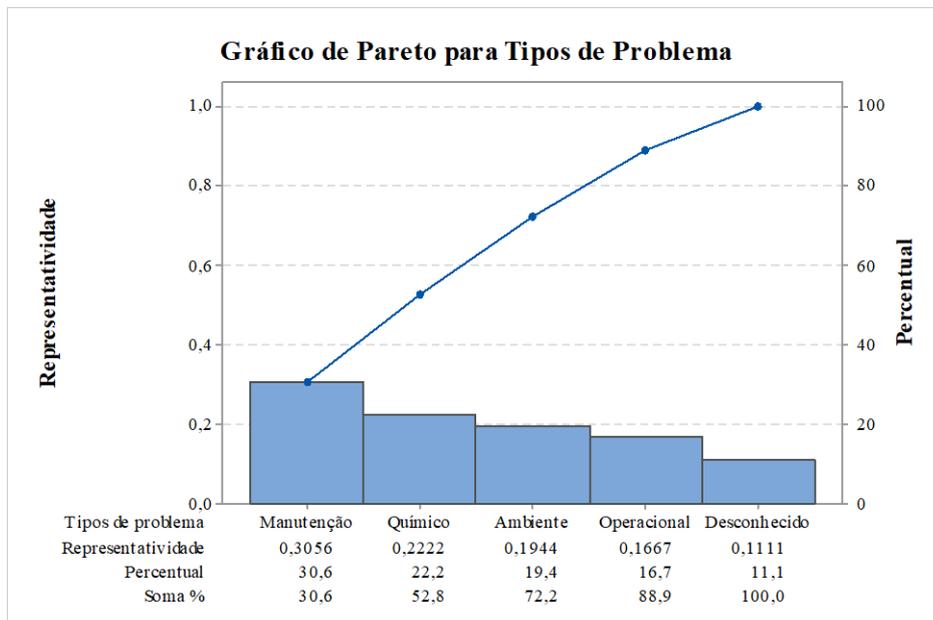
$$\text{Meta} = \text{Benchmarking} + 50\% \text{ Lacuna} \quad (3)$$

Assim, a meta a ser atingida em abril é de 6,1% de rachos na espuma D38.

4.2. Medição

Inicialmente foi utilizado nesta etapa, o Diagrama de Pareto conforme indicado no gráfico 4.

Gráfico 4 — Gráfico de Pareto para tipos de problema.



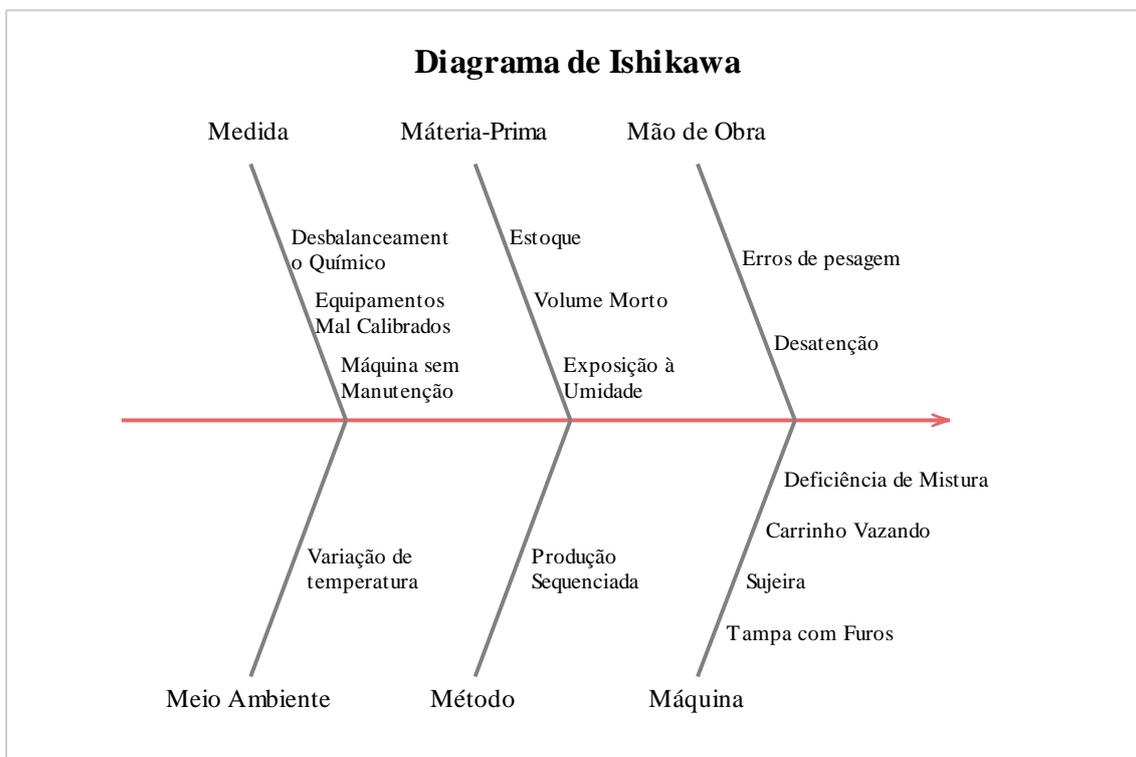
Fonte: Próprio autor.

A partir do gráfico 4, foi possível observar quais os itens de maior impacto em relação ao tipo de problema. Esses problemas concentraram-se, de acordo com os dados da empresa, entre problema ambiental, de manutenção, operacional, químico e desconhecido, pois em alguns rachos não houve indícios da causa raiz. Também pelo diagrama, foi possível

observar que a maior porcentagem dos problemas é causada por problemas de manutenção da máquina e por problemas químicos.

Já o diagrama de causa e efeito, conhecido popularmente como espinha de peixe, indicado na figura 11, mostrou todas as causas potenciais de forma mais visual. Os conjuntos de causas dispostas em flechas convergem indicando o efeito analisado, no caso, rachos na espuma D38. Os principais ramos são matéria-prima, método, mão de obra, máquina, medida e meio ambiente e em cada um desses ramos as causas relacionadas foram listadas em ramos menores.

Figura 11 – Diagrama de causa e efeito para rachos na espuma D38.

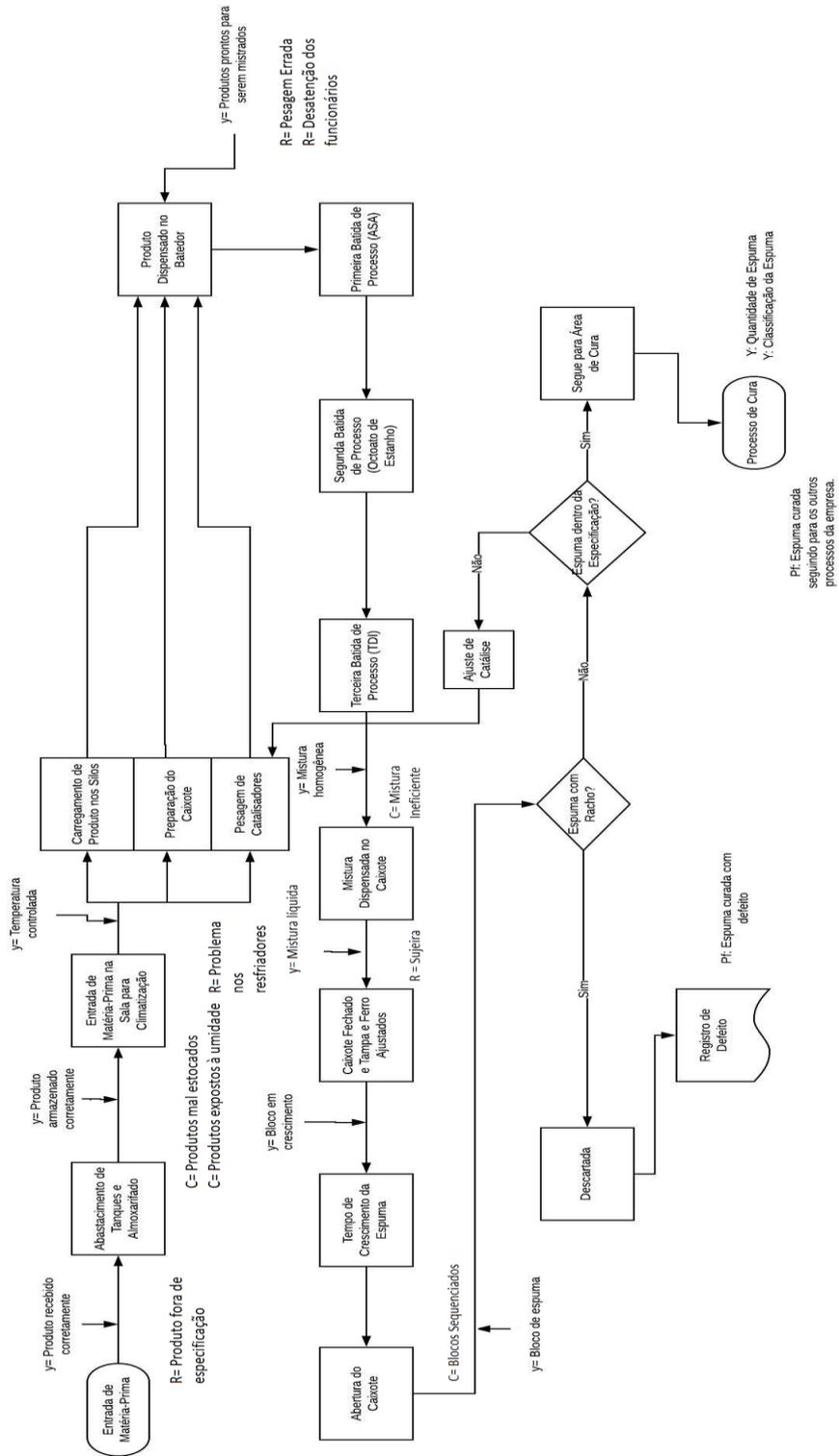


Fonte: Próprio autor.

Observou-se, então, que existem muitas oportunidades de geração de defeitos dentro do processo e pontos em que devem ser aplicadas melhorias.

Por último, a importante verificação do mapa do processo, em que foi analisado o processo completo da fabricação de espumas, desde a entrada de matéria-prima até a espuma em processo de cura, e através dele também foi possível encontrar possíveis oportunidades de defeito. Essas oportunidades de defeito estão indicadas como C ou R, informando então se é uma variável controlada ou um ruído de processo.

Figura 12 — Mapa de processo para fabricação de espumas.



Fonte: Próprio autor.

4.3. Análise

Após a análise do Diagrama de Pareto, diagrama de causa e efeito e do mapa de processo foi possível determinar as causas prioritárias colocadas em uma matriz de priorização. Importante destacar que as causas foram avaliadas, principalmente, qualitativamente por análise de risco, com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores.

A tabela 4 mostra as causas priorizadas com destaque nas que possuem prioridade de melhorias para resultados em curto prazo.

Tabela 4 – Causas priorizadas na etapa análise.

Causas Priorizadas
Produto Mal Armazenado
Volume Morto nos Tanques
Desbalanceamento Químico
Erros de Pesagem
Equipamentos Mal Calibrados
Equipamento sem Manutenção Preventiva e Corretiva
Sujeiras no Caixote e Batedor
Mistura Ineficiente
Variações de Temperatura
Produção Sequenciada

Fonte: Próprio autor.

A priorização dos processos para melhoria foi feita considerando que, em um curto período de tempo, o custo do projeto não deveria ser tão alto, pois novos investimentos serão feitos caso o projeto mostre melhorias que incentivem aplicação de capital pelos diretores da organização. Além disso, outras mudanças como sujeiras no caixote, podem ser resolvidas de forma imediata ao solicitar ao operador maior atenção quanto a limpeza do batedor.

O volume morto dos tanques provocou a plastificação do material no fundo reto, após os tanques serem reabastecidos, esse material plastificado circulava no tanque e seguia para as tubulações que levam para o abastecimento do processo. Dentro da mistura, esses plásticos tornavam-se impurezas, e no local onde essa impureza instalava-se no bloco, havia ocorrência de racho. Por isso, a importância da mudança na configuração.

O desbalanceamento químico, também, foi identificado como potencial causador do problema, pois, por vezes, a fim de selecionar problemas, eram feitas mudanças na formulação da espuma flexível, mas a análise dos pontos importantes, índice de TDI e alfa e delta de estanho não eram analisados. Os problemas com característica química eram identificados e só após eram feitas verificações de erros de formulação. Por isso, o estudo do comportamento químico é tão importante.

Já a mistura ineficiente é um importante ponto a ser observado. Esta é uma análise, principalmente, visual. A mistura para fabricação de espumas contém produtos de até 6500 cP de viscosidade, tornando complicado o processo de homogeneização. É necessário, então, que exista uma mistura eficiente, mas não excessiva, pois a geração exagerada de bolhas de ar, também, pode atrapalhar o processo de formação celular.

A produção sequenciada acarretava o aumento de rachos por motivos ambientais. O processo de fabricação de EFPU é muito dependente dos catalisadores para obter sucesso. Se utilizados de forma incorreta, haverá possivelmente ocorrência de rachos no bloco. Durante as variações ambientais de temperatura, a quantidade de catalisadores, também, deve ser alterada. Utilizando a produção sequenciada, dois blocos eram produzidos com a mesma catálise e, caso esta estivesse incorreta, a perda seria de dois blocos de espuma.

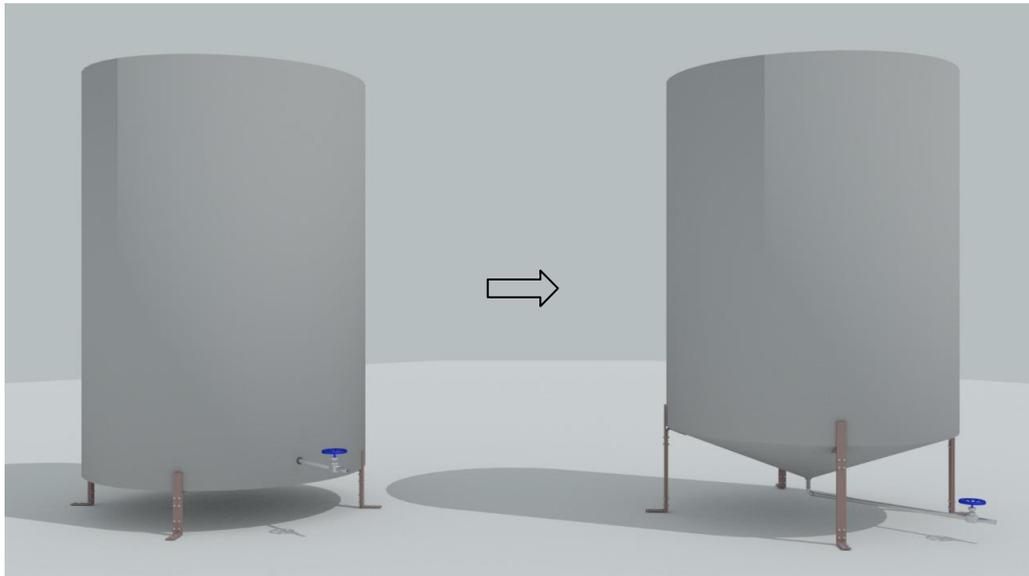
4.4. Melhoria

Depois de identificadas as causas priorizadas na etapa de análise, as melhorias foram aplicadas. As melhorias e seus resultados serão indicados nos tópicos a seguir.

4.4.1 Mudança na configuração dos tanques

Os tanques cilíndricos apresentavam, anteriormente, um fundo reto, com a válvula de saída um pouco acima da base do tanque. A fim de eliminar este acúmulo de material que posteriormente poderia plastificar a base dos tanques anteriormente reta, assumiu um modelo cônico com a válvula ligada ao fundo do tanque conforme mostrado na figura 13. Desta forma, não acarretaria uma formação de material plastificado.

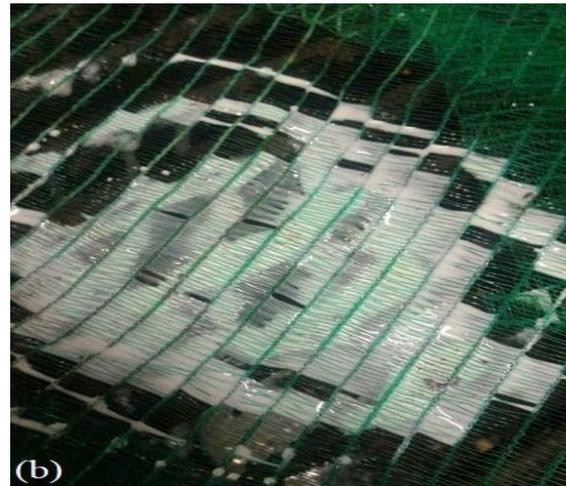
Figura 13 – Configurações dos tanques de armazenagem.



Fonte: Próprio autor.

Observou-se, então, uma redução considerável de plásticos durante o processo de fabricação de espumas de poliuretano. Telas foram colocadas nas saídas das tubulações antes da mudança dos tanques e após essa mudança para que fossem retidos os materiais plastificados e a diferença pode ser observada na figura 14.

Figura 14 – Telas encontradas na saída da tubulação (a) antes da melhoria e (b) depois da melhoria.



Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Análise química de formulações

O estudo da configuração da formulação foi muito importante para determinação dos parâmetros necessários para obtenção de uma espuma de qualidade e com as características e propriedades físicas desejadas.

Tabela 5 — Análise química da espuma D38.

Análise Química Espuma D38			
	Nº OH	Em Kg	Em partes
Poliol Básico	56,0	64,800	66,67
Poliol A	-	24,400	25,10
Poliol B	-	2,000	2,06
Poliol C	-	6,000	6,17
Carga Mineral ou orgânica			
		2,000	2,06
Aditivo		6,000	6,17
Água		2,300	2,37
Silicone Surfactante		1,100	1,13
Catalisador Amínico		0,100	0,10
Catalisador de Estanho		0,153	0,16
TDI (diisocianato)		36,800	37,86
Cloreto de metileno			0,00
Análise Técnica			
F. Expansão:	2,37	Índice TDI =	123,4
DT (Kg/m³):	38,7	DM (Kg/m³):	38,5
% p/p teórico de carga mineral presente:			0,7
Altura do bloco curado =		1,75	Volume do Bloco (m³)
Comprimento b. Curado =		3,14	
Largura do bloco curado =		0,64	
Densidade do bloco bruto =		39,5	Kg/m³
% p/p REAL de carga mineral presente =			1,4
Informação sobre provável passagem de ar			
Espuma com alta passagem de ar			
Valor ALFA silicone calculado (partes) =			0,79
Valor DELTA de silicone utilizado (%) =			42,6
Valor ALFA estanho calculado (partes) =			0,13
Valor DELTA de estanho utilizado (%) =			21,6

Fonte: Próprio autor.

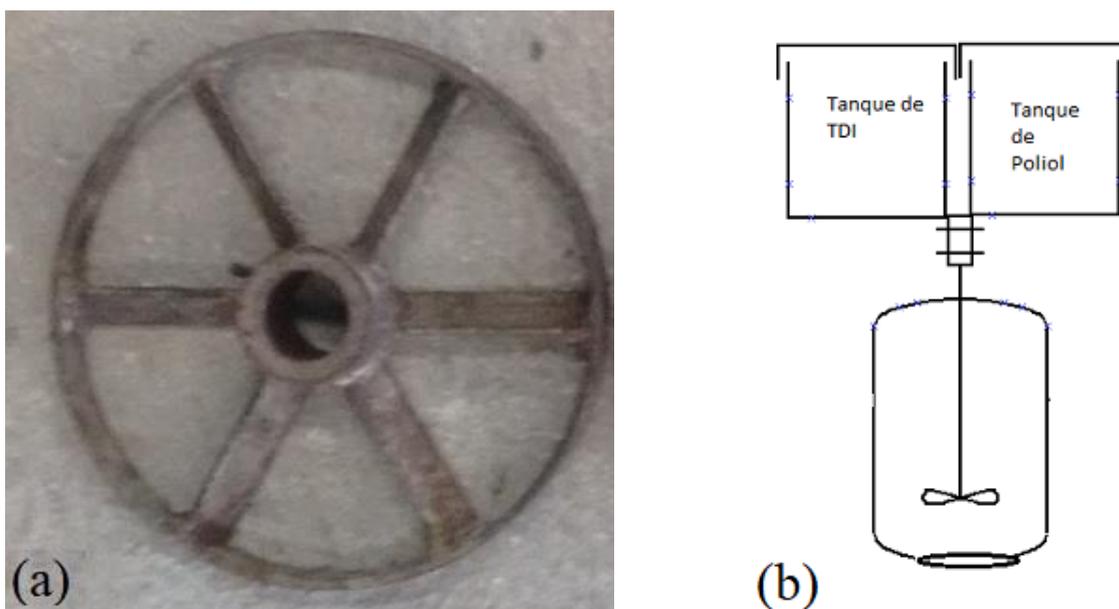
Todas as fórmulas resultantes de mudanças em formulação foram avaliadas a fim de constatar o balanceamento químico e preservação das características da EFPU

O índice de TDI, que deveria encontrar-se entre 120 e 125, passou a ser mantido, em todas as formulações, e os valores de alfa e delta de silicone e estanho também foram mantidos nas quantidades previamente calculadas. Caso a análise mostrasse que esses parâmetros não estavam sendo obedecidos, outras variações eram realizadas até que fosse obtido o padrão desejado.

4.4.3 Troca do agitador e aumento da rotação

Foi avaliada a eficiência de mistura, principalmente de forma visual, durante a mistura para produção do bloco e durante o momento de laminação do bloco, avaliando a formação de bolhas. Na figura 15 são mostrados a configuração do batedor e o novo agitador utilizado.

Figura 15 — (a) novo agitador utilizado e (b) configuração do batedor.



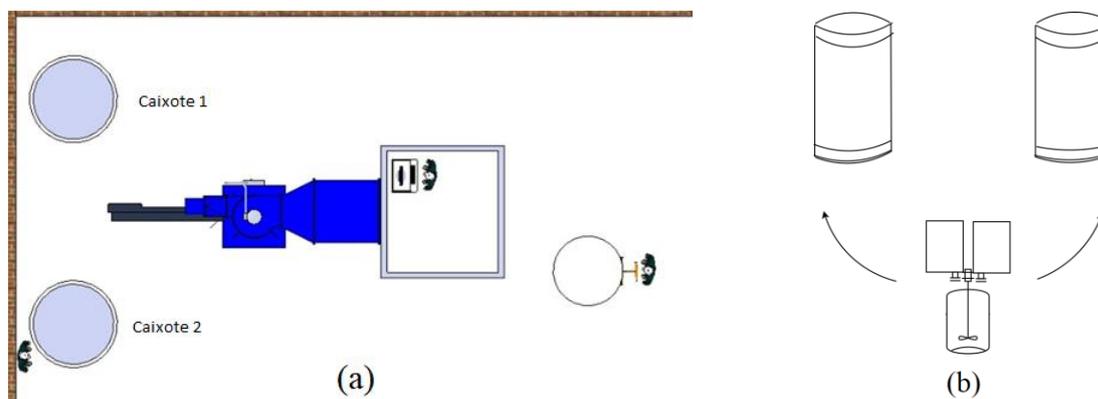
Fonte: Próprio autor.

A rotação, também, foi aumentada em 10%. Observou-se, então, melhora significativa durante a observação visual e, também, não houve mais ocorrência de aglomerado de massa não misturada no bloco já curado.

4.4.4 Produção não sequenciada

O layout para fabricação é mostrado na figura 16.

Figura 16 — Representação esquemática (a) processo e (b) caixas.



Fonte: Próprio autor.

Após a mudança da sequência de produção, houve redução considerável nos rachos ocasionados por falhas de catálise devido a mudanças ambientais. Os problemas que ocorrem por este motivo foram solucionados para os blocos seguintes, visto que havia tempo hábil para mudança e o bloco anterior podia ser observado.

4.5. Controle

Os dados de rachos foram analisados durante todo o mês de abril na indústria de fabricação de EFPU.

A meta estabelecida foi atingir 6,1% de rachos na espuma D38 durante o mês de abril. Na tabela 6, será possível observar os valores atingidos.

Tabela 6 — Meta alcançada.

Total de blocos produzidos	138
Total de blocos com problema	6
Porcentagem mensal	4,35%

Fonte: Próprio autor.

Desta forma, foi possível verificar que a meta foi atingida, conseguindo alcançar um valor ainda melhor que o estipulado. Utilizando uma produção de 138 blocos como base de cálculo e sabendo que o custo médio para cada bloco de espuma de densidade 38 Kg/m³ é de R\$1.500,00. A redução de custo por desperdício atingida é mostrada na tabela 7.

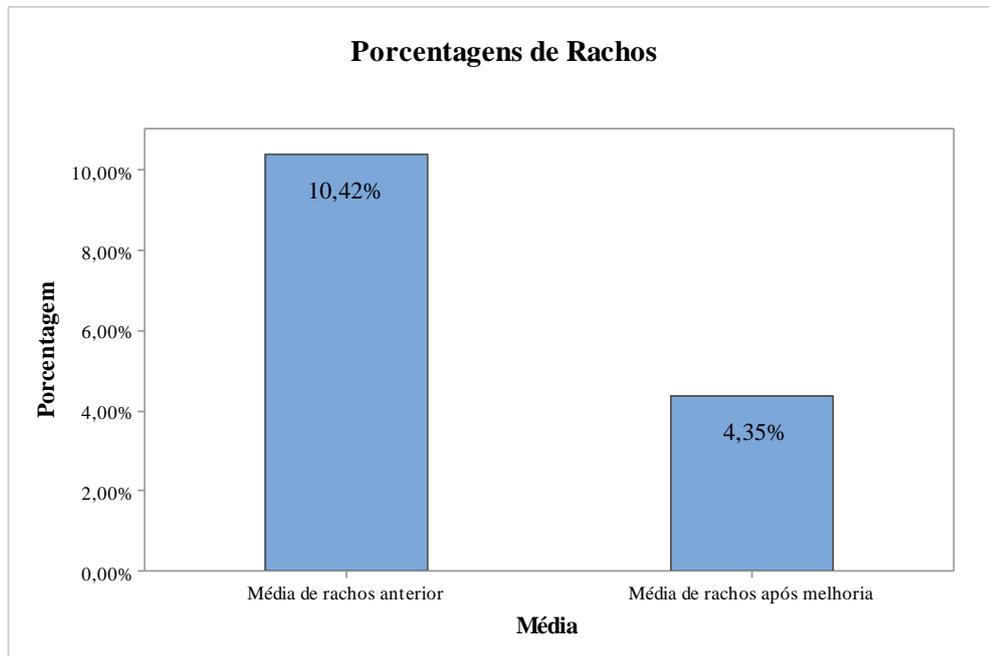
Tabela 7 — Economia atingida.

Custo do bloco de espuma	R\$ 1.500,00
Média de produção mensal	138
Custo médio anterior	R\$ 21.776,40
Custo médio após melhorias	R\$ 9.004,50
Economia média mensal	R\$ 12.771,90

Fonte: Próprio autor.

A comparação entre a média de rachos anterior, entre os meses de outubro e março, e a atual foi estabelecida no gráfico 5, gráfico de colunas.

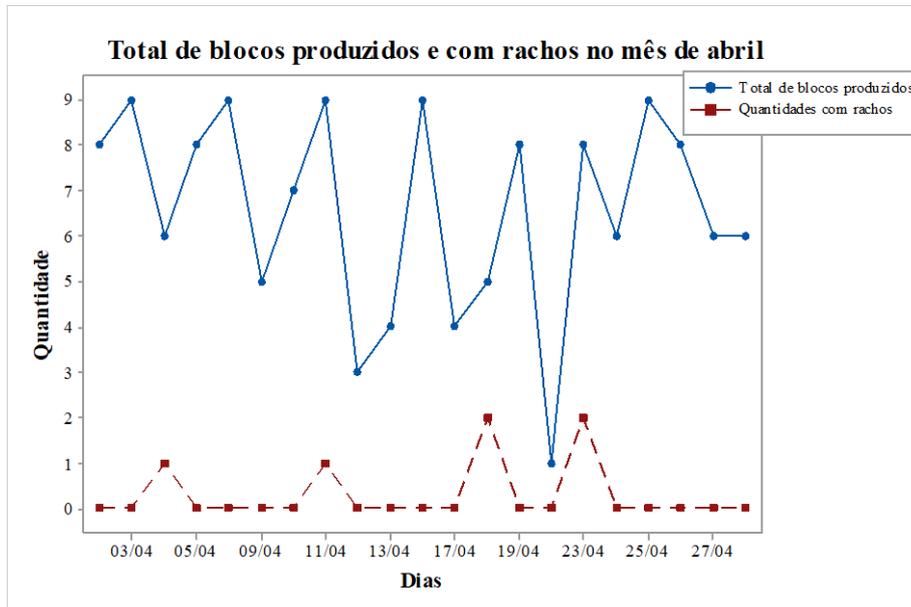
Gráfico 5 — Gráfico de colunas para porcentagem de rachos.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, foi possível observar o comportamento da variável, diariamente, durante todo o mês de abril bem como de sua produção diária através do gráfico 6. Observando então que houve uma produção bem diversificada no decorrer dos dias, com dois dias apresentando um único racho e dois dias com dois rachos registrados.

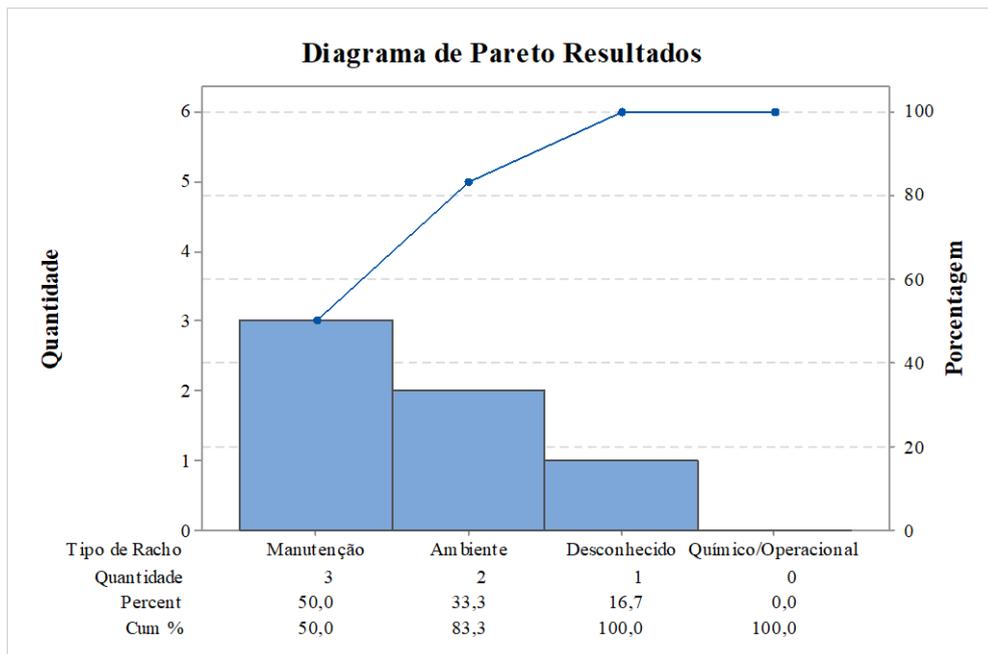
Gráfico 6 – Gráfico de séries temporais para quantidade de blocos produzidos e com rachos durante o mês de abril.



Fonte: Próprio autor.

Também foi possível observar a ação das melhorias nos tipos de rachos do processo através de um diagrama de Pareto, gráfico 7.

Gráfico 7 – Diagrama de Pareto para resultados obtidos.



Fonte: Próprio autor.

É possível notar que, dos 6 rachos, 50% foram por problemas de manutenção, ação corretiva ainda não aplicada, mas que deverá ser implementada para obtenção de melhores resultados a longo prazo. Ainda foi possível observar rachos do tipo ambiente, visto que é uma variável de difícil controle, e abril foi um mês com grande variação temporal no estado do Ceará, área em que a indústria está localizada, porém o valor foi reduzido reforçando o sucesso obtido com o uso de produção não sequenciada. Também não houveram rachos causados por motivos químicos ou operacionais, salientando que as melhorias de análise química, mudança na configuração dos tanques e mudanças de misturadores e rotações aplicadas obtiveram o efeito esperado.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que os objetivos foram atingidos e foi possível obter melhoria no processo de fabricação de espuma flexível de poliuretano, reduzindo a incidência de rachos na espuma D38 e fornecendo redução de custo para a indústria.

Através dos gráficos de colunas utilizados na etapa de controle, pode-se afirmar que houve redução considerável da média de rachos durante o mês de abril, atingindo a média mensal de 4,35% ainda menor que o estipulado anteriormente.

O gráfico de séries temporais mostrou o comportamento da variável durante o último mês, indicando que não houve variações desordenadas na quantidade de rachos, conforme esperávamos após aplicações das melhorias.

Pelo Diagrama de Pareto foi possível observar como as melhorias impactaram nos resultados, indicando que os rachos ocorridos no mês de abril de 2018 foram decorrentes, principalmente, por problemas de manutenção, na qual ainda não foram aplicadas ações corretivas. Desta forma, é possível indicar que, com a aplicação das demais melhorias, resultados ainda melhores podem ser obtidos em longo prazo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. F. **Conhecendo um pouco mais sobre poliuretano**. 1. ed. Novo Hamburgo: Rotermond, 2014.

DONADEL, D.C. **Aplicação da metodologia DMAIC para redução de refugos em uma indústria de embalagens**. 2008. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DUARTE, D. R. **Aplicação da metodologia Seis Sigma – modelo DMAIC – na operação de uma empresa do setor ferroviário**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

HERRINGTON, R; HOCK, K. **Dow poliurethanes: flexible foams**. 2. ed. MI: Dow Chemical Company, 1997.

LIMA, A. C. **Produção de espumas flexíveis de poliuretana**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química). Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2011.

MATOS, J. L. **Implementação de um projeto de melhorias em um processo de reação química em batelada utilizando o método DMAIC**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SANTOS, L. A. S. **Manual de formulação e fabricação de espumas flexíveis de poliuretano**. Rio de Janeiro, 2016.

SOARES, M. S. **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células íntegras e aplicação na síntese de biodiesel**. 2012. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química). Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2002.

WERKEMA, C. **Lean Seis Sigma**: introdução às ferramentas do lean manufacturing. 1. ed. Belo Horizonte: Werkman Editora, 2006.