

**SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO PARA A ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE SAPATAS DIAMANTADAS***SIMULATION OPTIMIZATION FOR THE ANALYSIS OF THE MANUFACTURE PROCESS OF THE ABRASIVE CROWNS*

**Eglon Rhuan Salazar Guimarães<sup>a</sup>; João José de Assis Rangel<sup>a</sup>; Eduardo Shimoda<sup>a</sup>; Dalessandro Soares Vianna<sup>a</sup>; Ana Lúcia Dieguez Skury<sup>b</sup>; Ana Carolina de Almeida Sá<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Universidade Candido Mendes (UCAM), Campos dos Goitacazes, RJ, Brasil - Programa de Pós-graduação em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional

<sup>b</sup> Universidade Estadual do Norte Fluminense (UNEF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

**Resumo**

O presente trabalho objetiva analisar o processo de produção de sapatas diamantadas através de simulação computacional e otimização combinatória, avaliando estatisticamente o número de operadores nos processos, fluxo de produção, dentre outras variáveis necessárias para avaliar a dinâmica do sistema e as regras operacionais. A análise destas variáveis visou auxiliar a tomada de decisão necessária para a implantação da ABRASDI, que será a primeira fábrica com tecnologia totalmente brasileira para produção de ferramentas diamantadas. Sua implantação se dirige a atender a alta demanda deste tipo de insumo existente no Brasil, em especial na região Norte Fluminense, onde a empresa será instalada. O modelo de simulação permitiu avaliar diversos cenários complexos do processo de produção de sapatas diamantadas, possibilitando identificar problemas e oportunidades de melhoria antes do início das linhas de produção. A utilização de análises estatísticas direcionou o projeto experimental aos fatores realmente decisivos, o que gerou resultados que possibilitaram estimar a capacidade produtiva da empresa e identificar os cenários considerados ideais, mostrando em quais momentos é vantajoso efetuar a compra de máquinas ou a contratação de funcionários. Por sua vez, a otimização possibilitou encontrar configurações mínimas dos recursos em relação à demanda inicial da empresa, diminuindo possíveis gastos com recursos que poderiam ser subutilizados.

**Palavras-Chave:** Simulação, Otimização, Sapatas Diamantadas, Ferramentas Diamantadas.

**Abstract**

*This paper aims to analyze the process of production of abrasive crowns through computer simulation and combinatorial optimization, evaluating statistically the number of operators in the process, production flow, among other variables needed to assess the dynamics of the system and operational rules. The analysis of these variables aimed to assist decision-making necessary for the implementation of the ABRASDI, which will be the first plant with technology totally Brazilian for production of diamond tools. Its implementation is aimed to meet the high demand for the input that exists in Brazil, especially in the North Fluminense, where the company will be installed. The simulation model allowed evaluating different, complex scenarios of the process of manufacturing of abrasive crowns, allowing identifying problems and opportunities for improvement before the start of production lines. The use of statistical analysis directed the experimental design to decisive factors, which generated results that allowed estimating the productive capacity of the company and identifying the scenarios considered ideal, showing at what time it is advantageous to purchase machinery or hiring. In turn, the optimization allowed finding minimum settings of resources in relation to the company's initial demand, reducing potential expenses resources that could be underutilized.*

*Keywords:* Simulation, Optimization, Abrasive crowns, Diamond Tools.

**1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho objetivou investigar por simulação computacional e otimização combinatória o processo de produção de sapatas diamantadas, avaliando o número de

operadores nos processos, dinâmica do sistema, capacidade de produção da empresa e as regras operacionais. A análise realizada obteve benefícios consideráveis pela utilização do projeto de experimentos (*Design of Experiments - DOE*), permitindo direcionar os experimentos e o modelo de otimização aos fatores realmente decisivos no processo, auxiliando assim a tomada de decisões necessárias ao sistema.



Nos últimos anos, a simulação a eventos discretos tem sido utilizada de forma crescente para auxiliar a tomada de decisões em diversas áreas de conhecimento, sobretudo a área de manufatura (BANKS *et al.*, 2010). Por consequência, cresce também o interesse por investigações científicas que utilizem a simulação computacional combinada com outras técnicas que possam complementar a análise, como por exemplo, projeto de experimentos (*Design of Experiments* - DOE) (MONTGOMERY, 2009), otimização combinatória, custeio baseado em atividades (*Activity Based Costing* - ABC), valor presente líquido (VPL) e outras técnicas conhecidas (COSTA, MONTEVECHI, PINHO, 2010). A relevância deste trabalho se dá pela combinação de técnicas que auxiliam a tomada de decisões aplicadas em um sistema de manufatura de sapatas diamantadas, o qual irá compor a primeira fábrica de ferramentas diamantadas com tecnologia totalmente brasileira.

A ABRASDI será instalada na cidade de Campos dos Goytavazes, considerada um local estratégico para a comercialização de ferramentas diamantadas utilizadas no beneficiamento de rochas ornamentais. O Estado do Rio de Janeiro é o quinto maior produtor de rochas ornamentais do Brasil. Possui um parque de processamento de 1500 empresas que geram mais de 11 mil empregos formais distribuídos na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e nas regiões norte e noroeste do estado (ZEPEDA, 2009). Estas empresas geram alta demanda de ferramentas diamantadas, as quais são utilizadas em vários processos desde o corte até o polimento das rochas.

Diante destas circunstâncias, foi identificado um potencial “nicho de mercado” para a produção de ferramentas de beneficiamento de rochas. Esta oportunidade alavancou a criação da empresa ABRASDI, a qual se propõe a produzir novas ferramentas diamantadas visando atender as necessidades das empresas do país, em especial as localizadas no estado do Rio de Janeiro. Isto trará uma economia considerável de custos, redução de tempo e, conseqüentemente, aumento da produtividade do setor (ZEPEDA, 2009). Uma das principais vantagens competitivas da ABRASDI é a proximidade de seus clientes, pois desta forma é possível que se façam testes em reais condições de trabalho, com rochas típicas do país.

A criação da ABRASDI é uma iniciativa de pesquisadores ligados ao Laboratório de Materiais Super Duros da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e está sendo incubada pela incubadora de empresas TEC-Campos. Nesta etapa, os envolvidos no projeto se veem forçados a tomar uma série de decisões a respeito da empresa e se deparam com diversas incertezas, momento no qual encontram dificuldades para obter informações importantes, pois não existe um processo de produção em execução, o que inviabiliza o dimensionamento de capacidade e necessidades operacionais nos diversos

cenários possíveis. A realização da análise operacional seria inviável na prática, pois os equipamentos ainda não foram comprados e os funcionários ainda não foram contratados. Diante disto, o uso de simulação computacional se faz útil, pois esta técnica possibilita que cenários reais sejam simulados de forma confiável em um ambiente virtual e, quando combinada com a otimização, possibilita identificar cenários considerados ótimos diante da grande quantidade de variações possíveis.

Modelos de simulação permitem representar cenários complexos com considerável rapidez (PIDD, 2004). Em razão das diversas fontes de incertezas e da complexidade operacional relacionada ao processo de produção das sapatas diamantadas, o método utilizado tem por base a técnica de simulação computacional de eventos discretos apresentada em Banks *et al.* (2010), utilizando o software Arena<sup>®</sup>. As principais medidas de desempenho avaliadas no modelo de simulação inicial foram a capacidade de produção diária e a taxa de utilização de operadores e máquinas, considerando como restrições o custo das ferramentas, a qualidade do produto e as regras operacionais. Na segunda fase dos experimentos, foram incluídos alguns fatores não avaliados anteriormente, tornando necessária a análise por otimização. Para isto, foi utilizado o aplicativo OptQuest<sup>®</sup> for Arena<sup>®</sup> disponível no pacote de instalação do software Arena<sup>®</sup> 12.

## 2. DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA

Todos os processos necessários para a fabricação das sapatas diamantadas serão efetuados nas dependências da ABRASDI, que está apresentada na Figura 1. Foi definido que o espaço físico da empresa será dividido em duas partes. A primeira consiste de escritórios, laboratório de preparação da mistura, áreas de estoque e banheiro. A segunda parte consiste na área operacional, onde ficam as máquinas utilizadas para a sinterização e retificação, além de algumas mesas e bancadas necessárias para os processos de preparação do molde, limpeza, desmolde, entre outros. A matéria-prima para a produção da ferramenta consiste em pó de diamante e liga metálica inorgânica. Por motivos de proteção das informações, a composição desta mistura foi omitida. Portanto, não será apresentada neste trabalho.

O processo que será desenvolvido começa no laboratório no início do dia, onde as porções dos materiais são misturadas por um operador utilizando uma máquina específica. Este processo (F1) leva em torno de trinta minutos e a quantidade de mistura produzida depende da capacidade da máquina que será adquirida. Após esta etapa, ainda no laboratório, um operador deverá utilizar a mistura para preencher os moldes e colocar um suporte que faz parte da ferramenta

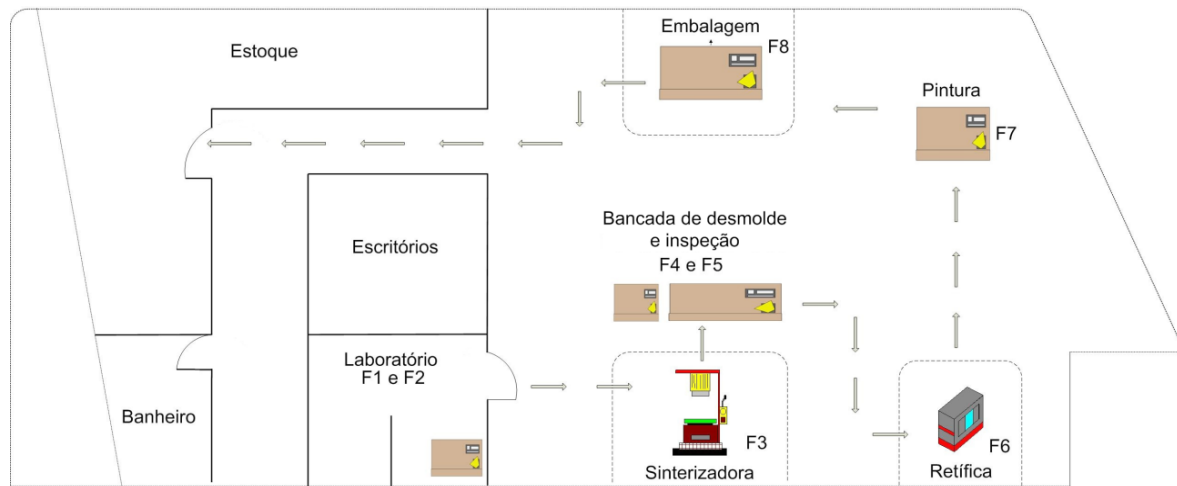


Figura 1. Espaço físico da ABRASDI.  
Fonte: Elaborado pelos autores.

(F2), para que então seja feito o transporte do material para a sinterizadora. De acordo com os responsáveis pela empresa, cada sapata gasta cerca de 440g de mistura.

A sinterização (F3) consiste em um processo de compactação através de tratamento térmico e pressão, em que a mistura sofre uma transformação e se torna um material cerâmico. A máquina utilizada neste processo tem capacidade para sinterizar até seis sapatas por vez. Diante disto, os moldes são transportados para este processo em lotes de seis unidades. Após sinterizado, o produto segue para a bancada para então ser submetido a um material desmoldante, além de passar por secagem, desmolde e pré-limpeza. Estes processos são feitos pelo mesmo operador simultaneamente e, por este motivo, foram agrupados em uma só etapa (F4). Neste momento, a mistura e o suporte já estão colados e compõem a sapata, que é separada do molde e continua no processo. Por sua vez, o molde volta para o processo F2 para ser reutilizado.

A próxima etapa (F5) consiste em uma inspeção, que verificará a qualidade da ferramenta. Destas, 3%, em média, são consideradas defeituosas e descartadas. As sapatas de boa qualidade (97%) seguem no processo. Cada uma é levada à retífica para que seja submetida ao processo de retificação (F6). Após este processo, a ferramenta é levada à mesa de pintura onde passa por uma pintura (F7), para então ser novamente transportada e submetida ao último processo necessário, ou seja, a embalagem (F8).

### 3. DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação elaborado neste trabalho foi desenvolvido com base na metodologia apresentada por Freitas Filho (2008), possuindo os seguintes passos: Formulação e análise do problema; planejamento do projeto; formulação do modelo conceitual; coleta de macro-

informações e dados; tradução do modelo; verificação e validação; projeto experimental; experimentação; interpretação e análise estatística dos resultados; comparação e identificação das melhores soluções; documentação e apresentação dos resultados. O modelo físico analisado foi traduzido para o software Arena® 12 (KELTON, SADOWSKI, STURROCK, 2007), possibilitando que as simulações computacionais sejam realizadas. O modelo foi ajustado para simular 8 horas de trabalho, com o intuito de investigar a produção diária da empresa.

O fato de que a empresa ainda esteja em fase de implantação possibilitou que vários cenários fossem simulados para então implantar o melhor entre os encontrados. Este procedimento permitiu identificar problemas e oportunidades de melhoria no processo antes do início das linhas de produção. Contudo, devido às linhas de produção não estarem implantadas, não foi possível coletar os tempos reais dos processos. Por este motivo, estes foram estimados com base na experiência dos técnicos da empresa.

Antes de realizar a simulação do processo, fez-se necessário validar e verificar o modelo. Estas etapas foram efetuadas com base na metodologia apresentada por Sargent (2007). O modelo foi executado passo-a-passo e os eventos foram analisados em relação ao tempo, identificando se havia coerência entre o modelo real em análise, o modelo de simulação e o conceitual. Todavia, para aumentar a confiabilidade, após a verificação inicial, um modelo de animação foi criado, o que possibilitou a visualização gráfica dos processos em execução. Esta prática permitiu identificar algumas falhas que não haviam sido percebidas no modelo lógico.

Segundo BROOKS e ROBINSON (2001), um modelo conceitual é uma descrição do modelo que se deseja construir, não dependendo da ferramenta de simulação



que se deseja utilizar. Um modelo conceitual, além de servir como uma documentação do modelo real, pode auxiliar a elaboração do modelo computacional, agilizando seu processo e definindo os pontos de coleta de informações.

Visando melhorar a descrição e o entendimento dos processos da produção de sapatas diamantadas, foi criado um modelo conceitual com base no padrão IDEF - SIM, proposto por MONTEVECHI *et al.* (2010), o qual é apresentado no Apêndice A.

Para complementar o modelo conceitual, o Apêndice A possui uma tabela descrevendo todas as informações contidas no modelo. Esta apresenta cada processo juntamente com seus tempos estimados e quantidade de recursos necessários, além de descrever os devidos recursos, seus movimentos e as entidades apresentadas no modelo conceitual.

Os parâmetros de entrada do modelo (chegada) são as porções de diamante e a liga metálica. Estas porções chegam juntas e em mesma proporção. Existe também a entidade molde, que chega diretamente na mesa de molde onde aguarda a chegada da porção de mistura (liga metálica + diamante) para que possa prosseguir. Após a entrada das entidades, estas circulam por todas as etapas de produção da ferramenta, passando por cada processo, aguardando o tempo necessário e sofrendo as alterações de entidade (vide Apêndice A). A seguir, chega-se ao final do processo, momento no qual a entidade já foi transformada em sapata pronta para a comercialização.

#### 4. EXPERIMENTOS

Segundo MONTGOMERY (2009), um experimento é um teste ou uma série de testes, em que alterações controladas são realizadas sobre as variáveis envolvidas em um sistema (fatores), possibilitando observar e identificar as razões das mudanças ocorridas sobre os resultados. Os valores que cada fator pode assumir são chamados de níveis, ou seja, cada nível do fator constitui uma alternativa para o mesmo. Por sua vez, os resultados são representados por variáveis previamente eleitas chamadas variáveis de resposta.

Os fatores escolhidos para esta fase da experimentação foram a retífica, a sinterizadora e os operadores. Esta escolha se deu devido ao fato de que as máquinas ainda não foram compradas e os operadores ainda não foram contratados. Nesta fase do trabalho, foi considerado que a quantidade de mistura resultante da primeira execução é o suficiente para um dia inteiro de produção, tornando desnecessário executar este processo mais de uma vez por dia. A variável de resposta considerada foi a quantidade de sapatas produzidas, avaliando a capacidade de produção da empresa.

Foram considerados três níveis para o fator retífica, ou seja, os cenários avaliados possuem entre uma e três máquinas para o processo de retificação. Para o fator sinterizadora, as variações também são entre uma e três máquinas, enquanto a quantidade de operadores foi definida entre um e seis.

Sempre que se lida com experimentos, é importante estar atento ao fato de que a repetição de determinado ensaio pode levar a diferentes respostas. Diante disto, para realizar a experimentação utilizando a estratégia de simulações computacionais do tipo Projeto Fatorial completo, seria necessário executar os 54 (3x3x6) cenários existentes  $r$  vezes, onde  $r$  representa o número de replicações escolhido. Nesta estratégia, altera-se um dos níveis de cada fator por vez, mantendo-se os demais fixos, e executam-se estes cenários  $r$  vezes.

Antes que o projeto experimental escolhido fosse de fato realizado, fez-se necessária uma experimentação inicial para identificar a quantidade ideal de replicações. Nesta etapa, foi utilizada a configuração típica da empresa (a mesma utilizada na validação do modelo e apresentada no modelo conceitual). Utilizando-se o número de ferramentas produzidas como variável de resposta, os resultados começaram a apresentar convergência quando executados em nove replicações e, devido a isto, este valor foi adotado em todas as experimentações realizadas neste trabalho.

Conforme apresentado, os fatores analisados com seus respectivos níveis constituíram um total de 54 cenários e, adotando-se o valor de nove replicações, seriam executados 486 experimentos. Todavia, na tentativa de diminuir a quantidade de cenários gerados, foi realizada uma experimentação preliminar com o intuito de identificar a influência que os fatores e suas interações representam na variável de resposta. Esta experimentação permitiu identificar os fatores que possuem influência significativa na produção diária da empresa, possibilitando eliminar da análise os que não influenciam significativamente no resultado.

Nesta fase da experimentação, foi utilizado o projeto fatorial  $2^k$  considerando a média aritmética das nove replicações como resultado de cada cenário. Nesta estratégia, utilizam-se necessariamente 2 níveis de cada fator e  $k$  representa a quantidade de fatores analisados (FREITAS FILHO, 2008). Como o sistema avaliado possui fatores com mais de dois níveis, nesta análise foram utilizados somente os níveis superiores e inferiores de cada fator. Cabe ressaltar que esta verificação foi realizada somente para gerar o gráfico de Pareto, pois, neste caso, não é possível obter a ANOVA, uma vez visto que não sobram graus de liberdade para o resíduo. A matriz gerada pelos resultados foi submetida ao MINITAB, que gerou o Gráfico mostrado na Figura 2.

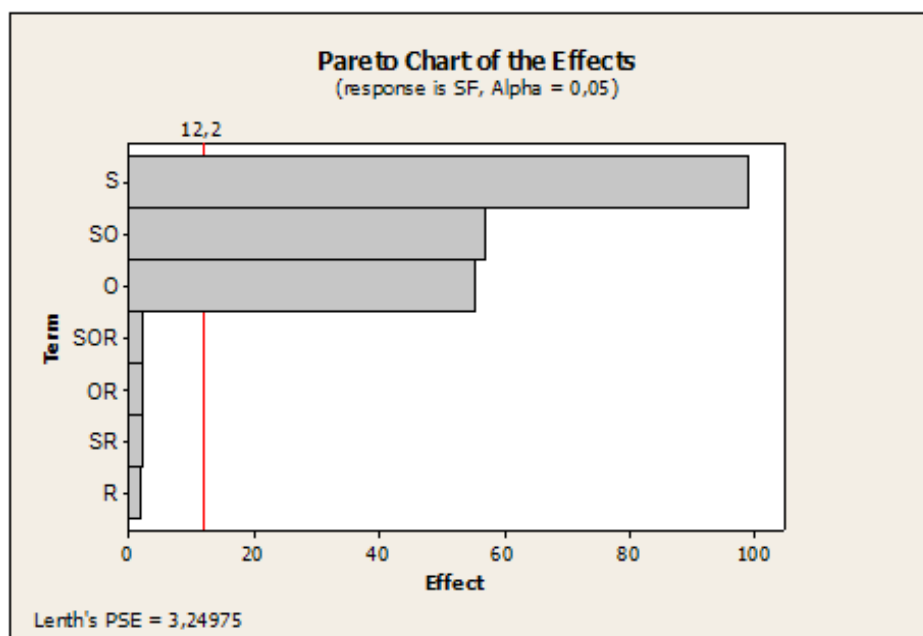


Figura 2. Gráfico de Pareto da influência dos fatores sobre a produção da empresa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico de Pareto indica que, dentre os três fatores analisados no processo e suas interações, somente o fator operadores, o fator sinterizadoras e a interação entre estes dois apresentaram influência significativa na produção da empresa. Desta forma, todos os cenários envolvendo a Retífica e as interações: Retífica x Operadores, Retífica x Sinterizadoras e Retífica x Operadores x Sinterizadoras foram descartados dos experimentos, pois não apresentaram influência significativa. Isto permitiu a redução de 54 (3x3x6) para 18 (3x6) cenários, diminuindo de 486 para 162 (18 x 9 replicações) experimentos no Projeto Fatorial Completo. Deste modo, a experimentação preliminar possibilitou melhorar a eficiência da análise do sistema, pois mostrou os fatores que realmente influenciam na resposta e, assim, diminuiu 66,6% das 486 execuções que seriam necessárias inicialmente.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS INICIAIS

Após excluir os fatores identificados como não influentes significativamente na produção da empresa, foi realizada uma nova experimentação utilizando o Projeto Fatorial Completo. Os resultados gerados pelos cenários avaliados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) através do aplicativo SAEG (RIBEIRO JÚNIOR, 2001), visando encontrar o nível de significância dos fatores envolvidos. O fator é considerado significativo quando sua significância atinge um valor inferior a 0,05. Todos os cenários avaliados nesta parte dos experimentos são considerados significativos em relação à produção diária, como pode ser observado na ANOVA apresentada na Tabela 1, confirmando o que foi identificado pelo Gráfico de Pareto.

Tabela 1. ANOVA gerada pelos resultados dos experimentos

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Significância
Total	161	311539.2			
Total de redução	17	310186.0	18246.24	1941.66	<0.0001
Sinterizadora (S)	2	46396.72	23198.36	2468.63	<0.0001
Operadores (O)	5	204207.3	40841.47	4346.10	<0.0001
Interação S x O	10	59581.99	5958.199	634.04	<0.0001
Resíduo	144	1353.205	9.397257		

Fonte: Elaborado pelos autores.





O próximo passo realizado foi submeter os resultados a uma regressão linear simples e múltipla, também realizada com o auxílio do sistema SAEG. Esta técnica resulta em uma equação conhecida como equação de regressão, que permite inferir o valor da variável de resposta em função dos fatores do sistema. A equação de regressão gerada está apresentada na Equação (1).

$$\hat{Y} = -4,18614.O - 23,9407.S + 12,3904.O.S + 57,4171 \quad (1)$$

Na Equação (1),  $\hat{Y}$  representa a quantidade de sapatas produzidas,  $O$  representa a quantidade de operadores e  $S$ , a quantidade de sinterizadoras. A equação de regressão encontrada possibilita que sejam analisadas diversas variações dos fatores, identificando a resposta do sistema em relação a cada um. A Figura (3) apresenta um gráfico dos resultados obtidos variando-se a quantidade de sinterizadoras para cada nível da variável operadores.

Esta análise permite avaliar quais cenários apresentam condições viáveis ou necessárias para a contratação de mais um operador ou para a compra de mais uma sinterizadora.

O gráfico apresentado na Figura 3 indica que, em alguns casos, incluir sinterizadoras no processo pode não ser uma boa opção, chegando até a representar queda na produtividade da empresa. Isto ocorre quando o processo é executado com apenas um operador. Neste caso, se a quantidade de sinterizadoras aumenta de uma para duas, o resultado obtido é a diminuição da produção em 28%. Neste mesmo cenário, se o aumento for de uma para três máquinas, a queda é de 55%. Todavia, no cenário com dois operadores este efeito não acontece. Aumentando-se de uma para duas sinterizadoras, a produção passa de 49,9 sapatas para 50,7 (aumento de 1,68%), e se a alteração for de uma para três máquinas, o resultado passa de 49,9 para 51,6 sapatas, aumentando 3,37%.

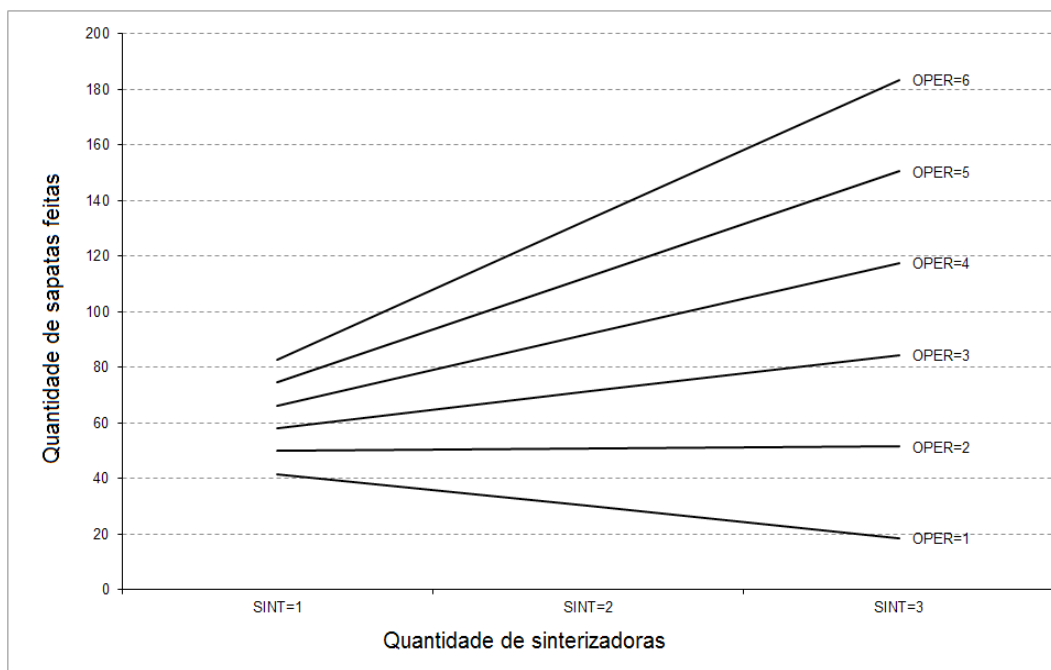


Figura 3. Variação da quantidade de sinterizadoras para cada nível de operadores.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A compra de sinterizadoras se torna cada vez mais atrativa à medida que a quantidade de operadores aumenta, e passa a representar alterações significativas quando o número de operadores no processo é maior que dois. Possuindo-se três operadores e aumentando-se de uma para três sinterizadoras, é possível obter 45% de aumento na produção. Esta mesma operação traz 77% de melhoria quando se possui quatro operadores, e 102% possuindo cinco operadores. Os cenários que geram os melhores resultados quando se altera a quantidade de sinterizadoras são os que possuem seis operários. Neste caso, incluindo-se uma sinterizadora, o retorno obtido é o aumento de 61% na produção. Este aumento se estende a 122% quando duas sinterizadoras são incluídas no processo.

## 6. OTIMIZAÇÃO

Os resultados gerados pela experimentação realizada com os fatores citados permitem aos responsáveis pela ABRASDI identificar o comportamento do sistema com relação à variação de máquinas e operadores. Contudo, foi identificada a possibilidade de realizar outra verificação com relação à diminuição de custos utilizando uma possível meta de produção diária.

Para realizar esta segunda verificação, foi possível incluir um fator decisivo na análise dos cenários da empresa, o qual consiste na capacidade de produção da máquina de mistura. Conforme informado, esta máquina é utilizada no início da



produção e é ela quem restringe a quantidade de sapatas que vai entrar no processo, ou seja, se a quantidade de mistura gerada for o suficiente para produzir 30 sapatas, este será o número máximo de ferramentas possíveis de se produzir até que se execute novamente o processo de mistura. Este fator não participou da primeira análise dos cenários porque sua variabilidade é elevada, tornando necessário incluir outra técnica, como por exemplo, a otimização aliada à simulação, para a investigação do sistema.

As máquinas que podem ser utilizadas neste processo possuem grande variedade de tamanho, capacidade e preço. Considerou-se que a capacidade destas máquinas pode variar entre 5kg e 50kg, podendo assumir qualquer valor entre estes limites. É importante frisar que, quanto maior a capacidade, maior será seu preço, impactando no lucro da empresa.

Ao se analisar o sistema com este fator e os possíveis valores de sua capacidade, é possível identificar que, em alguns cenários, a quantidade de mistura gerada por uma execução não será o suficiente para a produção diária, dependendo da capacidade da máquina, fazendo-se necessário repetir este processo  $n$  vezes, sendo  $n$  a divisão da capacidade de produção diária sobre a quantidade de

sapatas possíveis por mistura. Devido a isto, surgiu outra questão a ser avaliada: Qual é o momento ideal para executar novamente o processo de mistura? Esta questão também impacta consideravelmente o sistema visto que, se as ferramentas no processo (WIP) acabarem antes do final do expediente, todo o sistema ficará parado aguardando a nova execução do processo de mistura.

Diante disto, esta questão foi avaliada de acordo com a quantidade de ferramentas produzidas. Quando esta quantidade é atingida, o parâmetro porcentagem de disparo (PD) é atingido e uma nova execução do processo de mistura é disparada. Para exemplificar esta definição, considere que a misturadora possui capacidade para 30 sapatas por vez e a porcentagem de disparo é 50%. Neste caso, quando 15 sapatas forem totalmente produzidas, a porcentagem de disparo é atingida e uma nova mistura começa a ser preparada, dando prosseguimento ao processo.

Após incluir estes dois fatores na avaliação, foi necessário realizar a análise de variância para verificar se todas as variáveis são realmente significativas no sistema e se devem entrar na experimentação. Para isto, foi realizado um experimento considerando somente três níveis de cada fator. Os níveis utilizados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Níveis das variáveis de decisão para gerar ANOVA.

Variável de decisão	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Quantidade de operadores (O)	1	3	6
Quantidade de sinterizadoras (S)	1	2	3
Capacidade da misturadora (CM)	5kg	27kg	50Kg
Porcentagem de disparo (PD)	30%	60%	90%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A experimentação descrita foi realizada com o auxílio do *process analyzer*. Os resultados gerados foram submetidos ao MINITAB, o qual gerou a ANOVA apresentada na Tabela 3. Conforme pode ser visto, o único fator que apresentou

significância menor do que 0,05 foi a porcentagem de disparo e, devido a isto, este fator não foi considerado na análise.

Tabela 3. ANOVA da segunda fase dos experimentos.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	F	Significância
Total	80	81873662572			
O					
	2	34230871273	17115435636	55,73	<0,0001
S	2	3731229829	1865614914	6,07	0,0040
CM	2	21472942255	10736471127	34,96	<0,0001
PD	2	326816116	163408058	0,53	0,5900
Resíduo	72	22111803100	307108376		

Fonte: Elaborado pelos autores.



Após identificar que a porcentagem de disparo não possui influência significativa no sistema, os dados foram novamente submetidos ao aplicativo MINITAB, mas desta vez os valores referentes à variável PD foram excluídos. Esta verificação foi feita para confirmar se todas as outras variáveis possuem significância menor do que 0,05, mesmo

sem os dados da variável PD. A Tabela 4 mostra a ANOVA gerada e a Figura 4 apresenta os gráficos do efeito de cada variável sobre o resultado. Os fatores que possuem efeito maior são a capacidade da misturadora e a quantidade de operadores, validando as informações encontradas na ANOVA.

Tabela 4. ANOVA excluindo-se a variável PD.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Significância
Total	80	81873662572			
O	2	34230871273	17115435636	56,44	<0,0001
S	2	3731229829	1865614914	6,15	0,0030
CM	2	21472942255	10736471127	35,41	<0,0001
Resíduo	74	22438619216	303224584		

Fonte: Elaborado pelos autores.

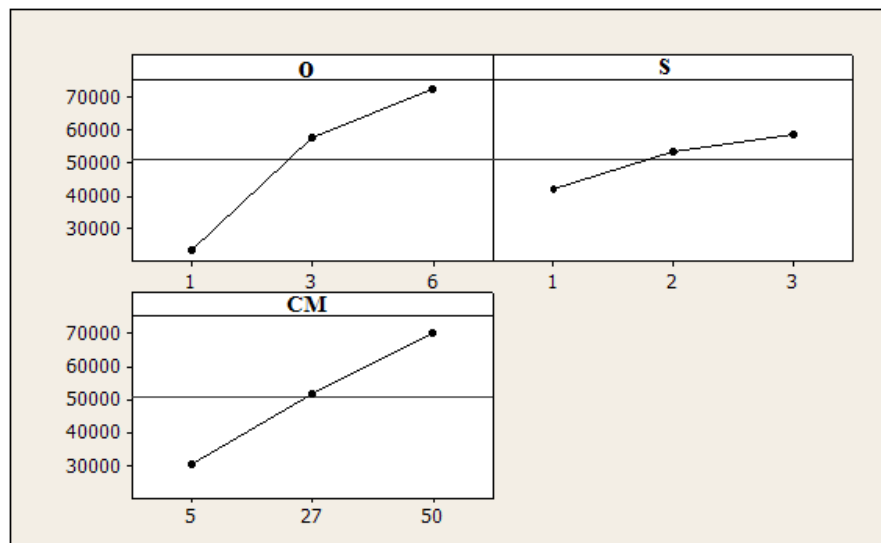


Figura 4. Efeito dos Fatores (O: operadores; S: sinterizadora; e CM: capacidade da misturadora) sobre a produção da empresa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Mesmo com a diminuição de um fator, considerado não significativo, efetuar a análise do sistema com os fatores capacidade da misturadora, quantidade de operadores e quantidade de sinterizadoras somente através de simulação se torna inviável, pois a quantidade de combinações geradas por todas as opções possíveis inviabiliza esta experimentação. Devido a isto, o aplicativo OptQuest® for Arena®, disponível no software de simulação Arena® 12, foi utilizado. Este aplicativo permite criar modelos de otimização com base em modelos de simulação já desenvolvidos, sendo necessário definir os controles com suas restrições, para que as soluções possam ser geradas, e uma função objetivo, para que as soluções possam ser avaliadas.

Um problema de Simulação com Otimização pode ser representado na Equação 2 (CHEN, FU, SHI, 2008; CHEN *et al.*, 2007; CHEN *et al.*, 2010) em que  $\vartheta$  é um vetor de

dimensão  $p$  que representa todas as variáveis de decisão do sistema e  $\Theta$  é a região de soluções viáveis. Se  $J(\vartheta)$  for uma função escalar, caracteriza um problema de objetivo único. Por outro lado, se  $J(\vartheta)$  for um vetor, trata-se de um problema multi-objetivo.  $J(\vartheta)$  é linear em  $\vartheta$  e  $\Theta$  e pode ser definido com um conjunto de equações lineares em  $\vartheta$ , que representam as restrições do problema conforme os conceitos de programação linear (BARRADAS, 2010).

$$\min_{\theta \in \Theta} J(\theta) \quad (2)$$

O próximo passo realizado foi decidir quais seriam os limites das variáveis de decisão para o modelo de otimização. Os parâmetros que já haviam sido avaliados nos primeiros experimentos tiveram seus limites mantidos, e as variáveis que não haviam sido avaliadas tiveram limites estabelecidos





empiricamente. Todos os parâmetros considerados e seus respectivos limites inferiores e superiores estão apresentados na Tabela 5. *Discrete step size* é a distância entre os níveis das variáveis. A variável CM, por exemplo, somente pode receber valores de 1000 em 1000 gramas.

Após definir os limites de cada variável, foi necessário encontrar a equação que representaria a função objetivo. Neste momento, o seguinte questionamento se fez

necessário: “Qual custo cada variável de decisão representa sobre o sistema?”. Esta informação é importante porque o custo das variáveis de decisão determina o “peso” que cada uma possui sobre a função objetivo. Entretanto, para responder precisamente a esta pergunta, é necessário que se saibam os custos de cada máquina juntamente com os custos dos operadores, mas estas informações não estão disponíveis e, devido a isto, foram atribuídos valores estimados aos fatores.

Tabela 5. Variáveis de decisão e seus limites

Variável	Valor máximo	Valor Mínimo	Tipo de variável	Discrete step size
Operadores	1	6	Discreta	1
Sinterizadoras	1	3	Discreta	1
CM	5000g	50000g	Discreta	1000g

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foi considerado que o custo de operadores influencia em 50% e as máquinas influenciam 25% cada em relação ao somatório de todos os custos do sistema. Desta forma, considerou-se que o custo dos operadores tem maior destaque nos custos da empresa, pois é duas vezes

maior que o custo de cada máquina. Diante das diretrizes apresentadas, foi possível gerar o modelo de otimização linear inteira apresentado na Equação (3). A função objetivo do modelo é o somatório do valor de cada variável após passar por um cálculo de normalização.

$$\text{Minimizar } Z = ((O / 6) * 50) + ((S / 3) * 25) + ((CM / 50000) * 25) \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} 1 &\leq O \leq 6 \\ 1 &\leq S \leq 3 \\ 5 &\leq CM \leq 50 \\ MP &\leq SF \end{aligned}$$

A variável SF representa a quantidade de sapatas feitas e é alimentada pelos resultados obtidos do modelo de simulação. A variável MP é a meta de produção. Para os experimentos foram utilizados os valores 80, 100, 120 e 150 para esta variável. Utilizando-se este modelo, a otimização tem o objetivo de minimizar as três variáveis: Quantidade de operadores, quantidade de sinterizadoras e capacidade da máquina de mistura, respeitando a meta de produção diária. Desta forma, pretende-se encontrar a configuração que traga o menor custo sem deixar de atender à meta de produção. Com as definições concluídas, o modelo foi implementado no Optquest® com suas devidas restrições e os melhores resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Melhores resultados obtidos.

MP	O	S	CM (g)	FO (z)	Tempo (min)
80	4	2	13000	56,5	02:02
100	4	2	24000	62	01:46
120	4	2	50000	75	01:45
150	4	3	34000	92	01:45

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que, dentro dos limites estabelecidos, a configuração que gera menos custos para se produzir, pelo menos, 80 sapatas por dia é com quatro operadores, duas sinterizadoras e uma misturadora com capacidade de 13kg. Para encontrar este resultado, o OptQuest® gastou 2 minutos e dois segundos. Já os cenários que tem como meta de produção 100 e 120 sapatas seguiram a mesma quantidade de operadores e sinterizadoras do primeiro (MP=80), alterando somente a capacidade da misturadora, 24kg e 50kg, respectivamente. Desta forma, caso a empresa já tenha a configuração mínima necessária para produzir 80 sapatas por dia e deseje aumentar sua produção para 120, a única alteração necessária é aumentar a capacidade da misturadora para 50kg, dispensando a necessidade de contratar algum funcionário ou comprar mais sinterizadoras.

Quando a meta de produção passa para 150, a configuração de menor custo apresenta uma capacidade da misturadora de 34kg, valor menor do que a do cenário anterior, o qual necessita de uma misturadora de 50kg. Entretanto, o cenário com MP igual 150 sapatas utiliza uma sinterizadora a mais, tornando seu custo maior do que todos os outros cenários verificados. Este resultado



foi o mais rápido encontrado, 1 minuto e 45 segundos, empatado com o cenário de 120 sapatas como meta de produção. Possivelmente, o tempo de respostas destes cenários foi menor devido à região de soluções viáveis, que é consideravelmente menor, facilitando a busca pela melhor solução.

O presente trabalho apresenta uma ferramenta de otimização do sistema de produção de sapatas diamantadas, mas os valores não são reais, visto que os custos das ferramentas foram definidos com base em estimativas. Assim, cabe aos responsáveis pela empresa determinar qual é o fator mais custoso e, também, qual é a proporção desta diferença. A partir desta informação, o modelo apresenta os melhores resultados.

Acredita-se que, devido à dinâmica elevada do sistema, seria inviável para os tomadores de decisões identificarem a configuração com menor custo, de acordo com a meta de produção, sem a verificação realizada neste trabalho.

## 7. CONCLUSÕES

O potencial de produção de rochas ornamentais do Estado do Rio de Janeiro gera uma alta demanda de ferramentas diamantadas, tornando visível um potencial nicho de mercado na fabricação destes insumos. Este cenário alavancou a idealização da empresa ABRASDI, que pretende se tornar referência de tecnologia e figurar entre as principais fornecedoras deste tipo de ferramenta do país.

Com base em análises estatísticas dos resultados obtidos pelas variações dos três fatores analisados inicialmente e seus níveis, foi possível identificar a influência que cada fator possui sobre a variável de resposta analisada. A otimização realizada possibilitou identificar qual a menor configuração necessária para que a empresa atinja a meta de produção estabelecida. Com isto, pretende-se auxiliar na tomada de decisão referente à compra das máquinas e contratação dos funcionários, levando-se em consideração a demanda inicial da empresa.

A importância deste trabalho se reforça pela escassez de tecnologia de fabricação de ferramentas diamantadas no Brasil para que se possam identificar parâmetros de análise. Outro fator importante é a metodologia utilizada que combina simulação computacional e otimização combinatória. Assim, o modelo de simulação e otimização se propõe a apresentar diversas informações consideradas importantes para a análise do seu processo.

Os resultados obtidos reforçam a importância e os benefícios da utilização da simulação computacional a eventos discretos juntamente com DOE e otimização combinatória. Como trabalhos futuros, propõe-se a execução do modelo de otimização avaliando o custo das

máquinas e operadores, comparando os resultados e o tempo de execução entre o modelo quando executado no OptQuest® e em outras ferramentas de otimização.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ pelo suporte financeiro para esta pesquisa. Gostariam de agradecer ainda à direção da empresa ABRASDI pelos dados e sugestões.

## 9. REFERÊNCIAS

BANKS, J., CARSON, J.S., NELSON, B.L., NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 5nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 2010.

BARRADAS, S., PESSOA, T., LIMA, L., TABEL, B., MARUJO, L. Simulação com otimização de uma rede de telecomunicações de acesso a internet banda larga. **XLII SBPO**, Bento Gonçalves – RS, 2010.

BROOKS, R.J., ROBINSON, S. **Simulation, with inventory control, Operational Research Series**. 2001, Basigstoke: Palgrave.

CHEN, C.H., FU, M.C., SHI, L. Some Topics for Simulation Optimization. **Winter Simulation Conference**, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, Miami – FL, 2008.

CHEN, C.H., FU, M.C., HE, D., LEE, L.H. Simulation Optimization Using the Cross-Entropy Method with Optimal Computing Budget Allocation, **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**. Vol. 20, n. 1. Wasserkrug, S., New York - USA, 2010.

CHEN, Y., CHEW, E.P., LEE, L.H., TENG, S. Multi-objective Simulation-based Evolutionary Algorithm for an Aircraft Spare Parts Allocation Problem. **European Journal of Operational Research**. N. 189, p. 476-491, 2007.

COSTA, R.F.S., MONTEVECHI, J.A.B., PINHO, A.F. Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura. **XLII SBPO**, Bento Gonçalves – RS, 2010.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução a modelagem e simulação de sistemas**, 2. ed. São Paulo, SP: Editora Visual, 372 p, 2008.

KELTON, D.W., SADOWSKI, R.P., STURROCK, D.T. **Simulation with Arena**, Fourth Edition, Mc Graw Hill, New York – USA, 2007.



MONTEVECHI, J.A.B., LEAL, F., PINHO, A.F., COSTA, R.F.S., OLIVEIRA, M.L.M., SILVA, A.L.F. **Conceptual Modeling in Simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a brazilian tech company. Winter simulation conference, USA, p. 1624-1635, 2010.**

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** 7th edition. John Wiley & Sons, Inc, Toronto, CA, 2009.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science.** Editora John Wiley Prof, Toronto, CA, 2004.

RIBEIRO JÚNIOR, J.J. **Análise estatística no SAEG.** Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa. 301p. 2001.

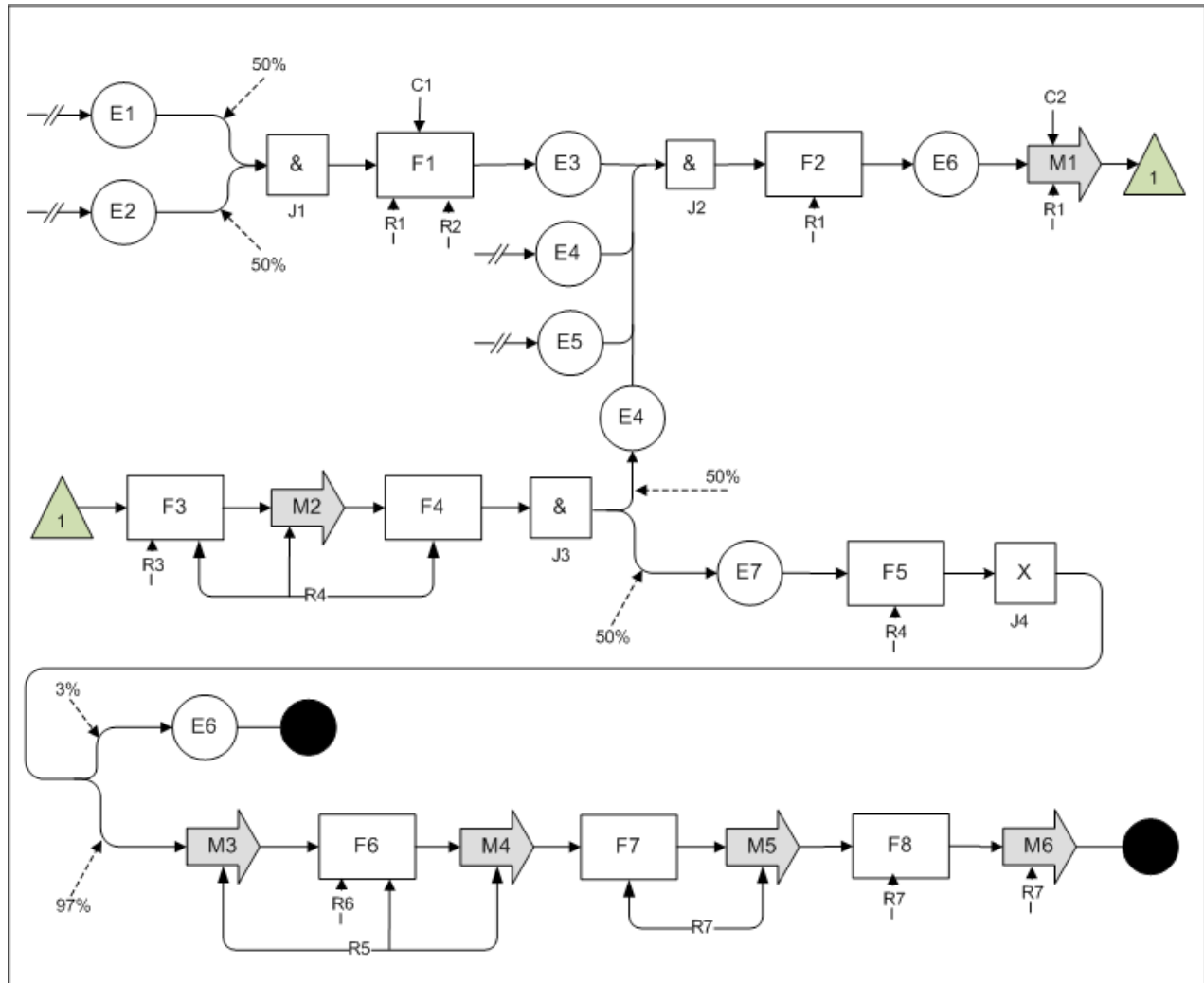
SARGENT, R.G. **Verifications and validation of simulations models.** Winter simulation conference, Miami, USA. pp. 124-137. 2007.

ZEPEDA, V. **Novos produtos deverão impulsionar setor de rochas ornamentais no estado.** Boletim FAPERJ, [http://www.faperj.br/boletim\\_interna.phtml?obj\\_id=5886](http://www.faperj.br/boletim_interna.phtml?obj_id=5886) acessado em 30/10/2009.



Apêndice A - Modelo conceitual do processo de produção de sapatas diamantadas e tabela de descrição dos elementos

Modelo conceitual



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela de descrição

Código	Descrição	Parâmetros
F1	Preparação da Mistura	NORMAL (30, 3) min; um operador e uma misturadora
F2	Preparar e preencher o molde	NORMAL (2, 0.2) min; um operador
F3	Sinterização	NORMAL (35, 3.5)min; um operador e uma sinterizadora
F4	Secagem, desmolde, passar desmoldante e pré-limpeza	NORMAL (15, 1.5) min; um operador
F5	Inspeção da sapata	NORMAL (10,1)seg; um operador
F6	Retífica	NORMAL (2, 0.2) min; um operador e uma retífica
F7	Pintura	NORMAL (5, 0.5) min; um operador
F8	Embalagem	NORMAL (3, 0.3) min; um operador
R1	Operador 1	Quantidade: 1



<b>R2</b>	Misturadora	Quantidade: 1
<b>R3</b>	Sinterizadora	Quantidade: 1
<b>R4</b>	Operador 2	Quantidade: 1
<b>R5</b>	Operador 3	Quantidade: 1
<b>R6</b>	Retífica	Quantidade: 1
<b>R7</b>	Embalagem	Quantidade: 1
<b>E1</b>	Diamante	Sempre disponível no processo, a partir de $t = 0$
<b>E2</b>	Liga metálica inorgânica	Sempre disponível no processo, a partir de $t = 0$
<b>E3</b>	Mistura	50% de diamante e 50% de liga metálica inorgânica. Quantidade suficiente para a produção diária
<b>E4</b>	Molde	Sempre disponível no processo, a partir de $t = 0$
<b>E5</b>	Suporte para sapata	Sempre disponível no processo, a partir de $t = 0$
<b>E6</b>	Compacto	Molde + suporte + mistura compactados
<b>E7</b>	Sapata diamantada	Suporte + mistura sinterizados
<b>M1</b>	Movimentação do laboratório para a sinterizadora	3,2 metros; 1,5 m/s
<b>M2</b>	Movimentação da sinterizadora para mesa de limpeza	1,5 metros; 1,5 m/s
<b>M3</b>	Movimentação da mesa de limpeza para a retífica	9 metros; 1,5 m/s
<b>M4</b>	Movimentação da retífica para a mesa de pintura	5,85 metros; 1,5 m/s
<b>M5</b>	Movimentação da mesa de pintura para a mesa de embalagem	7 metros; 1,5 m/s
<b>M6</b>	Movimentação da mesa de embalagem para o estoque	20 metros; 1,5 m/s
<b>J1</b>	Junta a entidade diamante e liga metálica	50% de cada entidade
<b>J2</b>	Junta a entidade mistura, suporte e molde	1 molde, 1 suporte e 440 g de mistura
<b>J3</b>	Separa a sapata (mistura + suporte compactados) do molde	1 sapata e 1 molde
<b>J4</b>	Separa o lote de seis sapatas após a sinterização e desmolde	6 sapatas
<b>C1</b>	Esta etapa é feita somente uma vez por dia no início da jornada	Etapa F1
<b>C2</b>	Cria-se um lote de seis sapatas para que sejam transportadas	Não há parâmetros para este controle