

ALEXANDRE PENEDO PASSOS

Modelo para Otimização de Atrasos na Produção de Grãos Eletrofundidos

Guaratinguetá
2021

Alexandre Penedo Passos

Modelo para Otimização de Atrasos na Produção de Grãos Eletrofundidos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche

Guaratinguetá
2021

P289m	Passos, Alexandre Penedo Modelo para otimização de atrasos na produção de grãos eletrofundidos / Alexandre Penedo Passos – Guaratinguetá, 2021. 73 f. : il. Bibliografia: f. 63-68 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche 1. Processos de fabricação. 2. Pesquisa operacional. 3. Planejamento da produção. I. Título. CDU 65.012.1
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

ALEXANDRE PENEDO PASSOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO DALE LUCHE
Orientador(a)/UNESP-FEG



Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
UNESP-FEG



Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA
UNESP-FEG

Janeiro de 2022

RESUMO

Técnicas de pesquisa operacional estão sendo muito utilizadas para otimizar processos em empresas dos mais variados setores. Neste trabalho é desenvolvido um modelo de dimensionamento de lotes baseado em programação inteira mista para diminuir o atraso na entrega de uma empresa de grãos eletrofundidos. Os pedidos são recebidos em quantidades e datas variadas, existem itens de demanda independente e as faixas, que são itens de demanda dependente. A produção diária de itens independentes é determinada e igual em todos os períodos. O problema está em determinar as quantidades diárias dos itens de demanda independente que serão destinados a compor as faixas e a satisfazer as suas demandas. Devido à diversidade de produtos e os prazos de entrega serem apertados, realizar a combinação dos itens em faixas costuma ser um processo demorado e envolver o setor de vendas e de PCP. Foram utilizadas as ferramentas GAMS/CPLEX para resolver uma instância real. Os resultados mostram que o modelo é capaz de organizar a entrega da produção de maneira eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de lotes. Programação inteira mista. Grãos eletrofundidos.

ABSTRACT

Operational research techniques are being widely used to optimize processes in companies from the most varied sectors. In this work, a lot sizing model based on mixed integer programming is developed to reduce the delivery delay of an electrofused grain company. Orders are received in varying quantities and dates, there are independent demand items and ranges, which are dependent demand items. The daily production of independent items is determined and is the same for all periods. The problem is in determining the daily quantities of the independent demand items that will be destined to compose the ranges and satisfy their demands. Due to the diversity of products and tight delivery times, matching items into ranges is often a time-consuming process and involves both sales and MPC. GAMS/CPLEX tools were used to solve a real instance. The results show that the model is able to organize the production delivery efficiently.

KEYWORDS: Lot sizing. Mixed integer programming. Electrofused grains.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema metodológico do projeto	12
Figura 2 – Exemplo de cerâmica	32
Figura 3 – Exemplos de abrasivos	33
Figura 4 – Exemplos de refratários	34
Figura 5 – Processo Bayer	39
Figura 6 – Alumina eletrofundida branca	40
Figura 7 – Alumina eletrofundida marrom	41
Figura 8 – Magnésia eletrofundida	43
Figura 9 – Carbetto de silício	44
Figura 10 – Resultado forno Acheson	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de tipos de minerais de bauxita	38
Tabela 2 - Características da α -alumina sinterizada a 20°C	39
Tabela 3 – Comparação do ALO Branco com o marrom	41
Tabela 4 - Composição química do ALO branco	42
Tabela 5 - Composição química de diferentes tipos de alumina eletrofundida marrom	42
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do óxido de magnésio	44
Tabela 7 - Exemplos de composição de faixas	47
Tabela 8 - Exemplos da proporção de produção por produto com uma capacidade de produção de 10000 kg	48
Tabela 9 - Caso 1: demanda satisfeita integralmente no período 5	49
Tabela 10 - Caso 2: demanda satisfeita ao longo dos períodos 2 e 3	49
Tabela 11 - Demanda do item i por período t , períodos 1 a 12	69
Tabela 12 - Demanda do item i por período t , períodos 13 a 22	69
Tabela 13 - Demanda da faixa f por período t , períodos 1 a 12	70
Tabela 14 - Demanda da faixa f por período t , períodos 13 a 22	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALO	Óxido de Alumínio
CLSP	<i>Capacitated Lot Sizing Problem</i>
CSLP	<i>Continuous Setup Lot Sizing Problem</i>
DLSP	<i>Discrete Lot Sizing Problem</i>
ELSP	<i>Economic Lot Sizing Problem</i>
GLSP	<i>General Lot Sizing Problem</i>
IDE	<i>Interface Development Environment</i>
MPC	<i>Manufacturing Planning and Control</i>
PCP	Programação e Controle da Produção
PL	Programação Linear
PLSP	<i>Proportional Lot Sizing Problem</i>
PO	Pesquisa Operacional
ULSP	<i>Uncapacitated Lot Sizing Problem</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	QUESTÃO DA PESQUISA	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.3	JUSTIFICATIVAS	11
1.4	METODOLOGIA	11
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROGRAMAÇÃO LINEAR	14
2.2	DIMENSIONAMENTO DE LOTES	16
2.2.1	Dimensionamento de Lotes Econômico	19
2.2.2	Dimensionamento De Lotes Capacitado	20
2.2.3	Dimensionamento de Lotes Não-Capacitado	22
2.2.4	Dimensionamento de Lotes Discreto	23
2.2.5	Dimensionamento de Lotes Proporcional ou Compartilhado	25
2.2.6	Dimensionamento de Lotes Geral	26
2.2.7	Programação e Dimensionamento de Lotes Contínuo	28
3	GRÃOS ELETROFUNDIDOS	31
3.1	EMPRESAS DO SETOR	31
3.2	CERÂMICAS	32
3.3	ABRASIVOS	32
3.4	REFRATÁRIOS	34
3.5	ALUMINA	37
3.5.1	Bauxita	37
3.5.2	Processo Bayer	38
3.5.3	Eletrofusão	40
3.6	MAGNÉSIA	42
3.7	CARBETO DE SILÍCIO	44
4	MODELAGEM E RESULTADOS	47
4.1	MODELO ALGÉBRICO	48
4.2	RESULTADOS	51
5	CONCLUSÕES	62

BIBLIOGRAFIA	63
---------------------------	-----------

APENDICE	69
-----------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de um problema combinatório da produção na programação de entregas em uma empresa do setor de produção de grãos eletrofundidos. Os grãos eletrofundidos são materiais sintéticos obtidos através da fusão de suas matérias primas utilizando um forno de arco elétrico, exemplos desses grãos são a alumina eletrofundida e o carbeto de silício. As empresas do setor, que pertencem ao grupo de Indústrias Químicas, produzem estes materiais sintéticos para uso em refratários e abrasivos. No Brasil essas empresas estão concentradas na região Sudeste.

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) para as empresas do setor é de extrema importância devido aos altos custos associados à produção, como o gasto elétrico, matéria-prima, maquinário e outros. Inclui-se também a complexidade devido aos vários aspectos que devem ser levados em consideração no processo de planejamento, como, por exemplo, a matéria-prima utilizada, a quantidade que deve ser produzida, a quantidade de produtos que devem ser mantidos em estoque e os processos secundários de fabricação, que podem ser necessários, como, por exemplo, a moagem. Portanto, a procura de novos meios para otimizar a produção se torna uma necessidade para que as empresas continuem competitivas no mercado.

Neste sentido, neste trabalho é considerado o problema de definir o programa de produção de uma empresa de grãos eletrofundidos, considerando a demanda em carteira de itens simples e compostos (faixas). O modelo proposto para é baseado na literatura de problemas de programação linear, mais especificamente, de “dimensionamento de lotes” (*lot-sizing problems*). Para este trabalho foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista que utiliza conceitos de dimensionamento de lotes para ilustrar um problema real de planejamento em uma empresa de grãos eletrofundidos.

1.1 QUESTÃO DA PESQUISA

É possível diminuir os atrasos na entrega de produtos com o auxílio de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão baseada em programação linear?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi otimizar a combinação da produção em itens de demanda dependente (faixas) e itens de demanda independente, visando diminuir o atraso na entrega em uma empresa do setor de grãos eletrofundidos.

Objetivos específicos

- Foi desenvolvido um modelo de programação linear.
- Foi implementado o modelo no IDE GAMS.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Atrasos na entrega de produtos podem prejudicar não só o lucro, como também a reputação de uma empresa, o que pode ser mais prejudicial ao longo do tempo.

O tempo utilizado pelo PCP (Planejamento e Controle da Produção) para programar o atendimento da demanda em carteira é alto e pouco eficaz para evitar atrasos na entrega, muitas vezes ainda é preciso reprogramar as entregas, devido a pedidos novos e urgentes. Um software que realize a combinação da produção para itens de demanda em carteira poupará significativamente o tempo de programação e garantirá o menor atraso nas entregas.

Aumentar a eficiência da linha de produção implica na redução da necessidade de incrementar os turnos de operação dos fornos, ou de aumentar a capacidade de produção, otimizando o consumo de energia.

A produção de grãos eletrofundidos em quantidades industriais demanda um grande consumo de energia, o carbeto de silício, por exemplo, consome entre 7.300 e 7.600 kWh por tonelada de material produzido, segundo Derevyanko e Zhadanos (2015). As grandes empresas do setor produzem dezenas de milhares de toneladas de grãos eletrofundidos todos os anos. Por isso, esforços para diminuir esse consumo são de extrema importância, tanto do ponto de vista econômico para a empresa como também do ponto de vista ecológico para o meio-ambiente.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão do tema foi conduzida uma pesquisa bibliográfica, a partir de livros, artigos, teses e sites de empresas, bem como de organizações especializadas sobre os assuntos abordados neste trabalho. A partir das informações levantadas, foi criado um modelo de programação linear baseado em uma situação real encontrada em uma empresa do setor de grãos eletrofundidos.

A Figura 1 ilustra a classificação deste trabalho baseado na sua natureza, abordagem, procedimentos e objetivos.

Figura 1 – Esquema metodológico do projeto

NATUREZA	ABORDAGEM	PROCEDIMENTOS
Básica	Qualitativa	Bibliográfica
Aplicada	Quantitativa	Documental
	Combinada	Experimental
		Estudo de caso
		Levantamento
		Expost-facto
		Pesquisa-ação
		Participante
		Modelagem

OBJETIVOS
Exploratória
Explicativa
Descritiva
Normativa

Fonte: Autor

Segundo Garcia (2005) o modelo matemático desenvolvido é empírico, já que o modelo original é baseado em uma situação real de uma fábrica de grãos eletrofundidos. Isso faz com que a natureza da pesquisa seja aplicada, uma vez que esta procura resolver um problema real, com procedimento de modelagem, já que se cria um modelo para resolver o problema e com uma abordagem quantitativa com dados quantificáveis.

Como consequência desta metodologia, o trabalho poderá ser considerado como, segundo Bertrand e Fransoo (2002), uma pesquisa normativa, já que se procura contribuir com os resultados da literatura já existente.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é organizado da seguinte maneira. No Capítulo 2 são discutidas as definições do âmbito da Pesquisa Operacional e do Planejamento e Controle da Produção. Também são revisados diferentes tipos de modelos de dimensionamento de lotes.

No Capítulo 3 são apresentados conceitos de grãos eletrofundidos desde as empresas que os fabricam como as suas propriedades físicas e químicas. Também são ilustradas algumas matérias primas e suas diferentes aplicações.

Já no Capítulo 4 são demonstrados e discutidos o problema que será tratado neste trabalho, o modelo de dimensionamento de lotes criado para resolvê-lo e os resultados obtidos utilizando o software de modelagem algébrica GAMS.

Por último, no Capítulo 5 são feitas as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Neste trabalho são utilizados conceitos de Programação Linear aplicados no Planejamento e Controle da Produção a fim de auxiliar na tomada de decisão.

Programação Linear é um modelo de otimização de Pesquisa Operacional em um problema que pode ser representado utilizando apenas funções lineares, tendo em vista as restrições do problema como o tempo ou materiais.

Segundo Bazaraa, Jarvis e Sherali (1997) a Programação Linear é um modelo que tenta otimizar o resultado de uma função linear ao mesmo tempo que respeita as restrições impostas por outras funções lineares.

Segundo Hillier e Lieberman (2006) a Programação Linear se trata de uma técnica de planejamento que utiliza funções lineares com o intuito de se conseguir o melhor resultado de uma função objetivo.

Para que um modelo possa ser resolvido por Programação Linear é necessário atender quatro requisitos segundo Goldbarg e Luna (2005):

- Proporcionalidade: Os recursos consumidos e os custos relacionados devem ser proporcionais à produção ilustrada no problema, ou seja, as suas funções devem ser lineares.
- Não Negatividade: As variáveis de decisão não podem assumir valores negativos.
- Aditividade: A soma de todos os custos relacionados à produção deve ser igual ao custo total.
- Separabilidade: É possível analisar cada custo de maneira isolada.

Em um problema de Programação Linear é necessário primeiramente definir o escopo do problema, depois definir o objetivo e quais variáveis o afetam, em seguida definir todas as restrições dessas variáveis que delimitam a solução. A partir dessa construção do problema, escolhe-se um método de resolução para encontrar a solução ótima a partir de uma multitude de soluções viáveis.

Existem diversos métodos de resolver um problema de Programação Linear entre eles o método simplex, o método gráfico e por pura tentativa e erro através de um programa de computador, que são escolhidos de acordo com a complexidade do problema e com os recursos disponíveis.

Como dito anteriormente, a Programação Linear pertence à Pesquisa Operacional, que segundo Arenales *et al.* (2011), é uma ciência que transforma um problema com recursos finitos em um modelo matemático de forma a simular e obter a melhor solução levando em consideração as limitações do projeto com o intuito de auxiliar na tomada de decisões.

Taha (2008) complementa dizendo que toda solução de Pesquisa Operacional além da parte matemática deve considerar também a parte humana, ou seja, como as pessoas afetadas pela solução irão se comportar diante dela, um modelo pode falhar na prática apesar de obter sucesso na teoria se a parte humana não for propriamente analisada.

Em casos como o apresentado neste trabalho, quando a programação linear é aplicada à produção é utilizada como um mecanismo de Programação e Controle da Produção (PCP) como simulação de um processo real ilustrando o seu potencial de ganhos para auxiliar os responsáveis na tomada de decisão da melhor maneira de destinar os recursos disponíveis.

Segundo Slack *et al* (2006) Programação e Controle da Produção é o ramo do sistema de decisões responsável pelo fornecimento dos recursos necessários para as atividades desejadas de modo que a quantidade e o tempo de recebimento desses recursos garantam o funcionamento contínuo das operações sem que a qualidade do serviço ou do produto final seja prejudicada.

Segundo Tubino (2007) PCP é um departamento de apoio para a decisão de aquisição e alocação de recursos da melhor maneira possível conforme as informações oriundas das diversas áreas da empresa e pensando nos três níveis de planejamento: estratégico, tático e operacional, em outras palavras, ajudando nas decisões de longo, médio e curto prazo respectivamente.

O longo prazo envolve questões como localização ou para que parte do mercado deseja focar para vender os produtos. O médio prazo é focado em questões de necessidades de material e produção. Já o curto prazo se preocupa com questões do dia a dia da produção (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

O estudo de caso deste trabalho utiliza a Programação Linear como um mecanismo de PCP para auxiliar na decisão do dimensionamento dos lotes de cada processo com o intuito de diminuir a falta de produção com relação à demanda.

A aplicação de Programação Linear para auxiliar as decisões da produção é um conceito já estudado a anos e utilizado em diversos países ao redor do mundo, incluindo o Brasil. Em Lahdelma e Hakonen (2003) criou-se um modelo de programação linear para diminuir os custos de produção de energia por um sistema de cogeração, mais especificamente o método simplex foi escolhido para encontrar a solução ótima do problema. O sistema usa ciclos de

uma hora como base, já que a demanda tanto de calor como de energia varia com a hora do dia, além de possivelmente diminuir os tempos necessários para encontrar a solução desejada. O artigo finlandês também faz uma comparação de um método simplex criado pensando em problemas de sistemas de cogeração chamado de “*Power Simplex*” com um método simplex genérico.

Em Paiva e Morabito (2012) foram propostos modelos de PL para otimizar o transporte, estocagem e processo de produção de cana-de-açúcar, álcool e melação em uma usina do setor sucroenergético pensando em um planejamento tanto de nível tático quanto de nível estratégico com restrições em capacidade dos meios de transporte, capacidade de estoque, tamanho da safra e demanda do mercado. Os resultados apresentam um potencial de melhoria do processo de moagem.

2.2 DIMENSIONAMENTO DE LOTES

O dimensionamento de lotes (*lot-sizing*) foi primeiramente desenvolvido por Wagner e Whitin (1958) como uma nova maneira de determinar um tamanho de lote econômico sem a necessidade de assumir uma demanda estática dos produtos.

Esse conceito foi expandido e desenvolvido ao longo dos anos de modo que atualmente existem várias classificações de problemas de dimensionamento de lotes entre eles o dimensionamento de lotes discreto, contínuo, geral, capacitado, não capacitado, estocástico e proporcional.

Segundo Haase (1994), existem 12 critérios para facilitar a classificação de um problema de dimensionamento de lotes. Grau de informação, desenvolvimento temporal de parâmetros, horizonte de planejamento, escala de tempo, número de itens, número de estágios, custos relevantes, restrições de recursos, processo de fornecimento, política de serviço, consideração de tempo consumido nas atividades, objetivos.

Grau de informação: nesse critério se determina se um modelo é estocástico ou determinístico, em um modelo estocástico os valores dos parâmetros são aleatórios ao contrário do modelo determinístico em que estes são fixos.

Desenvolvimento temporal de parâmetros: Caso os parâmetros variem de acordo com o avanço dos períodos, o problema é considerado dinâmico caso o contrário é considerado estático.

Horizonte de planejamento: O tempo de planejamento que o modelo busca representar pode ser finito, infinito ou variável.

Escala de Tempo: Neste critério o modelo pode ser classificado entre um modelo discreto ou contínuo.

Número de itens: Caso o problema seja composto de produtos em que a produção seja independente entre eles, é possível decompor esse problema em vários problemas de item único, todavia, caso os resultados da produção de um desses produtos dependa dos resultados da produção do outro, então, o problema é de multi-item.

Número de estágios: Se dentro do escopo do problema o produto pode ser produzido com apenas em um estágio, por exemplo se o produto não tiver um componente que precisa ser fabricado antes do produto final o problema é monoestágio, se o produto precise de um ou mais componentes que são fabricados dentro do escopo do problema então este é multiestágio.

Custos relevantes: Neste critério se define os tipos de custo que estarão dentro do escopo do problema, algumas possibilidades seriam: custo de estoque, custo de produção do lote, custo de preparação da máquina, custo de capacidade, estes custos podem ser monetários, temporais, relacionados aos materiais ou mão de obra.

Restrições de recursos: Caso as restrições de recursos sejam consideradas no modelo este é um modelo capacitado, entretanto caso sejam considerados recursos infinitos então é um modelo não capacitado.

Processo de fornecimento: Neste critério é determinado como o fornecimento acontece no problema, quanto tempo demora ao pedido chegar, se ele chega com peças defeituosas ou não, se tem algum elemento aleatório dentro do processo, se existe um único fornecedor ou se são vários.

Política de serviços: Determina se haverá possibilidade de devoluções, se é necessário um estoque de reserva, se o serviço será terceirizado, se serão feitas reservas para que inicie a produção ou se os produtos são feitos para uma demanda prevista, são alguns exemplos de políticas de serviço que podem afetar o modelo.

Consideração de tempo consumido nas atividades: É decidido quanto tempo é necessário para concluir as atividades que estão dentro do escopo do problema, se esse tempo é fixo, se depende do item, se será desconsiderado.

Objetivos: Por último, o que se pretende alcançar com esse modelo, por exemplo, minimização de custos, de atraso, de tempo consumido ou maximização da produção, do lucro.

Além dos critérios mencionados anteriormente, Karimi, Ghomi e Wilson (2003) ainda adicionam algumas possíveis características que afetam a complexidade de modelos de

dimensionamento de lotes. Deterioração de itens, estrutura de configuração e escassez de inventário.

Deterioração de itens: quando é levada em consideração a deterioração cria uma limitação de tempo no estoque.

Estrutura de configuração: Dependendo das dependências do custo e do tempo de configuração a estrutura pode ser classificada em simples ou complexa. Na simples, essas variáveis em um período são independentes do que ocorreu em períodos anteriores. Já a complexa leva em consideração o que ocorreu em períodos anteriores. A estrutura complexa ainda pode ser dividida em 3 classificações, *carry-over*, item e *sequence-dependent*. *Carry-over* ocorre quando não é necessário configurar a máquina pois ela já tinha sido configurada no período anterior. Item ocorre quando uma configuração ocorre para um item com características parecidas com o item anterior. Por último *sequence-dependent* ocorre quando a sequência de produção afeta o custo e o tempo de configuração

Escassez de inventário: quando é levada em consideração o que pode ocorrer é que a demanda não será satisfeita ao final do horizonte de planejamento ou a demanda não precisa ser satisfeita no período atual, permitindo que esta possa ser satisfeita em períodos posteriores.

Além das classificações mencionadas por Haase (1994) e Karimi, Ghomi e Wilson (2003) uma das formas que problemas de dimensionamento de lotes podem ser classificados é como *small-bucket-problem* ou *large-bucket-problem*. A diferença entre os dois está na forma que eles lidam com a preparação no período. *Small-bucket-problems* permitem apenas que a máquina esteja configurada uma única vez por período, um exemplo de *small-bucket-problem* é o dimensionamento de lotes discreto. Enquanto os *large-bucket-problems* permitem que a máquina seja configurada mais vezes para itens diferentes, um exemplo de *small-bucket-problem* é o dimensionamento de lotes geral (KACZMARCZYK, 2020).

Outra forma de classificar os modelos de dimensionamento de lotes é de acordo com o modo em que o tempo é dividido. Modelos de tempo discreto, de tempo contínuo e uma combinação dos dois.

Em modelos de tempo discreto, não deve ser confundido com modelo de dimensionamento de lotes discreto, o horizonte de planejamento é dividido em períodos distintos com as suas variáveis de decisão sendo determinadas para cada período.

Modelos de tempo contínuo não devem ser confundidos com modelos de programação e dimensionamento de lotes contínuo, não são divididos em períodos e sim como o nome implica, se baseiam em um horizonte de planejamento contínuo.

Os modelos que combinam os dois modos anteriores utilizam características de ambos, como por exemplo, a divisão dos períodos varia dependendo do que está sendo avaliado (GÜNTHER, 2014).

Em Chen e Zhang (2021) em um dimensionamento de lotes capacitado pelo dinheiro disponível, é levado em consideração as consequências de não satisfazer a demanda no tempo previsto que acarreta, por exemplo, na demanda no próximo período cair devido a desconfiança do consumidor e como usar empréstimos para alterar a restrição de capacidade de dinheiro pode afetar o processo.

Conforme as pesquisas de dimensionamento de lotes avançam novas maneiras de tornar os problemas teóricos de dimensionamento de lotes mais próximos da realidade, levando em consideração dificuldades e incertezas do dia a dia da produção que antes tinham sido desconsideradas.

Um exemplo disso é no trabalho de Chen e Liu (2021) em que o dimensionamento de lotes foi usado para modelar um problema em que uma empresa que terceiriza a produção dos seus produtos deve operar com demanda incerta e fornecedores que podem não conseguir cumprir os pedidos da empresa.

2.2.1 Dimensionamento de Lotes Econômico

O problema de dimensionamento de lotes econômico (*economic lot sizing problem* - ELSP), segundo Chatfield (2007), procura minimizar o custo de produção em um problema com vários itens que compartilham uma única máquina de modo a produzir os lotes de maneira periódica.

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes econômico, o seguinte modelo foi retirado de Manne (1958).

Índices:

t = período

j = sequência

i = item

Parâmetros:

T = número total de períodos t

I = número total de itens i

J = número total de sequências j

S_t = horas de trabalho disponíveis no expediente no período t

V_t = horas extras de trabalho disponíveis no período t

B_{ijt} = trabalho necessário para realizar a sequência j no item i no período t

Variáveis de decisão:

x_{ij} = fração do total necessário para o item i seja fornecido pela sequência j

v_t = variável de folga para horas de trabalho em hora extra no período t

s_t = variável de folga para horas de trabalho no expediente no período t

l_t = horas extras necessárias no período t

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T l_t \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ijt} x_{ij} - l_t + s_t = S_t \quad \forall i, j, t \quad (3)$$

$$l_t + v_t = V_t \quad \forall t \quad (4)$$

$$x_{ij}, l_t, v_t, s_t \geq 0 \quad \forall i, j, t \quad (5)$$

A equação objetivo em (1) busca minimizar o total de horas extras necessárias no horizonte de planejamento. A equação em (2) restringe a soma de todas as frações de um item tem de ser iguais a 1. A equação em (3) restringe o número de horas necessárias para terminar a soma de horas disponíveis no expediente mais as horas extras necessárias no período. Já a equação em (4) impede que as horas extras necessárias no período ultrapassem as horas extras disponíveis no mesmo. Por último, a inequação em (5) exige que as variáveis de decisão sejam positivas.

2.2.2 Dimensionamento de Lotes Capacitado

Um problema de dimensionamento de lotes capacitado (*capacitated lot sizing problem* ou CLSP), segundo Zhang, Yan e Li (2015), assume que existe uma restrição de capacidade seja ela de produção, de transporte ou de armazenamento.

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes capacitado, o seguinte modelo foi retirado de Pochet (2001).

Índices:

t = período

k = recurso com capacidade limitada

i = item

Parâmetros:

T = número total de períodos t

n = número total de itens

K = número total de recursos com capacidade limitada

s_0 = estoque no início do problema

p_{it} = custo unitário de produção do item i no período t

f_{it} = custo de produção fixo do item i no período t

h_{it} = custo unitário de estoque do item i no período t

d_{it} = demanda do item i no período t

a_{it} = recurso k consumido pela produção unitária do item i

b_{it} = recurso k consumido pela preparação para a produção do item i

L_{kt} = capacidade disponível do recurso k no período t

M = número inteiro positivo

Variáveis de decisão:

x_{it} = quantidade produzida do item i no período t

$y_{it} = 1$ se o há produção do item i no período t

s_{it} = estoque do item i no fim do período t

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (p_{it}x_{it} + f_{it}y_{it} + h_{it}s_{it})$$

s.a.

(6)

$$s_{it-1} + x_{it} = d_{it} + s_{it} \quad \forall i,t \quad (7)$$

$$x_{it} \leq M y_{it} \quad \forall i,t \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{it} x_{it} + \sum_{i=1}^n b_{it} y_{it} \leq L_{kt} \quad \forall i,k,t \quad (9)$$

$$x_{it}, s_{it} \geq 0 \quad \forall i,t \quad (10)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i,t \quad (11)$$

A equação em (6) visa minimizar os custos totais do produto. A equação em (7) visa satisfazer a demanda de cada período através da produção do período e do estoque do período anterior. A inequação em (8) restringe a variável y_{it} a ter o valor de 1 quando houver produção. A inequação em (9) restringe a capacidade de cada recurso no período t . Por último as expressões em (10) e (11) restringem as variáveis x_{it} e s_{it} a serem reais positivas e y_{it} a ser uma variável binária respectivamente.

2.2.3 Dimensionamento de Lotes Não-Capacitado

Ao contrário do dimensionamento de lotes capacitado, o problema de dimensionamento de lotes não-capacitado (*uncapacitated lot sizing problem* - ULSP) considera que a capacidade de recursos e de produção não sejam fatores limitantes no modelo (BRAHIMI *et al.*, 2006).

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes não-capacitado, o seguinte modelo foi retirado de Pochet (2001).

Índices:

t = período

Parâmetros:

T = número total de períodos t

s_0 = estoque no início do problema

p_t = custo unitário de produção no período t

f_t = custo de produção fixo no período t

h_t = custo unitário de estoque no período t

d_t = demanda no período t

M = número inteiro positivo

Variáveis de decisão:

x_t = quantidade produzida no período t

$y_t = 1$ se o há produção no período t

s_t = estoque no fim do período t

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T (p_t x_t + f_t y_t + h_t s_t) \quad (12)$$

s.a.

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad \forall t \quad (13)$$

$$s_0 = s_n = 0 \quad \forall t \quad (14)$$

$$x_t \leq M y_t \quad \forall t \quad (15)$$

$$x_t, s_t \geq 0 \quad \forall t \quad (16)$$

$$y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \quad (17)$$

A equação em (12) visa minimizar os custos totais do produto. A equação em (13) visa satisfazer a demanda de cada período através da produção do período e do estoque do período anterior. A equação em (14) restringe o estoque do começo do primeiro período e do fim do último período a 0. A inequação em (15) restringe a variável y_t a ter o valor de 1 quando houver produção. Por último as expressões em (16) e (17) restringem as variáveis x_t e s_t a serem reais positivas e y_t a ser uma variável binária respectivamente.

2.2.4 Dimensionamento de Lotes Discreto

Em um problema de dimensionamento de lotes discreto (*discrete lot sizing problem* ou DLSP), segundo Gicquel e Minoux (2015), é necessário que no máximo um item seja produzido por vez e é utilizada toda a capacidade de produção, também por isso esse tipo de modelo é conhecido como tudo ou nada, a demanda é dinâmica e a função objetivo é feita para minimizar os custos de preparação e estoque.

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes discreto, o seguinte modelo foi apresentado por Arenales *et al.* (2011).

Índices:

i = item

t = período

h = subperíodo

Parâmetros:

T = número de períodos

n = número de itens

d_{it} = demanda do item i no período t

I_{i0} = estoque inicial do item i

b_i = tempo de produção por unidade do item i

C_t = capacidade de produção em horas de uma máquina ou instalação no período t

sp_i = tempo de preparação para o item i

s_i = custo de preparação do item i

u_i = custo unitário do item i

$y_{it} = 1$ se o item i é produzido no período t

$z_{ih} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no subperíodo h

$z_{i0} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no início subperíodo 1

Variáveis de decisão:

I_{it} = estoque do item i no final do período t

x_{it} = quantidade produzida do item i no período t

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [(s_i] y_{it} + u_i I_{it}) \quad (18)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + x_{it} - d_{it} \quad \forall i, t \quad (19)$$

$$b_i x_{it} = C_t z_{ih} \quad \forall i, h, t \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ih} \leq 1 \quad \forall i, h \quad (21)$$

$$y_{it} \geq z_{ih} - z_{i,h-1} \quad \forall i, h, t \quad (22)$$

$$y_{it}, \quad z_{ih} \in \{0, 1\} \quad \forall i, h, t \quad (23)$$

$$I_{it}, \quad x_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (24)$$

A equação em (18) é a equação objetivo que busca minimizar os custos de preparação e estoque respectivamente. A equação em (19) define o estoque no fim do período, que varia de acordo com a produção e a demanda do período e o estoque do período anterior. A equação em (20) restringe a produção pela capacidade. A inequação em (21) demonstra que a máquina somente pode estar preparada para um único item por vez. A inequação em (22) ilustra se um novo lote será feito. As expressões em (23) e (24) definem as variáveis em binárias e reais positivas respectivamente.

2.2.5 Dimensionamento de Lotes Proporcional ou Compartilhado

O problema de dimensionamento de lotes proporcional ou compartilhado (*proportional lot sizing problem* - PLSP), segundo Kimms e Drexl (1998), foi criado a partir do DLSP com a maior diferença sendo que no PLSP é possível produzir dois itens diferentes no mesmo período desde que eles compartilhem os mesmos recursos. Assim como DLSP e CLSP é considerado um problema de ‘*small-bucket*’, já que no máximo dois itens são produzidos em um único período.

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes proporcional, o seguinte modelo foi retirado de Drexl e Kimms (1997).

Índices:

i = item

t = período

Parâmetros:

T = número de períodos

n = número de itens

d_{it} = demanda do item i no período t

I_{i0} = estoque inicial do item i

h_i = custo unitário de estoque do item i

C_t = capacidade de produção de uma máquina no período t

s_i = custo de preparação do item i

p_i = capacidade necessária para produção unitária do item i

$y_{i0} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no início subperíodo 1

Variáveis de decisão:

I_{it} = estoque do item i no final do período t

q_{it} = quantidade produzida do item i no período t

$y_{it} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no período t

$x_{it} = 1$ se ocorre preparação da máquina para o item i no período t

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [(s)_i x_{it} + h_i I_{it}] \quad (25)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + q_{it} - d_{it} \quad \forall i,t \quad (26)$$

$$p_i q_{it} \leq C_t (y_{it} + y_{i,t-1}) \quad \forall i,t \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i q_{it} \leq C_t \quad \forall i,t \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{it} \leq 1 \quad \forall i,t \quad (29)$$

$$x_{it} \geq y_{it} - y_{i,t-1} \quad \forall i,t \quad (30)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i,t \quad (31)$$

$$I_{it}, x_{it}, q_{it} \geq 0 \quad \forall i,t \quad (32)$$

A equação em (25) é a equação objetivo que busca minimizar os custos de preparação e estoque respectivamente. A equação em (26) define o estoque no fim do período, que varia de acordo com a produção e a demanda do período e o estoque do período anterior. A inequação em (27) só permite que haja produção do item i se a máquina está preparada para produzi-lo. A inequação em (28) restringe a produção total de um período pela capacidade de produção do mesmo período. A inequação em (29) restringe o problema à preparação de no máximo um único item por período. A inequação em (30) ilustra se um novo lote será feito. As expressões em (31) e (32) definem as variáveis em binárias e reais positivas respectivamente.

2.2.6 Dimensionamento de Lotes Geral

O problema de dimensionamento de lotes geral (*general lot sizing problem* ou GLSP), criado por Fleischmann e Meyr (1997), ao contrário do modelo discreto, não utiliza a suposição do tudo ou nada, ele também possui lotes criados em subperíodos de tamanhos variados com a possibilidade de esses lotes serem compostos por itens diferentes dentro do mesmo período levando em consideração restrições de recursos.

Para demonstrar um modelo de dimensionamento de lotes geral, o seguinte modelo foi retirado de Arenales *et al.* (2011).

Índices:

i = item

t = período

h = subperíodo

Parâmetros:

T = número de períodos

n = número de itens

H_t = número de subperíodos no período t

d_{it} = demanda do item i no período t

I_{i0} = estoque inicial do item i

b_i = tempo de produção por unidade do item i

C_t = capacidade de produção em horas de uma máquina ou instalação no período t

sp_i = tempo de preparação para o item i

s_i = custo de preparação do item i

u_i = custo unitário do item i

$y_{ih} = 1$ se o item i é produzido no subperíodo h

$z_{ih} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no subperíodo h

$z_{i0} = 1$ se a máquina está preparada para o item i no início micro período 1

Variáveis de decisão:

x_{ih} = quantidade produzida do item i no subperíodo h

I_{it} = estoque do item i no final do período t

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{Ht} s_i y_{ih} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T u_i I_{it} \quad (33)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{h=1}^{Ht} x_{ih} - d_{it} \quad \forall i, h, t \quad (34)$$

$$b_i x_{ih} \leq C_t z_{ih} \quad \forall i, h, t \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{Ht} b_i x_{ih} \leq C_t \quad \forall i, h, t \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ih} \leq 1 \quad \forall i, h \quad (37)$$

$$y_{ih} \geq z_{ih} - z_{i,h-1} \quad \forall i, h \quad (38)$$

$$y_{ih}, z_{ih} \in \{0,1\} \quad \forall i, h \quad (39)$$

$$I_{ih}, x_{ih} \geq 0 \quad \forall i, h \quad (40)$$

A equação em (33) é a equação objetivo que busca minimizar os custos de produção e estoque respectivamente. A equação em (34) demonstra o estoque no fim do período, dependendo da produção e da demanda do período e do estoque do período anterior. A inequação em (35) exige que para haja produção do item no período é necessário que a máquina esteja preparada enquanto a inequação em (36) restringe a produção pela capacidade da máquina. A inequação em (37) restringe a máquina a estar preparada para um único item por vez. A inequação em (38) ilustra se um novo lote será feito. As expressões em (39) e (40) definem as variáveis em binárias e reais positivas respectivamente.

2.2.7 Programação e Dimensionamento de Lotes Contínuo

Diferentemente do dimensionamento de lotes discreto, no problema de programação e dimensionamento de lotes contínuo (*continuous setup lot sizing problem* - CSLP) não é necessário que o lote atinja a capacidade de produção no período (GICQUEL; MINOUX; DALLERY, 2008).

Para demonstrar um modelo de programação e dimensionamento de lotes contínuo, o seguinte modelo foi retirado de Jans e Degraeve (2008).

Índice:

i = item

t = período

Parâmetros:

T = número de períodos

n = número de itens

d_{it} = demanda do item i no período t

$sd_{it\ k}$ = demanda acumulada do item i no período t até k

cap_t = capacidade de produção no período t

sc_i = custo de preparação do item i

vc_i = custo unitário do item i

h_i = custo unitário de estoque do item i

g_{it} = custo de start up do item i no período t

vt_i = unidades do item i consumidas da capacidade

Variáveis de decisão:

z_{it} = 1 se a máquina está não está preparada para o item i no período t (start up)

x_{it} = quantidade produzida do item i no período t

y_{it} = 1 se ocorre uma preparação para o item i no período t

s_{it} = estoque do item i no fim do período t

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (g_{it} z_{it} + sc_{it} y_{it} + vc_{it} x_{it} + hc_{it} s_{it}) \quad (41)$$

s.a.

$$s_{it-1} + x_{it} = d_{it} + s_{it} \quad \forall i, t \quad (42)$$

$$vt_i x_{it} \leq cap_t y_{it} \quad \forall i, t \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{it} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (44)$$

$$z_{it} \geq y_{it} - y_{i,t-1} \quad \forall i, t \quad (45)$$

$$y_{it}, z_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (46)$$

$$s_{it}, x_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (47)$$

A equação em (41) é a equação objetivo que procura minimizar os custos totais dos produtos. A equação em (42) restringe a demanda de cada período através da produção do período e do estoque do período anterior. Já a inequação em (43) limita a produção a capacidade de produção do período. A inequação em (44) restringe o problema à preparação de no máximo um único item por período. A inequação em (45) força o start up a ocorrer quando a máquina não estiver preparada para produzir o item i no período t . Por último as expressões em (46) e (47) restringem as variáveis x_{it} e s_{it} a serem reais positivas e y_{it} e z_{it} a serem variáveis binárias respectivamente.

3 GRÃOS ELETROFUNDIDOS

Os grãos eletrofundidos são matérias primas sintéticas que são transformadas a partir de matérias primas naturais, como a bauxita e a magnesita para a produção de alumina eletrofundida marrom e de magnésia respectivamente, ou de outras matérias primas sintéticas, como a alumina para a criação de alumina eletrofundida branca. Esses produtos são feitos pelo setor industrial de transformação.

Para se obter grãos eletrofundidos é necessário, como o próprio nome indica, fundir a matéria prima em um forno de arco elétrico, exemplos desse tipo de forno que são utilizados na indústria são o forno Higgins e o forno inclinado. O forno de arco elétrico funciona inserindo eletrodos operando na faixa de 10 MW a 100 MW de potência no minério, gerando uma corrente elétrica que aquece o minério até o ponto de fusão, o produto desejado é mais pesado que a escória, por isso ele afunda e é extraído do fundo do forno. Esse forno também é usado na reciclagem de aço, que segundo a Gerdau (2021), por não precisar de queima de carvão, para cada tonelada de aço reciclado 1,5 toneladas de CO₂ deixam de ser emitidas. O nome arco elétrico é proveniente do fato de quando os eletrodos entram em contato com a escória a corrente elétrica criada forma um arco entre eles (BOULET; LALLI; AJERSCH, 2003).

3.1 EMPRESAS DO SETOR

A Treibacher Schleifmittel Brasil é uma empresa líder de mercado na produção de grãos eletrofundidos pertencente ao grupo austríaco Treibacher, presente em 9 países, que por sua vez atualmente pertence ao grupo francês Imerys, antiga Imetal, desde 2000, a sua sede se encontra na cidade de Salto no estado de São Paulo, foi adquirida em 2002 da Alcoa Alumínio S.A. pela Treibacher Schleifmittel e atualmente produz 60000 toneladas de grãos eletrofundidos por ano (TREIBACHER, 2021).

A empresa Elfusa, que atua no mesmo ramo que a Treibacher, foi criada em 1961 em São João da Boa Vista, SP, e adquirida pelo Grupo Curimbaba em 1976, é especializada na produção de grãos eletrofundidos. Apesar de ter seu maior mercado como o doméstico, também exporta por volta de 20 % da sua produção.

A Elfusa e as outras 6 empresas do grupo no Brasil, como a Alcace Transportes, empregam 2000 pessoas diretamente e é estimado que sejam responsáveis pela geração de no mínimo 5000 empregos indiretos (ELFUSA, 2021).

3.2 CERÂMICAS

As cerâmicas podem ser divididas em 2 grupos de acordo com a origem do material: tradicional e avançada. A cerâmica tradicional, também conhecida como natural, é aquela em que o material pode ser encontrado na natureza como a argila, já a avançada, também conhecida como sintética, é aquela que necessita que o material seja produzido artificialmente para se obter a cerâmica desejada como a alumina, o silicato de carbono e a magnésia. A Figura 2 apresenta uma ilustração de cerâmica comercialmente vendida (ZORZI, 2001).

Figura 2 – Exemplo de cerâmica.



Fonte: AECweb (2021).

Durante a fabricação de uma cerâmica é necessário que haja um alto controle do processo, já que características do produto final afetam as suas propriedades.

Um exemplo disso é a porosidade na cerâmica, que afeta não somente as suas características mecânicas, mas também térmicas se, por exemplo, uma cerâmica tiver vários poros fechados a sua capacidade como isolante aumenta, porém ao mesmo tempo sua resistência a cargas é menor do que uma peça de mesmo material com menos poros. Essa característica pode ser controlada no processo de fabricação de modo a maximizar a eficiência do produto para a aplicação desejada (SOUSA, 2014).

3.3 ABRASIVOS

Os abrasivos são materiais com a finalidade de desbastar ou polir outro material, para isso 3 características são fundamentais para a escolha do abrasivo para determinada aplicação:

- Dureza: influencia a eficiência do abrasivo de desgastar outro material.

- Tenacidade: quanto um abrasivo pode suportar impactos e tensões mecânicas sem se romper.
- Friabilidade: quão fácil é para o abrasivo se romper e criar novas superfícies de corte diminuindo a geração de calor (MONTAGNA, 2021).

Com relação a dureza para que o abrasivo tenha uma boa eficiência é necessário que sua dureza seja no mínimo igual a 1,25 vezes a dureza do material a ser desgastado. A Figura 3 apresenta alguns exemplos de abrasivos que são comercialmente vendidos (TORRANCE, 2005).

Figura 3 – Exemplos de abrasivos.



Fonte: Galvaminas (2021).

Desgaste abrasivo, ou abrasão, ocorre quando dois corpos se atritam, o desgaste causa arrancamento nos materiais, este desgaste é dependente da relação entre as durezas dos materiais até certo ponto, quanto maior a razão entre a dureza do abrasivo com a do material a ser desgastado mais facilmente o desgaste ocorre. Existem diversas maneiras de prevenir que este desgaste ocorra em situações indesejadas, como por exemplo, revestir o produto com uma camada de um material mais duro e reprojetar a peça para que esta não tenha contatos desnecessários com outros elementos ou com o uso de lubrificantes para diminuir o atrito (KHRUSCHOV, 1974).

Além da dureza dos materiais, o desgaste abrasivo pode ser controlado a partir do controle de outras características do abrasivo e do material a ser desgastado como o tamanho do grão do abrasivo, a ductilidade da peça, a tenacidade à fratura e o ângulo de ataque do grão.

O tamanho do grão afeta a taxa de abrasão de forma que quanto maior o tamanho, maior é a taxa até certo ponto denominado dimensão crítica do grão, em que se observa que acima dessa dimensão o tamanho da partícula não aparenta afetar o coeficiente de abrasão, essa dimensão é determinada pelas durezas dos materiais envolvidos. O tamanho do grão, junto com a força também afeta a deformação plástica que ocorre na abrasão. O tamanho de

partículas de uma camada protetora também afeta o coeficiente, porém indiretamente, já que no caso o que aumenta a resistência à abrasão é o caminho livre médio das partículas da camada protetora (DEUIS; SUBRAMANIAN; YELLUP, 1996).

Existem outras características que afetam a abrasão, como por exemplo, a ductilidade do material a ser desgastado também influencia o seu desgaste, quanto menor a sua ductilidade maior à abrasão gerada (TORRANCE, 2005).

Outra propriedade que afeta o coeficiente de abrasão é a tenacidade à fratura do material que está sendo desgastado, quando a tenacidade à fratura aumenta a resistência a abrasão também aumenta até atingir a tenacidade à fratura de 14 MPa/m², a partir deste ponto a tenacidade à fratura deixa de ser um fator importante para a resistência ao desgaste (ZUM GAHR, 1988).

3.4 REFRATÁRIOS

Refratários são materiais estáveis e resistentes ao desgaste provocado por uma variedade de situações de cunho térmico, mecânico ou químico. Esses materiais são classificados como materiais cerâmicos que possuem a característica de serem estruturalmente estáveis em condições de altíssimas temperaturas. A Figura 4 apresenta exemplos de refratários.

Figura 4 – Exemplos de refratários.



Fonte: Refratil (2021).

Uma aplicação de produtos refratários é na construção de fornalhas para que estas não sejam desgastadas ou deformadas pelas altas temperaturas, este último foi a primeira aplicação de refratários que por volta de 3000 AC foi utilizado o próprio solo para se produzir utensílios. Os refratários começaram a ser usados de forma similar a atual na Idade do Ferro

em 2000 AC quando foram feitos fornos com refratários primitivos para reter o calor e ajudar a fundir o ferro, mas sua tecnologia só começou a avançar rapidamente na Primeira Revolução Industrial (COTTA; RODRIGUES, 2014; TFL, 2018).

A partir do século XX os refratários deixaram de ser exclusivamente feitos a partir de metais. Primeiro com os refratários ácidos a base de sílica e posteriormente os básicos a base de magnésio e os a base de carbono. A cada novo modelo de fornalha e material de base para os refratários as temperaturas dessas fornalhas aumentavam. Os primeiros refratários sintéticos surgiram devido a importância financeira de *Oxygen Blowing* que impulsionou novas pesquisas. Os grãos eletrofundidos começaram a ser criados no início dos anos 1900s. Os refratários sintéticos não substituem os naturais devido a seu preço mais elevado e por não serem recomendados para todas as aplicações, muitas vezes sendo recomendada uma mistura de produtos sintéticos e naturais (CANIGLIA; BARNA, 1992).

Como os refratários são cerâmicas, existe sempre o risco de suas características sofrerem alterações como o tamanho do grão, o formato deste, a composição, a densidade e a porosidade, características que afetam todas as suas propriedades. Isso pode causar problemas que ocorrem somente em serviço quando são aquecidas em altas temperaturas (no caso dos refratários não queimados). Quando esses problemas ocorrem, mesmo que em uma unidade, podem prejudicar toda a integridade da infraestrutura de refratários montada. Por isso seus processos de fabricação devem seguir normas estritas em todas as suas etapas (CANIGLIA; BARNA, 1992).

Essas propriedades que podem ser afetadas por esses defeitos podem ser divididas em 4 categorias: físicas, térmicas, químicas e cerâmicas. Essas propriedades afetam as aplicações em que cada refratário é recomendado.

As propriedades físicas podem ser separadas em três categorias: densidade e porosidade, resistência mecânica tanto em altas temperaturas quanto em temperatura ambiente e resistência à abrasão. Estas determinam o comportamento do refratário quando este estiver submetido às forças mecânicas externas.

Existem 4 propriedades térmicas: expansão térmica, choque térmico, condutividade térmica, difusividade térmica. Estas propriedades indicam como o refratário reage a mudanças de temperatura e como o calor se propaga dentro do refratário ou em contato com este.

A característica química mais importante para um refratário é a sua resistência à corrosão, que é influenciada principalmente pela sua composição química. Dependendo da composição química o refratário pode ser resistente a certos tipos de ambientes corrosivos e suscetível a outros.

As propriedades cerâmicas ditam como a composição do refratário reage a altas temperaturas, (SCHACHT, 2004).

Devido às diferentes propriedades, cada aplicação exige refratários diferentes, por exemplo, para se produzir alumínio o tanque em que acontecem as reações é feito de refratários óxidos, em motores usam-se zirconia ou nitreto de silício, cromo é usado para impedir que as superligas sejam aquecidas demasiadamente em aeronaves turbojato, reatores nucleares utilizam grafite, óxido de urânio e carbonetos para conter o calor (Surendranathan, 2015).

Em alguns casos é possível que o refratário tenha alguma característica prejudicial ao seu desempenho. Um método utilizado para solucionar esse problema é adicionar pequenas quantidades de elementos ou misturas (aditivos) em um refratário, como por exemplo, adicionar SiC em um refratário de MgO-C para aumentar a sua resistência à corrosão e reduzir a oxidação do carbono ou aditivos baseados em boro para impedir que a oxidação cause a formação de líquido nos poros do refratário (ZHANG; LEE, 2001).

Para facilitar a identificação dos refratários recomendados para cada aplicação os refratários possuem diferentes classificações. Essas classificações podem levar em consideração a composição, o seu formato, entre outros.

Existem 4 classificações diferentes de refratários com base na composição: refratário de argila, de sílica, básico, especial. Os refratários de argila são cerâmicas compostas de sílica e por volta de 25% a 45% de alumina, a porcentagem de alumina está diretamente relacionada com a temperatura de fusão do material, geralmente são aplicados para isolamento térmico. Os refratários de sílica, como o próprio nome indica, são à base de sílica, também são chamados de refratários ácidos. Ao contrário dos refratários de argila, aumentar a porcentagem de alumina diminui sua a temperatura de fusão, por isso a sua porcentagem deve ficar entre 0,2% e 1%, os refratários de sílica são aplicados para conter escórias ricas em sílica e suportar cargas em altas temperaturas.

Refratários básicos são compostos principalmente por magnésio e não devem conter sílica por diminuir sua usabilidade em altas temperaturas, ao contrário de refratários de sílica os básicos são ótimos para conter escórias ricas em magnésio e óxido de cálcio. Por último os refratários especiais são aqueles utilizados para situações específicas a Magnesita, alumina e o carbetto de silício se encontram neste grupo (CALLISTER, 2012).

Refratários podem ser divididos em modelados ou sem forma, refratários sem forma ou monolíticos como o próprio nome implica não tem forma definida como tijolo, por exemplo, começaram a ser usados em 1914. Eles podem ser divididos em 5 classificações de acordo

com a sua função: refratários concretos que são utilizados para isolamento, materiais de jateamento refratários que como o próprio nome indica são usados para jateamento, materiais refratários maleáveis os mais antigos dos refratários sem forma, materiais refratários de junta são utilizados para juntar tijolos, blocos ou isolantes e outros refratários que não encaixam nas classificações anteriores. Cada uma dessas classificações pode ser subdividida de acordo com o tipo de material usado (Surendranathan, 2015).

3.5 ALUMINA

A alumina, também conhecida como óxido de alumínio, pode ser encontrada com várias formas cristalinas, porém a mais usada na indústria de eletrofusão é $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ por ser mais estável em altas temperaturas. Normalmente a alumina é extraída da bauxita através de um processo chamado Bayer que foi inventado por Karl Josef Bayer em 1887 (PAWLOWSKI; BLANCHART, 2018).

Alguns exemplos de outras formas, ou fases, cristalinas, que são utilizadas para outras aplicações, são as fases γ e β . γ -alumina é uma fase de transição da alumina que ocorre quando se aquece boehmita, um tipo de bauxita, a temperaturas superiores a 450°C. É utilizada como catalisador por causa de sua área de superfície grande, sua estrutura estável e as suas características de superfície (DEY, 2014).

β -alumina é uma fase da alumina é um dos materiais mais utilizados como eletrólito sólido devido às suas propriedades elétricas como a sua condutividade elétrica (LU *et al*, 2010).

3.5.1 Bauxita

A bauxita pode ser encontrada em 3 tipos de minerais: gibbsita, boehmita e diásporo. A densidade da bauxita depende do tipo que ela é composta, de 3,15 a 3,22 g/cm³ quando é composta principalmente de gibbsita a mais de 3,50 g/cm³ quando é composta principalmente por diásporo (BANERJEE, 1998).

A Tabela 1 a seguir mostra a composição química de diferentes tipos de minerais de bauxita. Perda na ignição são as impurezas que evaporam quando o mineral é aquecido a altas temperaturas, como por exemplo, partículas de água que ficam presas nos espaços vazios (VEREŞ, 2002).

Tabela 1 - Composição química de tipos de minerais de bauxita.

Composição (%)	Boehmita	Gibbsita	Diásporo
Al_2O_3	58,1	60,1	72,3
SiO_2	2,10	4,1	7,15
Fe_2O_3	25,0	2,82	2,60
TiO_2	2,67	2,65	3,22
CaO	0,10	0,10	0,20
MgO	0,10	0,20	0,20
Perda na ignição	11,8	22,9	14,3

Fonte: Banerjee (1998).

Segundo o US GEOLOGICAL SURVEY & ORIENTEERING S (2021), uma agência americana responsável por estudar e analisar as condições geológicas dos Estados Unidos, os recursos de obtenção de bauxita se concentram na África com 32%, Oceania com 23%, América do Sul e Caribe com 21% e Ásia com 18% de um total de 55 a 75 bilhões de toneladas. Os países com a maior quantidade de mineração de bauxita em toneladas em 2020 são a Austrália com 110 milhões, a Guiné com 82 milhões, a China com 60 milhões e o Brasil com 35 milhões, sendo que 79% de toda bauxita minerada foi transformada em alumina. Já na produção de alumina os maiores produtores em 2020 são China com 74 milhões de toneladas, a Austrália com 21 milhões, o Brasil com 9,6 milhões e a Índia com 6,7 milhões, sendo que a produção mundial no mesmo ano foi de 136 milhões de toneladas.

3.5.2 Processo Bayer

O processo Bayer consiste em colocar bauxita triturada em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), também conhecido como soda cáustica, em um tanque pressurizado com temperaturas variando entre de 140°C e 280°C dependendo de sua composição, que dissolve o óxido de alumínio presente na bauxita demonstrada pelas equações (48) e (49), em um processo chamado de digestão, também dependendo da composição, em uma solução de aluminato de sódio e impurezas sólidas, chamada no ramo de lama vermelha (*red mud*), esse nome vem da cor dessa solução que é causada pelo óxido de ferro (Fe_2O_3), uma das impurezas

com presença significativa na bauxita, outras impurezas incluem dióxido de silício (SiO_2) e dióxido de titânio (TiO_2).

As impurezas são removidas por um processo de sedimentação, são retiradas do fundo do tanque e filtradas para recuperar parte da soda cáustica para ser reutilizada. A seguir a solução é resfriada para que o hidróxido de alumínio (Al(OH)_3) precipite em formato de cristais, ilustrado pela equação (50), retornando a composição química original, esses cristais passam por um processo de calcinação em temperaturas em torno de 1100°C para retirar as moléculas de água dentro do hidróxido de alumínio para se obter o óxido de alumínio, demonstrado pela equação (51).

A Tabela 2 demonstra algumas das características do produto final do Processo Bayer. Esse processo exige de 1.9 a 3.6 toneladas de bauxita e produz 2 toneladas de lama vermelha para cada tonelada de alumina produzida, a Figura 5 ilustra as etapas do processo Bayer (HIND; BARGANHAVA; GROCOTT, 1999; INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2021).

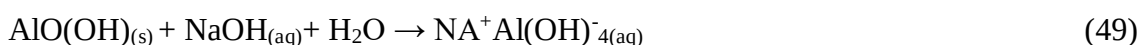
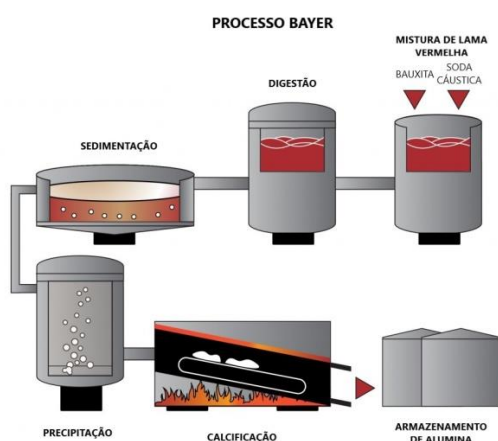


Figura 5 – Processo Bayer.



Fonte: Adaptado de PLA (2021).

Tabela 2 - Características da α -alumina sinterizada a 20°C .

Característica	Valor
Densidade (g/cm ³)	3,984 ± 0,002
Módulo de elasticidade (GPa)	416 ± 30
Dureza Vickers 1kg (GPa)	15 ± 2
Módulo de cisalhamento (GPa)	169 ± 1
Tenacidade à fratura (MPa/m ²)	3,5 ± 0,5
Condutividade térmica (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	33 ± 2
Ponto de fusão (°C)	2050 ± 4

Fonte: Munro (1997).

3.5.3 Eletrofusão

Após a alumina passar pelo processo Bayer, para se obter alumina eletrofundida funde-se a alumina ou a bauxita, no caso da alumina eletrofundida marrom é possível utilizar a bauxita sem a necessidade do processo Bayer, utilizando fornos elétricos com temperaturas iguais ou superiores a 2000°C, depois a alumina é moída para se tornar um pó que é utilizado em várias aplicações como abrasivos, refratários, isolantes elétricos e molda para fundições em altas temperaturas. Sua variedade de aplicações é devido às suas propriedades de alta resistência elétrica, alta dureza, alto ponto de fusão, alta resistência à corrosão e alta resistência de desgaste mecânico, além de ser quimicamente estável em altas temperaturas (IMERYS, 2021).

Para este estudo de caso, os grãos eletrofundidos principais são as aluminas fundidas marrom e branca, em que a diferença mais característica entre elas e a causa das cores diferentes está na sua composição química, essa diferença pode ser observada nas Figuras 6 e 7. A branca possui 99.5% de Al₂O₃ enquanto que a marrom possui 97% de Al₂O₃, essa diferença de composição influencia a aplicação dos grãos como, por exemplo, para moldes de fundição a alumina fundida usada geralmente é a branca, a Tabela 3 compara os dois ALOs, já as Tabelas 4 e 5 apresentam as composições químicas e propriedades do ALO branco e marrom respectivamente (TREIBACHER, 2021).

Figura 6 – Alumina eletrofundida branca.



Fonte: YUFA (2021).

Figura 7 – Alumina eletrofundida marrom.



Fonte: Topway (2021).

Tabela 3 – Comparação do ALO branco com o marrom.

Característica	ALO Branco	ALO Marrom
Dureza (mohs)	9	9
Friabilidade (%)	62	59
Temperatura máxima de uso (°C)	1900	1900
Temperatura de decomposição (°C)	2250	2250
Matéria prima	Alumina	Bauxita
Densidade aparente (g/cm ³)	1,75-1,95	1,53-1,99
Densidade real (g/cm ³)	3,95-3,97	3,90
Porosidade aparente (%)	7,8	-

Fonte: Elfusa (2021), Runlong (2020) e Banerjee (1998).

Tabela 4 - Composição química do ALO branco.

Característica	Valor
Porosidade aparente (%)	7,8
Composição (%)	-
Al ₂ O ₃	99,64
SiO ₂	0,06
TiO ₂	0,00
Fe ₂ O ₃	0,03
CaO	0,03
MgO	0,07
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,02

Fonte: Banerjee (1998).

Tabela 5 - Composição química de diferentes tipos de alumina eletrofundida marrom.

Composição (%)	I	II	III	IV
Al ₂ O ₃	94,3	96,3	97,8	97,2
SiO ₂	1,1	0,56	0,49	0,54
TiO ₂	2,45	2,66	1,22	1,63
Fe ₂ O ₃	1,5	0,1	0,23	0,29

Fonte: Banerjee (1998).

3.6 MAGNÉSIA

A fabricação de magnésia eletrofundida começa aquecendo a Magnesita natural (MgCO₃) a uma temperatura entre 700°C e 1000°C, nessa faixa de temperatura o dióxido de carbono (CO₂) se desassocia do MgCO₃ transformando a magnesita em magnésia cáustica (MgO), ilustrado pela equação (52). Nesse ponto, caso a temperatura for aumentada para uma faixa de 1750°C a 2200°C é produzida magnésia queimada a morte, um produto com alta dureza e estável.

Após esse processo a magnésia cáustica ou a Magnesita de alta pureza é aquecida em um forno de arco elétrico para ser fundida a temperaturas superiores a 2750°C para que a precipitação de cristais chamados de periclásicos ocorra. Esses cristais compõem a magnésia eletrofundida. A Magnesita eletrofundida é usada como refratário e isolante elétrico (ABCERAM, 2021; AZO, 2021).



Os maiores detentores de reservas de Magnesita no mundo são a China com 28,8%, a Coreia do Norte com 21,6%, a Rússia com 21% e o Brasil com 5,2% de 3480 milhões de toneladas. No Brasil as reservas estão localizadas nos estados da Bahia e do Ceará. A Magnesita não é a única matéria prima disponível para se obter a magnésia, também são utilizados a água do mar e a salmoura (POSSA; DAMASCENO, 1997).

Além da Magnesita, também é possível fabricar magnésia a partir da água do mar, devido ao fato do magnésio ser o seu terceiro elemento mais abundante com 1294 partículas por milhão (ppm), o primeiro e segundo elementos são o cloro com 19353 ppm e o sódio com 10760 ppm respectivamente. Isso permite que a extração de magnésio a partir desta fonte seja economicamente viável (SHAND, 2006).

O óxido de magnésio, ilustrado na Figura 8, possui as seguintes propriedades físico-químicas: uma estrutura cúbica que intercala os átomos de magnésio (Mg^{2+}) e oxigênio (O^{2-}) devido às suas respectivas cargas. Com uma condutividade térmica de 0,10 cal/(s.°C.cm) ou 41,867 W/(m.K). Sua resistência elétrica é de $9 \cdot 10^7$ ohms em 900°C diminuindo conforme a temperatura aumenta, seu ponto de fusão é de 2800°C e sua dureza é de 5,5 Mohs. Em comparação, a estrutura da Magnesita é hexagonal com dureza entre 3,5 e 4,5 Mohs e começa a liberar CO_2 por volta de 900°C. As propriedades mecânicas do óxido de magnésio seguem na Tabela 6 (SHAND, 2006).

Figura 8 – Magnésia eletrofundida.



Fonte: Tateho (2021).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do óxido de magnésio.

Propriedade mecânica	Valor (GPa)
Módulo elástico (E)	210-317
Módulo de ruptura (σ)	96,5-103,4
Resistência à tração (σ)	95,8
Módulo de cisalhamento (G)	75,8-131
Resistência à flexão (σ)	89,6
Resistência à compressão (σ)	0,83-1,44

Fonte: Shand (2006).

3.7 CARBETO DE SILÍCIO

Para a produção de carbetos de silício (SiC), ilustrado na Figura 9, inicialmente mistura-se areia de sílica (SiO₂) com 99,5 % de pureza com coque dentro de um forno de arco elétrico com eletrodos nos cantos do forno, para que seja aquecida a uma temperatura em torno de 2200°C, propiciando a reação ilustrada pela equação (53) e produzindo o carbetos de silício em formato de lingote.

Figura 9 – Carbetos de silício.

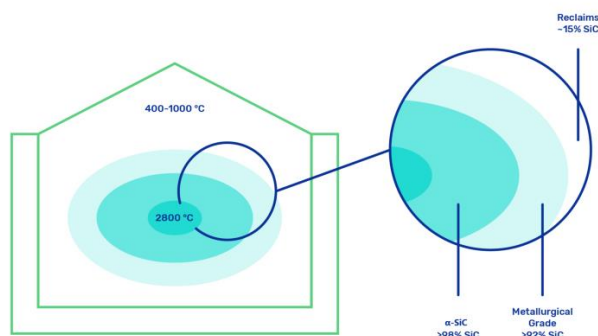


Fonte: Castro Composites (2021).

Esse processo, chamado de processo Acheson, cria diferentes tipos de carbetos de silício com diferentes cores dependendo da posição dos grãos de sílica no forno, sendo eles verde claro com 99,8% de pureza, verde escuro com 99% e preto com 98,5%, também classificados como α -SiC, além de grãos com menor pureza localizados fora do núcleo do forno,

classificados como β -SiC, e grãos de sílica que não reagiram com o coque nas extremidades do forno, estes são reutilizados na próxima leva, esse resultado é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Resultado forno Acheson.



Fonte: Adaptado de FIVEN (2021).

Os grãos de pureza elevada são usados para aplicações eletrônicas enquanto os de baixa pureza são usados como abrasivos devido às propriedades do carbetto de silício como um dos materiais mais duros de que se tem conhecimento, além de ter alta resistência a corrosão e a altas temperaturas (CARTER; NORTON, 2007; FIVEN, 2021).



No processo Acheson teoricamente são utilizados 15 toneladas de dióxido de silício e 9 toneladas de carbono para cada 10 toneladas de carbetto de silício, sendo produzidos também 14 toneladas de monóxido de carbono como subproduto. Todavia, na prática maiores quantidades dos reagentes são necessárias por causa de perdas causadas pelo fato de parte do coque utilizado reagir com o ar ao invés do silício, por grãos perdidos no transporte dos materiais para o forno, e pelas impurezas dos materiais que não são levados em conta na teoria (SILVA, 2015).

O processo Acheson é feito utilizando um forno elétrico desenvolvido especificamente para ele chamado de Forno Acheson, um forno com um formato retangular onde os eletrodos estão localizados nas extremidades do forno, ao contrário de outros fornos em que os eletrodos são encontrados no topo do forno, normalmente feitos com um conjunto de 3 a 5 fornos para que tenha sempre pelo menos um forno em operação de modo a manter a produção constante. Cada forno consome em torno de 7 a 12 MWh/tonelada, porém a maior parte da energia é gasta em perdas térmicas (SILVA, 2015; WEIMER, 1997).

Edward G. Acheson, criou o forno que leva o seu nome logo após criar SiC em um experimento em 1892 sendo o primeiro a enxergar o valor comercial do material mesmo este sendo encontrado naturalmente e sendo criado em pequenas quantidades em laboratório por outros pesquisadores antes de seu experimento. O design central do forno é o mesmo desde sua criação até os dias de hoje, sendo que as maiores mudanças foram o aumento do tamanho dos fornos e da sua eficiência elétrica (WEIMER, 1997).

O carbetto de silício é um dos poucos compostos que possui variações estáveis de empilhamento nas estruturas cristalinas unidimensionais, chamados de politipos, cada uma dessas estruturas diferentes pode modificar as propriedades do material (BECHSTEDT *et al*, 1997).

Alguns exemplos de modificações de propriedades devido aos politipos são a densidade que varia de 3,166 g/cm³ com o politipo 3C para 3,249 g/cm³ com 6H, a condutividade térmica que pode variar de 2,31 W/cmK com 6H para 3,7 W/cmK com 4H sendo que esta propriedade também pode variar com a concentração de outros materiais como o nitrogênio e o alumínio que quando não estão presentes a condutividade do politipo 6H aumenta para 4,9 W/cmK (HARRIS, 1995).

O carbetto de silício também é usado como um semicondutor desde 1907 quando esta aplicação foi descoberta pela companhia Marconi. Porém o interesse pelo avanço tecnológico do carbetto de silício não foi constante durante a história, tendo períodos em que não havia muitas pesquisas sobre o material (HARRIS, 1995).

O maior desses períodos de desinteresse pelo material foi durante as décadas de 1960 e 1970 que terminou no final dos anos 1970 com novas descobertas sobre o crescimento dos grãos cristalinos do carbetto de silício (SADDOW; AGARWAL, 2004).

O carbetto de silício normalmente é encontrado com uma estrutura de camada dupla hexagonal em que uma face é composta pelos átomos de silício e a outra pelos átomos de carbono. Cada átomo de um elemento se conecta com 4 átomos do outro, 1 átomo por conexão primária, os outros 3 por conexões secundárias, quando ele possui esse tipo de estrutura é chamado de α -SiC. Devido ao fato do SiC possuir diversos politipos, a organização dessa estrutura pode variar porém normalmente mantendo-se hexagonal. Todavia também é possível encontrá-lo com uma estrutura cristalina cúbica, nesse caso é chamado de β -SiC (STARKE, 2013).

4 MODELAGEM E RESULTADOS

O problema resolvido neste trabalho representa o cenário de uma linha de produção (máquina única), que possui uma capacidade máxima de produção de cada produto por período (1 dia útil de trabalho) em um horizonte de planejamento de 1 mês (considerando 22 dias úteis).

Assume-se que os valores dos parâmetros, como a demanda e a capacidade, são conhecidos antes do início do horizonte de planejamento.

O objetivo é atender a demanda o mais rápido possível, sendo permitido, quando possível, antecipar a produção.

A capacidade de produção de cada produto em cada período é invariável ao longo do horizonte de programação, entretanto, a demanda, que consiste em pedidos antecipados de produtos, também conhecidos como pedidos em carteira, está distribuída ao longo dos períodos em quantidades variadas.

A demanda na empresa pode ser separada em produtos de demanda independente (também chamada de demanda de itens independentes) e de demanda dependente (também chamada de demanda de faixas). As faixas são misturas de produtos de demanda independente, como exemplificado na Tabela 7, que mostra as diferentes porcentagens de produtos que compõem diferentes faixas.

As faixas são produzidas em um único estágio, ou seja, não é necessário produzir os produtos como independentes em um primeiro momento e depois misturá-los. Todo o processo é feito ao mesmo tempo.

Tempos de **setup** da linha de produção e custos de estocagem não foram considerados.

Tabela 7 - Exemplos de composição de faixas.

FAIXAS	Produtos (%)					
	8	10	12	14	16	20
6_10	58,54	41,46	0	0	0	0
7_18	0	30,94	23,78	26,30	18,98	0
10_20	0	0	25,61	28,33	20,44	25,61
12_16	30,41	21,53	16,55	18,30	13,21	0
16_30	0	0	0	0	44,38	55,62

Fonte: Autor.

A capacidade de produção diária de cada produto é proporcional à capacidade de produção total. Cada produto tem uma proporção diferente. Por exemplo, para uma capacidade total de 10.000 kg, o produto 8 possui uma proporção de 11,10% de 10.000 kg o que torna a sua produção diária em 1.110 kg; já o produto 10 tem uma proporção de 7,86% o que torna a sua produção máxima em 786 kg. Caso a capacidade total seja cortada pela metade (a máquina só opera por meio período, por exemplo) a capacidade de produção do item 8 se torna 555 kg, mantendo a mesma proporção.

Haverá uma concorrência por essa produção entre a demanda de itens independentes e a demanda dependente, ou seja, a quantidade produzida do produto será dividida para atender tanto a demanda pelo item único, como a demanda das faixas, em que o item faz parte da composição.

Trata-se, portanto, de um problema combinatório para escolher o melhor destino da produção. A Tabela 8 exemplifica essa quantidade máxima de produção diária assumindo uma capacidade total de 10.000 kg.

Tabela 8 - Exemplos da proporção de produção por produto com uma capacidade de produção total de 10.000 kg.

Produtos	Proporção (%)	Produção máxima (kg)
8	11,10	1.110
10	7,86	786
12	6,04	604
14	6,68	668
16	4,82	482

Fonte: Autor.

4.1 Modelo Algébrico

O modelo apresentado neste trabalho tem como objetivo auxiliar no processo de tomada de decisão, diminuindo o atraso na entrega dos produtos. O modelo realiza uma combinação dos itens produzidos, de maneira a atender a demanda independente dos produtos e a demanda dependente das faixas.

Para cumprir o objetivo do modelo, a Função Objetivo foi construída como a soma acumulativa das faltas dos itens e das faixas, desde o início do horizonte de planejamento até

o período em questão. A falta do item ou da faixa é contabilizada no final de cada período pela diferença da demanda acumulada e a quantidade de produção acumulada.

Como exemplo, se uma demanda de 500 kg, no período 1, for executada apenas no período 5, haverá um acúmulo de 500 kg por período na Função Objetivo que deve ser minimizada, ou seja, no final haverá 2.000 kg na Função Objetivo, sendo que só existiu uma demanda de 500 kg no período 1. O exemplo é ilustrado na Tabela 9, enquanto a Tabela 10 representa um caso em que a demanda foi satisfeita, de maneira diferente, para demonstrar como o tempo necessário para satisfazer a demanda influencia o resultado da Função Objetivo.

Tabela 9 - Caso 1: demanda satisfeita integralmente apenas no período 5.

	Períodos				
	1	2	3	4	5
(F.O. Min Z) Z=	500	1000	1500	2000	2000
Falta Real	500	500	500	500	0
Produção	0	0	0	0	500
Demanda	500	0	0	0	0

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Caso 2: demanda satisfeita ao longo dos períodos 2 e 3.

	Períodos				
	1	2	3	4	5
(F.O. Min Z) Z=	500	750	750	750	750
Falta Real	500	250	0	0	0
Produção	0	250	250	0	0
Demanda	500	0	0	0	0

Fonte: Autor.

Formulação matemática:

Índices:

i = item $\{1, \dots, I\}$;

t = período $\{1, \dots, T\}$;

$f = \text{faixa } \{1, \dots, F\};$

Variáveis:

L_{it} = falta do item i no período t ;

E_{it} = excesso do item i no período t ;

LF_{ft} = falta da faixa f no período t ;

EF_{ft} = excesso da faixa f no período t ;

Parâmetros:

x_{it} = quantidade produzida do item i no período t ;

y_{ft} = quantidade produzida da faixa f no período t ;

D_{it} = demanda do item i no período t ;

DF_{ft} = demanda da faixa f no período t ;

T = horizonte de planejamento (dividido em períodos t);

I = quantidade total de itens;

F = quantidade total de faixas;

P_i = proporção de produção do item i em CP;

CP = capacidade total de produção por período;

A_{if} = proporção do item i na faixa f ;

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T L_{it} + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T LF_{ft} \quad (54)$$

s.a.

$$\sum_{t'=1}^t x_{it'} + L_{it} - E_{it} = \sum_{t'=1}^t D_{it'} \quad \forall i, t \quad (55)$$

$$\sum_{t'=1}^t y_{ft'} + LF_{ft} - EF_{ft} = \sum_{t'=1}^t DF_{ft'} \quad \forall f, t \quad (56)$$

$$x_{it} + \sum_{f=1}^F (y_{ft} * A_{if}) \leq P_i * CP \quad \forall i, f, t \quad (57)$$

$$x_{it}, L_{it}, E_{it}, LF_{ft}, EF_{ft}, y_{ft} \geq 0 \quad \forall i, f, t \quad (58)$$

A Função Objetivo (54) procura minimizar a soma acumulada das faltas dos itens e das faixas, assim diminuindo os atrasos.

Nas restrições em (55) são registradas a Falta e o Excesso (carregados) de cada item de demanda independente em cada período segundo a demanda em carteira. Para isso utiliza-se o índice t' (assim a demanda do produto desde o início do horizonte de planejamento até o período t é igual à produção desde o início até o período t , uma vez que as variáveis de falta e de excesso balanceiam a equação). Nota-se que em cada período apenas uma das variáveis de falta e excesso poderá assumir valor positivo.

As restrições em (56) realizam o mesmo balanceamento das restrições em (55), desta vez considerando apenas os itens de demanda dependente (faixas).

Em (57), as restrições impõem que a quantidade alocada de cada item por período para as demandas dependente e independente, não ultrapassar a quantidade produzida. Cabe salientar que no caso das faixas, é calculada a proporção utilizada do produto.

Por último, as restrições em (58) determinam que as variáveis utilizadas no modelo sejam não negativas.

O modelo poderia ser modificado, de modo que, além de minimizar a falta, também poderia ter como objetivo minimizar o excesso de estoque em determinado período alterando a função objetivo (54) para o exemplo em (59).

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T L_{it} + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T LF_{ft} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T E_{it} + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T EF_{ft} \quad (59)$$

Ainda em (59) pode-se utilizar um parâmetro para controlar o peso do excesso gerado dos itens e faixas no objetivo.

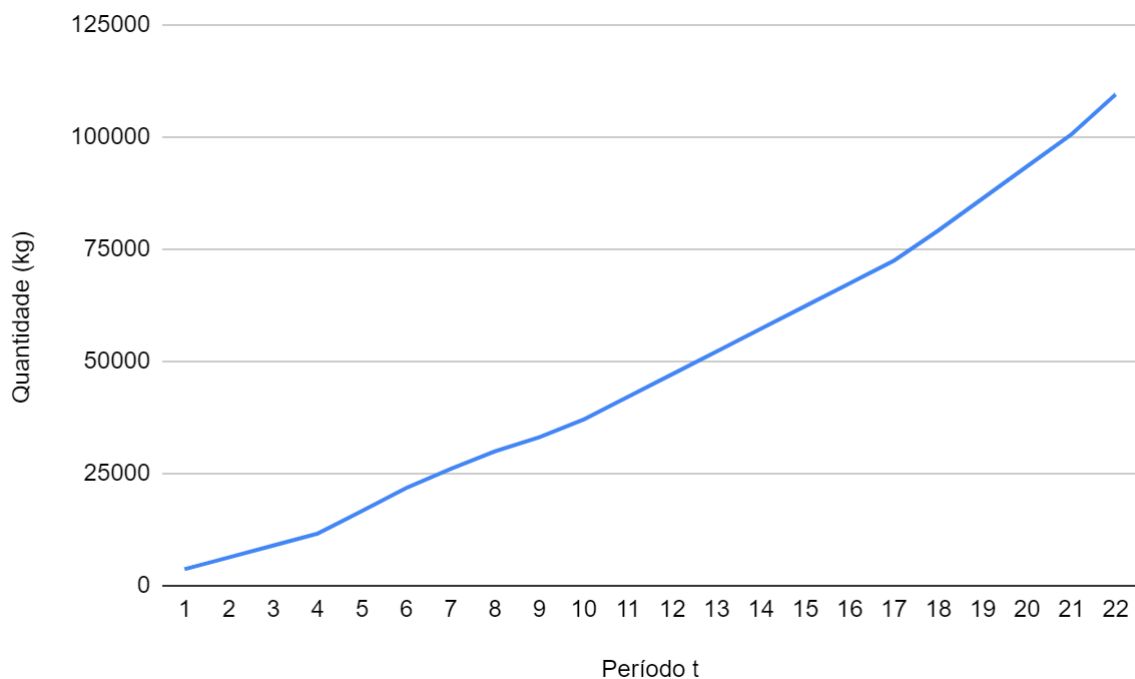
4.2 RESULTADOS

Utilizando-se de um computador I7, com 8GB de memória RAM, consegue-se o resultado do processamento em 0,35 segundos, onde a Função Objetivo totaliza 515.120,468 kg e a demanda total, dentro do horizonte de planejamento, alcança o valor de 124.000 kg. São 106.000 kg de demanda de faixas e 18.000 kg de demanda de produtos avulsos, distribuídas ao longo do horizonte de planejamento. A capacidade de produção total, utilizada

para obter os resultados, foi de 10.000 kg por período, dividida entre os produtos de acordo com a sua proporção fixada para produção (CP).

Foi observado que mesmo quando não existe demanda para um determinado produto o sistema produz a maior quantidade possível do produto, o excesso desnecessário é produzido na forma de produtos independentes, por isso, o Gráfico 1 demonstra que o excesso dos itens de demanda independente aumenta de maneira consistente. Também é importante lembrar que cada item tem a sua produção já determinada, independentemente da produção dos outros itens.

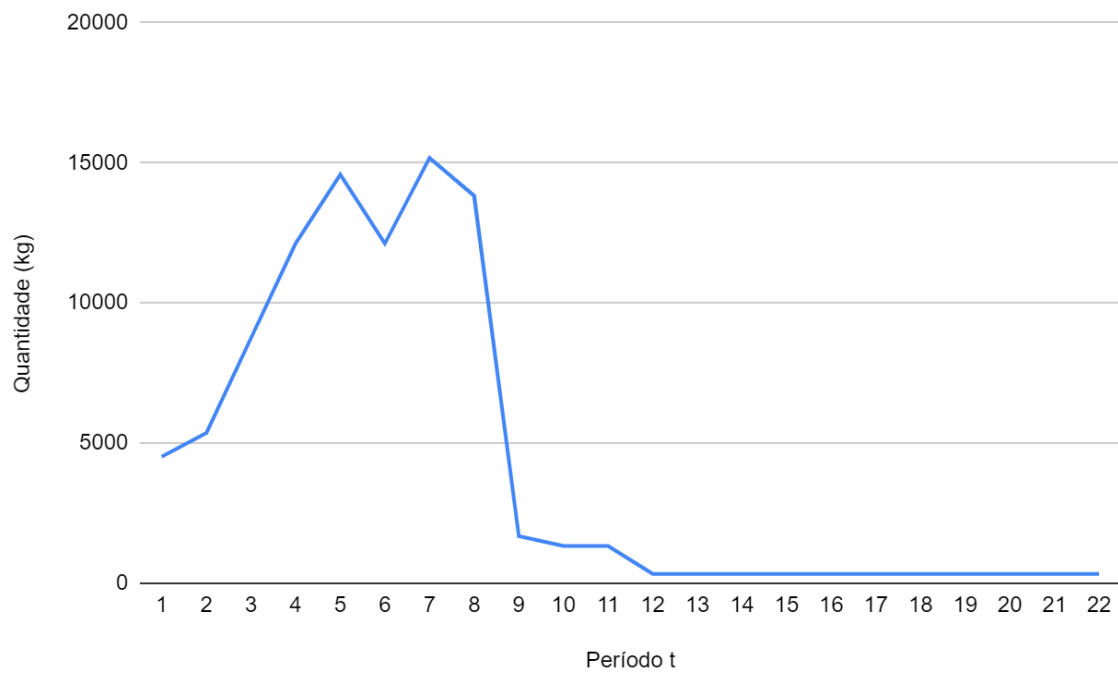
Gráfico 1 - Excesso dos itens independentes por período t .



Fonte: Autor.

Já o excesso das faixas diminui conforme a demanda do horizonte de planejamento é satisfeita. Porém, como não foi determinado, no modelo, que não poderia haver excesso na produção de faixas ao final do horizonte, isto resultou em um pequeno excesso em uma das faixas, como pode ser observado no Gráfico 2.

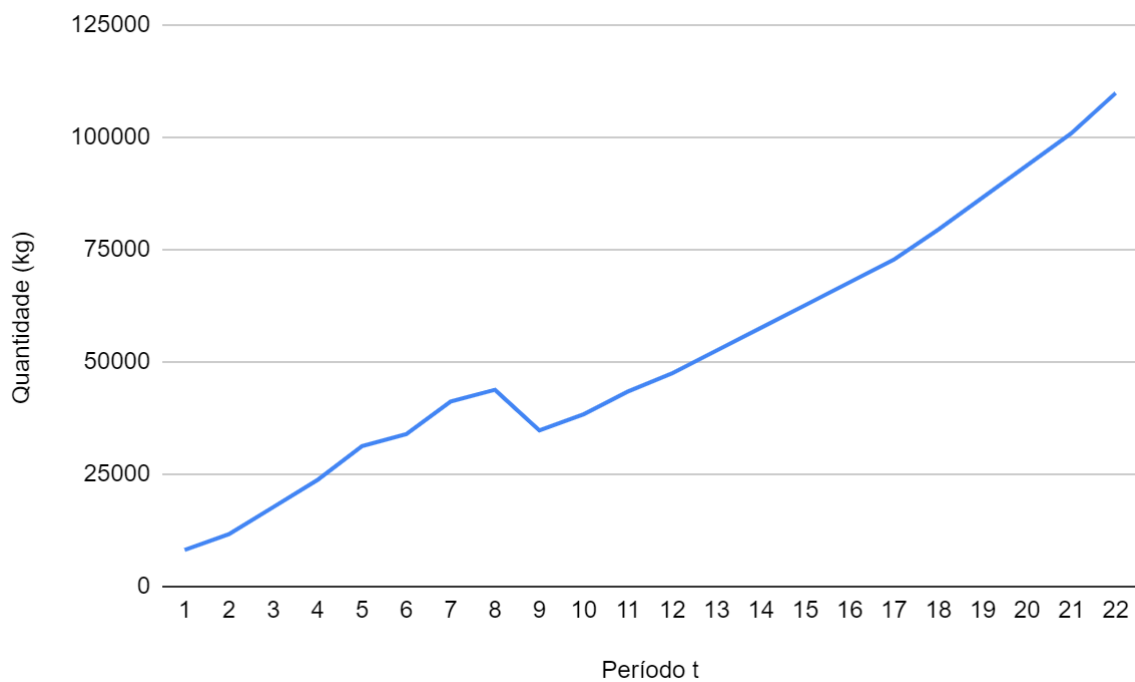
Gráfico 2 - Excesso das faixas por período t .



Fonte: Autor.

Analisando o Gráfico 3 (Excesso Total) percebe-se que a grandeza do Excesso de Itens é maior do que a de Faixas. Isto é evidenciado quando uma grande queda no excesso no Gráfico 2 (Excesso das Faixas), entre os períodos 8 e 9, gerou uma pequena queda no excesso do Gráfico 3 (Excesso Total).

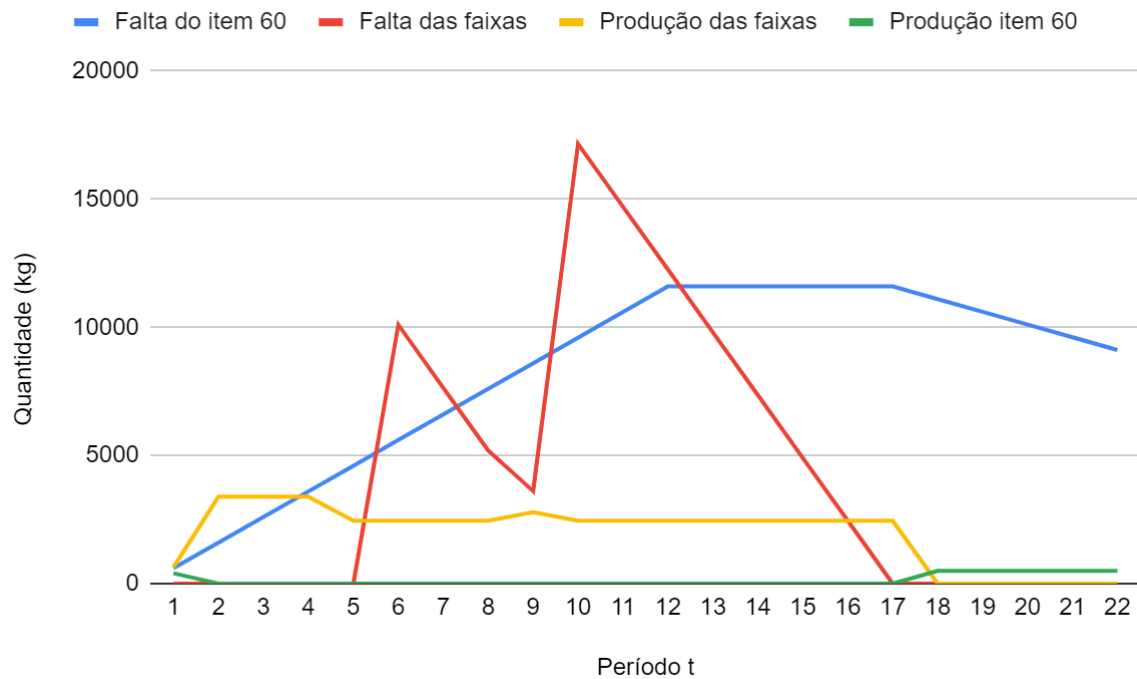
Gráfico 3 - Excesso total por período t .



Fonte: Autor.

Em contrapartida, ilustrado pelo Gráfico 4, o programa prioriza atender a demanda das faixas, um exemplo disso foi o item 60, que mesmo quando a falta da faixa é menor que a falta do item independente a sua produção como item é quase zero, até que a demanda das faixas que o possuem como componente seja satisfeita.

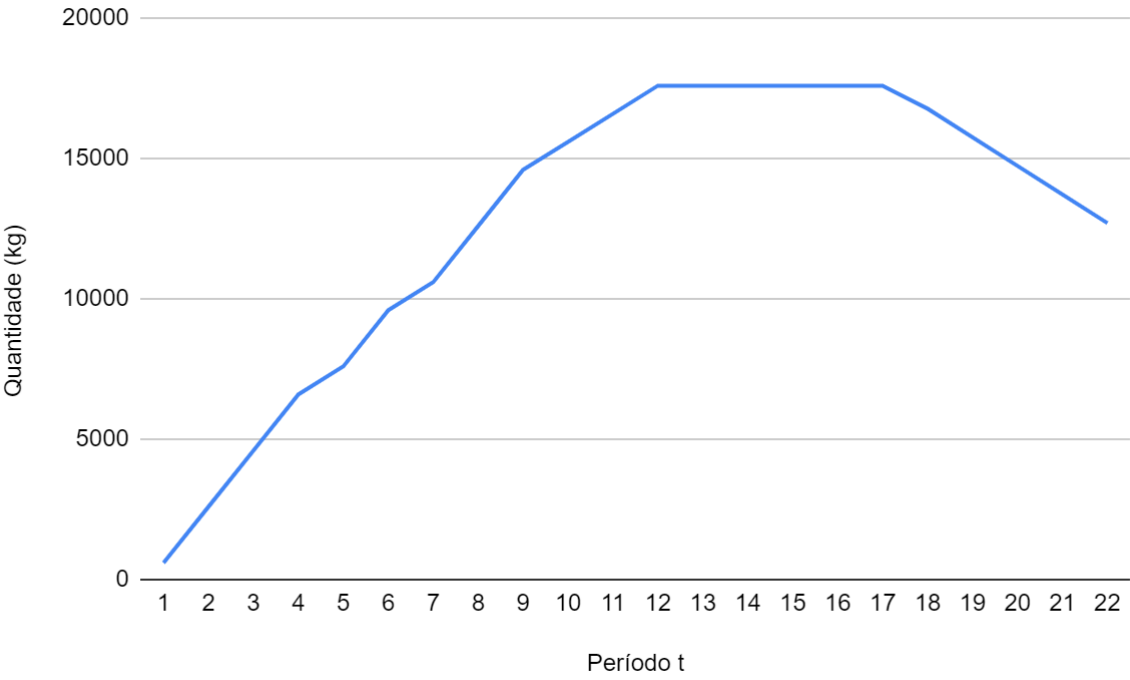
Gráfico 4 - Comparação da produção e da falta entre o item 60 e as faixas em que é usado como um componente.



Fonte: Autor.

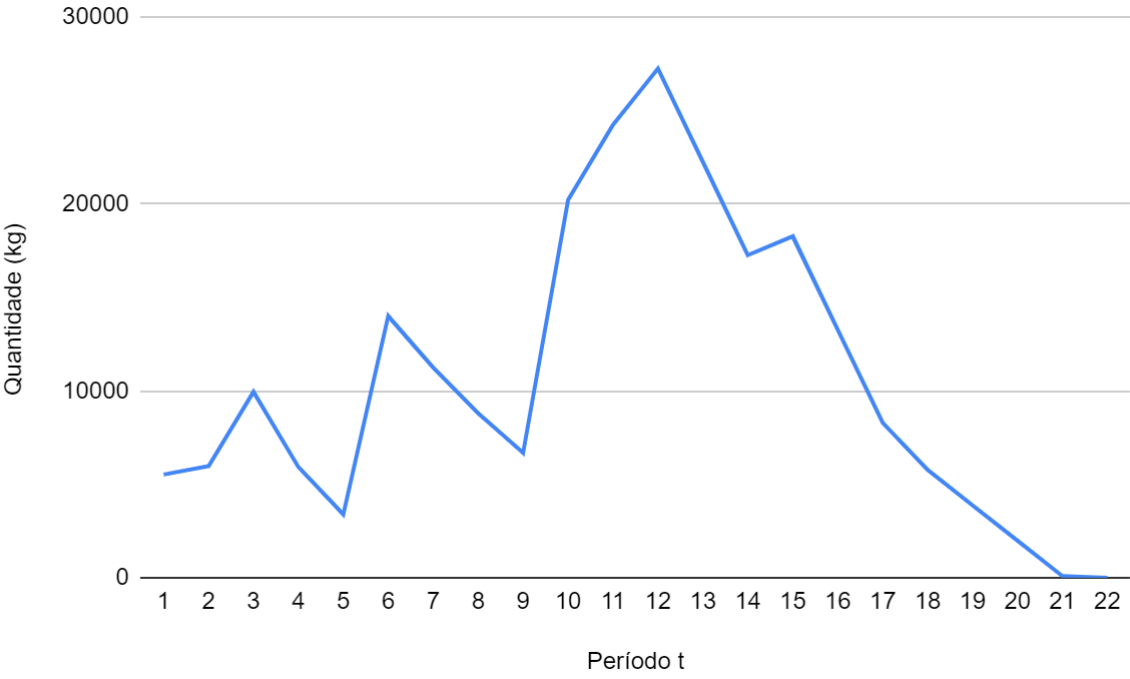
A prioridade de atender a demanda das faixas também pode ser observada comparando os Gráficos 5 e 6, falta de itens de demanda independente e faixas respectivamente. Enquanto a falta dos itens só começa a diminuir no período 17 a das faixas começa o mesmo processo no período 12. Além disso, a demanda das faixas é a única a ser satisfeita no final do horizonte de planejamento.

Gráfico 5 - Falta dos itens independentes por período t .



Fonte: Autor.

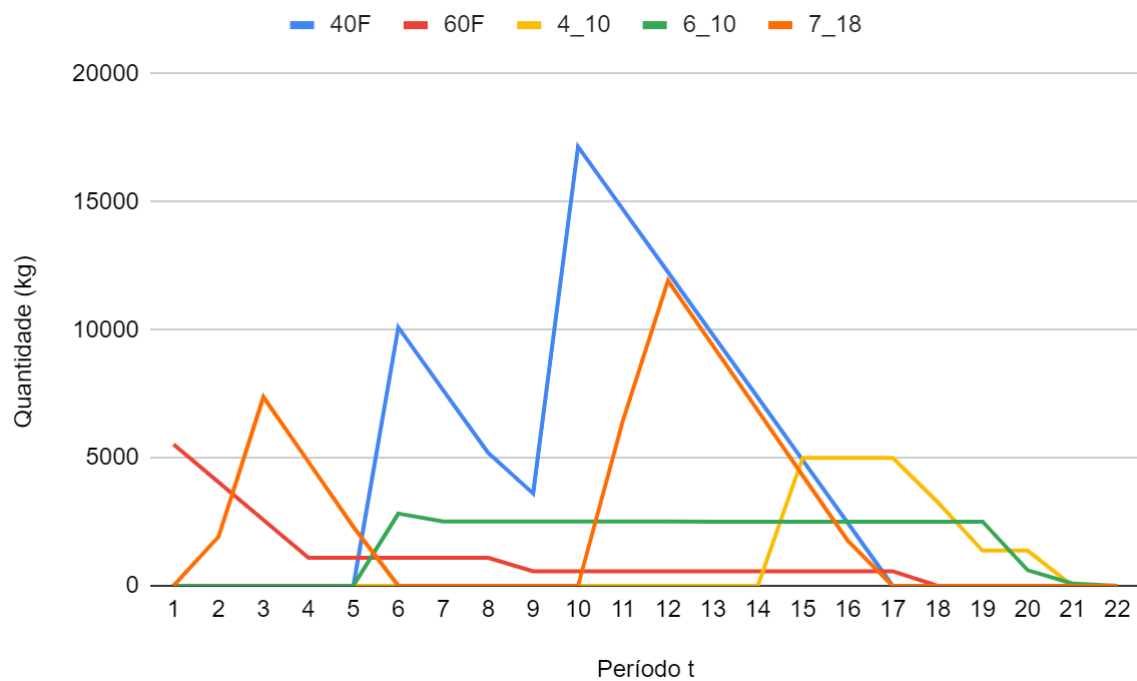
Gráfico 6 - Falta das faixas por período t.



Fonte: Autor.

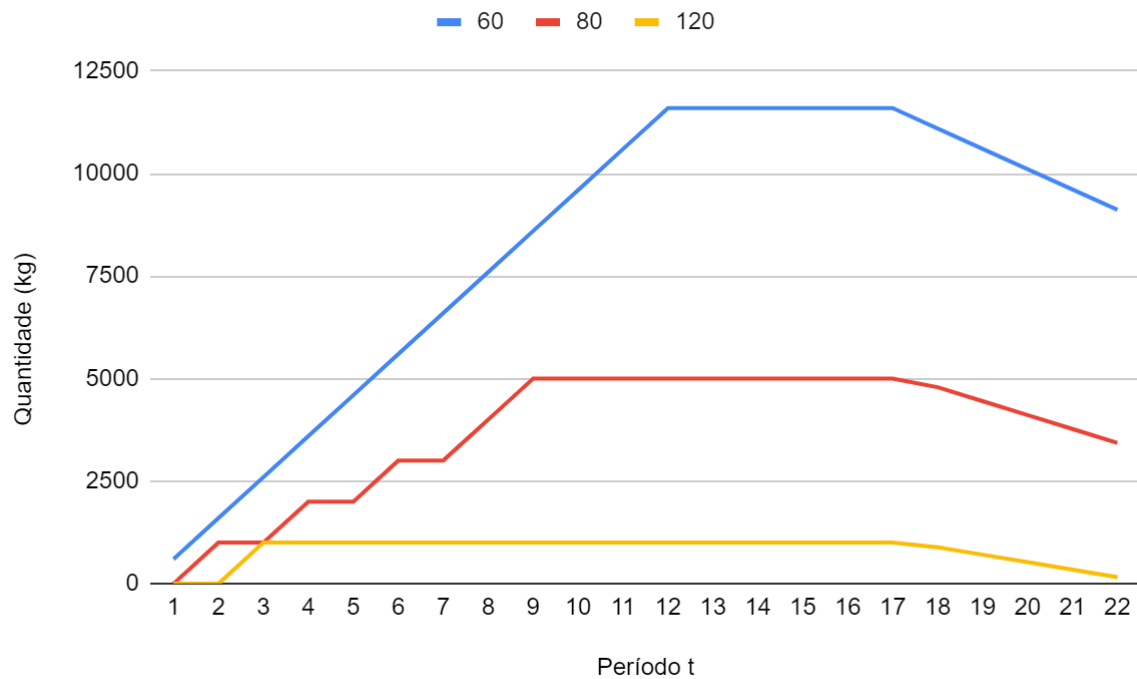
É possível observar também que a falta dos itens de demanda independente começa a diminuir somente a partir do período 17, essa queda pode ser observada no Gráfico 7, em que a falta é separada por faixa. As faixas 40F e 7_18 têm a sua demanda satisfeita. Isso causa uma maior disponibilidade para produção dos itens de demanda independente que as compõem, como ilustrado pela queda da falta dos itens 60, 80 e 120 no Gráfico 8.

Gráfico 7 - Falta das faixas por período t separado por faixa.



Fonte: Autor.

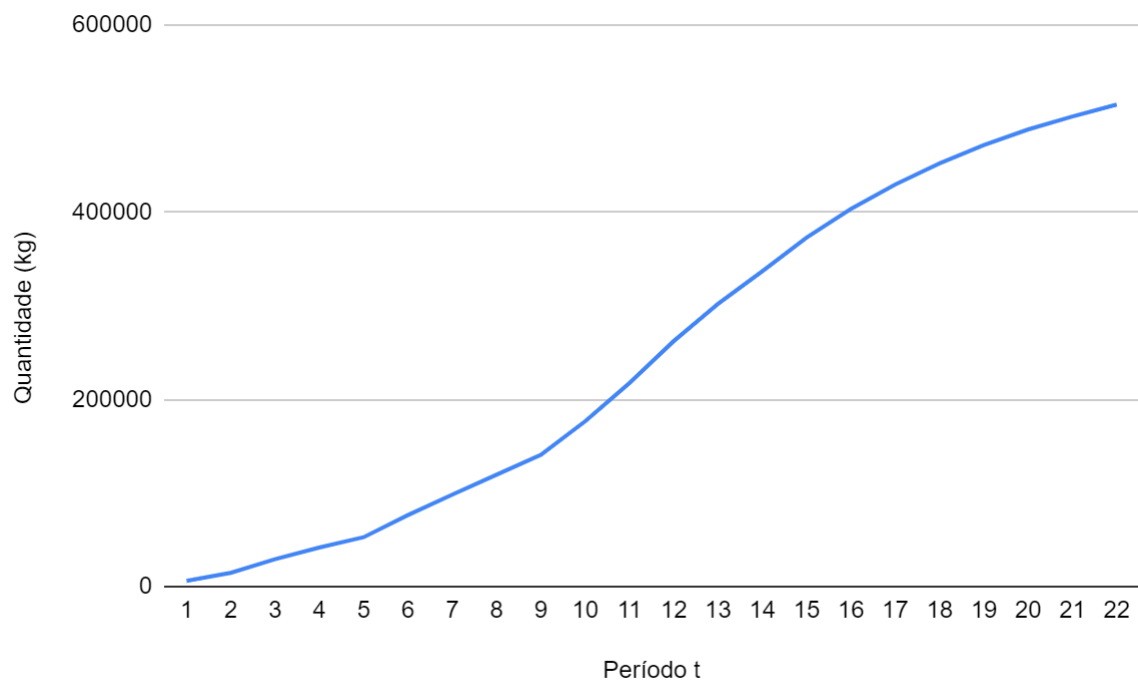
Gráfico 8 - Falta dos itens 60, 80 e 120 por período t .



Fonte: Autor.

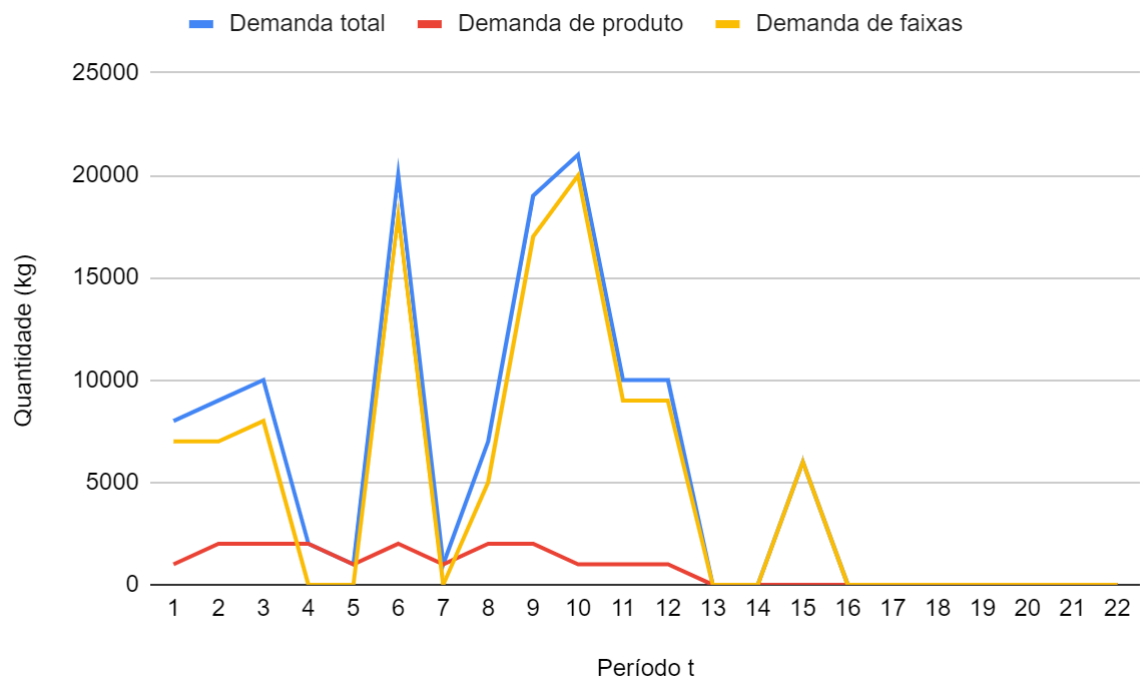
O aumento do gradiente na Função Objetivo no Gráfico 9 entre os períodos 9 a 17 pode ser explicado pelas altas demandas, apresentadas no Gráfico 10, nos períodos 10 a 12. O gradiente diminuiu a partir do período 17 porque, como explicado anteriormente, o programa satisfaz a demanda de 2 faixas nesse período, o que possibilitou o aumento da produção de itens independentes, consequentemente a redução das faltas destes itens, que por sua vez contribuem para a diminuição do gradiente no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Função Objetivo Z.



Fonte: Autor.

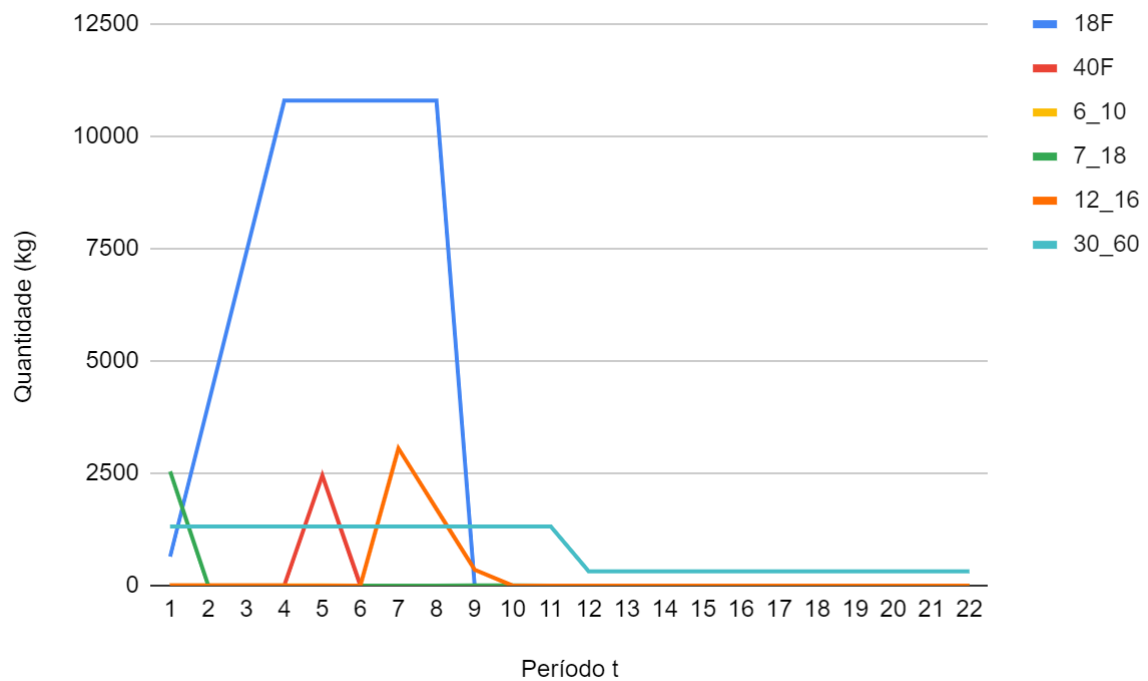
Gráfico 10 - Demanda total, de faixas e de produtos avulsos por período.



Fonte: Autor.

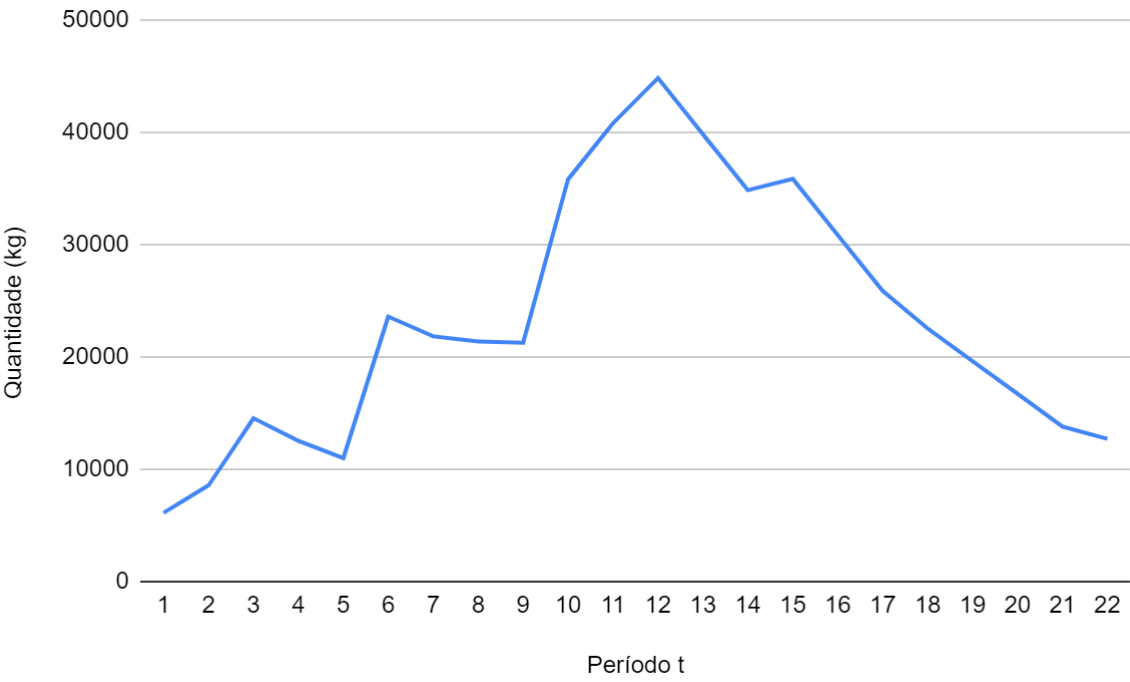
A demanda do período 9 não teve tanto impacto no aumento do gradiente na Função Objetivo (Gráfico 9) porque 10.800 kg, de 12.000 kg da demanda da faixa 18F, já haviam sido fabricados em períodos anteriores, como mostra o gráfico de Excesso por Faixa (Gráfico 11), por isso o aumento da Função Objetivo no período não foi tão substancial quanto em períodos posteriores. O gráfico de Falta Total (Gráfico 12) também ilustra esse ponto, em que pode ser observado que a falta total tem uma pequena diminuição no período 9.

Gráfico 11 - Excesso das faixas por período t , separado por faixa.



Fonte: Autor.

Gráfico 12 - Falta total por período t .



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um problema relevante no dia a dia em uma empresa de grãos eletrofundidos. Foram apresentadas algumas matérias-primas desses grãos, suas propriedades e modo de fabricação.

Foram demonstrados conceitos de Programação Linear, uma ramificação de Pesquisa Operacional, bem como de Planejamento e Controle da Produção, especialmente problemas de dimensionamento de lotes. Neste caso, foram descritos os conceitos e as classificações desses problemas, bem como foram apresentados modelos para ilustrar as suas diferenças.

Para auxiliar na tomada de decisão na programação de entregas de grãos eletrofundidos, foi criado um modelo de dimensionamento de lotes, focado em diminuir os atrasos.

O modelo apresentou resultados satisfatórios, já que das nove faixas com demanda, cinco tiveram atrasos, sendo que somente duas tiveram faltas acima de 5.000 kg por mais de um período. Além disso, a falta total não alcançou metade do valor da demanda total em nenhum momento do horizonte de planejamento, apesar da demanda ficar concentrada em nove faixas e três itens de um total de vinte oito faixas e vinte quatro itens.

Cabe ressaltar que a empresa tem um processo de inventário caótico, o que inviabilizou a comparação com as práticas da empresa.

Como sugestão para pesquisa futura, pode-se incluir os custos de estocagem, assim como uma ferramenta para gerir o inventário da companhia e assim, ter maior precisão na programação.

REFERÊNCIAS

ABCERAM. **Matérias primas sintéticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, [2021]. Disponível em: <https://abceram.org.br/>. Acesso em: 20 maio 2021.

AECWEB. **Inovações tecnológicas conferem novo status aos revestimentos cerâmicos**. São Paulo: AECweb, [2021]. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/inovacoes-tecnologicas-conferem-novo-status-aos-revestimentos-ceramicos/18454>. Acesso em: 19 dez. 2021.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

AZO. **Magnesia**: magnesium oxide (MgO) properties & applications. Manchester: Azo Materials, [2021]. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=54>. Acesso em: 5 jun. 2021.

BANERJEE, S. **Monolithic refractories**: a comprehensive handbook. Singapura: World Scientific, 1998.

BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2010.

BECHSTEDT, F. *et al.* Polytypism and properties of silicon carbide. **Physica status solidi (b)**, Berlin, v. 202, n. 1, p. 35-62, 1997.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Bradford, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BOULET, B.; LALLI, G.; AJERSCH, M. Modeling and control of an electric arc furnace. *In*: 2003 AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 6., 2003, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: IEEE, 2003. p. 3060-3064.

BRAHIMI, N. *et al.* Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdã, v. 168, n. 1, p. 1-16, 2006.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANIGLIA, S.; BARNA, G. L. **Handbook of industrial refractories technology**: principles, types, properties and applications. Westwood: Noyes Publications, 1992.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials**: science and engineering. New York: Springer-Verlag, 2007.

CASTRO COMPOSITES. **Silicon Carbide (Carborundum) diameter 60 microns**. Pontevedra: Castro Composites, [2021]. Disponível em: <https://www.castrocompositesshop.com/en/pigments-fillers-and-additives/2051-silicon-carbide-carborundum-diameter-60-microns.html>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CHATFIELD, D. C. The economic lot scheduling problem: a pure genetic search approach. **Computers & Operations Research**, New York, v. 34, n. 10, p. 2865-2881, 2007.

CHEN, Z.; ZHANG, R. A cash-constrained dynamic lot-sizing problem with loss of goodwill and credit-based loan. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 28, n. 5, p. 2841-2866, 2021.

CHEN, Z.; LIU, F. Multi-outsourcing supply chain coordination under yield and demand uncertainties. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 181, p. 115-177, 2021.

COTTA, L. S.; RODRIGUES, C. G. Avaliação de revestimento refratário no processo siderúrgico. **E-xacta**, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 185-203, 2014.

DEREVYANKO, I. V.; ZHADANOS, A. V. Researching of thermophysical processes in Acheson furnace for the production of silicon carbide. In: INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS, 14., 2015, Kiev. **Anais [...]**. Kiev: Pyro Metallurgy, 2015. p. 555-560.

DEUIS, R. L.; SUBRAMANIAN, C.; YELLUP, J. M. Abrasive wear of aluminium composites: a review. **Wear**, Lausanne, v. 201, n. 1-2, p. 132-144, 1996.

DEY, S. **Synthesis and application of γ -alumina nanopowders**. 2014. Rourkela: N.I.T. Rourkela, 2014. Dissertação (Mestrado de ciência em química) – N.I.T. Rourkela, National Institute of Technology, Rourkela, 2014.

DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling: survey and extensions. **European Journal of operational research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 221-235, 1997.

ELFUSA. **História**. São João da Boa Vista: Elfusa Geral de Eletrofusão, [2021]. Disponível em: <https://www.elfusa.com.br/pt/empresa/historia>. Acesso em: 20 maio 2021.

FIVEN. **Processo de produção do SiC**. Oslo: Fiven, [2021]. Disponível em: <https://www.fiven.com/pt/o-mundo-do-sic/processo-de-producao-do-sic/>. Acesso em: 5 jun. 2021.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. **Operations-Research-Spektrum**, New York, v. 19, n. 1, p. 11-21, 1997.

GALVAMINAS. **Abrasivos o que são**. Belo Horizonte: Galvaminas, [2021]. Disponível em: <https://www.galvaminas.com.br/blog/abrasivos-o-que-sao/>. Acesso em: 19 dez. 2021.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. v.1.

GERDAU. **Conhecendo o forno elétrico a arco**. São Paulo: Gerdau, [2021]. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/conhecendo-o-forno-eletrico-a-arco>. Acesso em: 20 maio 2021.

GICQUEL, C.; MINOUX, M. Multi-product valid inequalities for the discrete lot-sizing and scheduling problem. **Computers & Operations Research**, New York, v. 54, p. 12-20, 2015.

GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. **Capacitated lot sizing models: a literature review**. Lyon: HAL Archives, 2008. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00255830/document>. Acesso em: 20 maio 2021.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GÜNTHER, H. O. The block planning approach for continuous time-based dynamic lot sizing and scheduling. **Business Research**, Basingstoke, v. 7, n. 1, p. 51-76, 2014.

HAASE, K. **Lotsizing and scheduling for production planning**. New York: Springer-Verlag, 2007.

HARRIS, G. L. Basic physical properties. In: HARRIS, G. L. (ed.). **Properties of silicon carbide**. London: INSPEC, 1995. Cap. 1, p. 3-12.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 146, n. 3, p. 359-374, 1999.

IMERYS. **Fused aluminum oxide**. Paris: Imerys, [2021]. Disponível em: <http://www.imerys-fusedminerals.com/appl-fa.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Refining process**. Londres: International Aluminium Institute, [2021]. Disponível em: <https://bauxite.world-aluminium.org/refining/process.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, London, v. 46, n. 6, p. 1619-1643, 2008.

KACZMARCZYK, W. Valid inequalities for proportional lot-sizing and scheduling problem with fictitious microperiods. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 219, p. 236-247, 2020.

KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, Amsterdam, v. 31, n. 5, p. 365-378, 2003.

KHRUSCHOV, M. M. Principles of abrasive wear. **Wear**, Lausanne, v. 28, n. 1, p. 69-88, 1974.

KIMMS, A.; DREXL, A. Proportional lot sizing and scheduling: some extensions. **Networks: An International Journal**, Hoboken, v. 32, n. 2, p. 85-101, 1998.

LAHDELMA, R.; HAKONEN, H. An efficient linear programming algorithm for combined heat and power production. **European journal of operational research**, Amsterdam, v.148, n. 1, p. 141-151, 2003.

LU, X. *et al.* Advanced materials for sodium-beta alumina batteries: Status, challenges and perspectives. **Journal of Power Sources**, Lausanne, v. 195, n. 9, p. 2431-2442, 2010.

MANNE, A. S. Programming of economic lot sizes. **Management science**, Providence, v. 4, n. 2, p. 115-135, 1958.

MONTAGNA. **Abrasivos**. São Paulo: Abrasivos Montagna, [2021]. Disponível em: <https://montagna.com.br/abrasivos/>. Acesso em: 20 maio 2021.

MUNRO, M. Evaluated material properties for a sintered alpha-alumina. **Journal of the American Ceramic Society**, Westerville, v. 80, n. 8, p. 1919-1928, 1997.

PAIVA, R. P. O. de; MORABITO, R. Planejamento hierárquico da produção em usinas de açúcar e álcool: modelagem de otimização robusta. **Production**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 644-663, 2014. Disponível em: <https://www.prod.org.br/site/index>. Acesso em: 08 maio 2021.

PAWLOWSKI, L.; BLANCHART, P. **Industrial chemistry of oxides for emerging applications**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2018.

PLA. **Reducing process variation pays off**. Melbourne: Precision Light and Air, [2021]. Disponível em: <https://www.plapl.com.au/reducing-process-variation-pays-off/>. Acesso em: 19 dez. 2021.

POCHET, Y. Mathematical programming models and formulations for deterministic production planning problems. *In*: POCHET, Y. **Computational combinatorial optimization**. Heidelberg: Springer, Berlin, 2001. p. 57-111.

POSSA, M. V.; DAMASCENO, E. C. **Magnesita**: aspectos tecnológicos e econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1997.

REFRATIL. **Refratários**. São Paulo: Refratil Refratários, [2021]. Disponível em: <https://www.refratil.com.br/produtos/refratarios/>. Acesso em: 19 dez. 2021.

RUNLONG. **What are similarities and differences between brown fused alumina and white fused alumina**. Zhengzhou: RunLong Enterprise (Asia), 2020. Disponível em: <https://www.artificialabrasives.com/what-are-similarities-and-differences-between-brown-fused-alumina-and-white-fused-alumina.html>. Acesso em: 1 jul. 2021.

SADDOW, S. E.; AGARWAL, A. K. **Advances in silicon carbide processing and applications**. Norwood: Artech House, 2004.

SCHACHT, C. (ed.). **Refractories handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

SHAND, M. A. **The chemistry and technology of magnesia**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

SILVA, M. C. L. da. **Caracterização físico-química de SiC sintetizado pelo processo Acheson a partir de diferentes fontes de SiO₂**. 2015. Dissertação (Mestrado Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

SLACK, N. *et al.* **Administração da produção**: edição compacta. São Paulo: Atlas, 2006.

SOUSA, L. L.; ARANTES, V. L.; SALOMÃO, R. **Desenvolvimento e caracterização de cerâmicas porosas moldáveis à base de alumina-mulita para uso como isolamento térmico em altas temperaturas**. 2014. Tese (Doutorado de Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

STARKE, U. Atomic Structure of Sic Surfaces. *In*: CHOYKE, W. J.; MATSUNAMI, H.; PENSL, G. **Silicon carbide**: recent major advances. New York: Springer Science & Business Media, 2004. p. 281-316.

SURENDRANATHAN, A. O. **An introduction to ceramics and refractories**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**: uma visão geral. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TAHEHO. **Denmag**. Tokyo: Taheho, [2021]. Disponível em: <https://tateho-chemical.com/products/denmag.html>. Acesso em: 19 dez. 2021.

TFL. **A brief history of refractories**. Houston: TFL incorporated, [2021]. Disponível em: <https://www.tflhouston.com/2018/09/28/a-brief-history-of-refractories/>. Acesso em: 10 jun. 2021.

TOPWAY. **Brown aluminium oxide abrasive**. Zhengzhou: Topway Industries Material, [2021]. Disponível em: <https://www.abrasivesplant.com/brown-aluminium-oxide-abrasive-grade.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

TORRANCE, A. A. Modelling abrasive wear. **Wear**, Lausanne, v. 258, n. 1-4, p. 281-293, 2005.

TREIBACHER. **Sobre empresa**. Salto: Treibacher Schleifmittel Brasil, [2021]. Disponível em: <https://4346-br.all.biz/info-about>. Acesso em: 20 maio 2021.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção**: teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2007.

US GEOLOGICAL SURVEY & ORIENTEERING S. **Mineral Commodity Summaries, 2021**. Reston: Government Printing Office, 2021.

VEREŞ, D. Ş. A comparative study between loss on ignition and total carbon analysis on mineralogenic sediments. **Studia UBB Geologia**, Cluj-Napoca, v. 47, n. 1, p. 171-182, 2002.

WAGNER, H. M.; WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, Providence, v. 5, n. 1, p. 89-96, 1958.

WEIMER, A. W. **Carbide, nitride and boride materials-synthesis and processing**. Londres: Chapman & Hall, 1997.

YUFA. **White fused alumina for abrasives**. Zhengzhou: YUFA Abrasives Group, [2021]. Disponível em: <https://www.zzyfml.com/wfa-for-abrasives-2.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

ZHANG, S.; LEE, W. E. Influence of additives on corrosion resistance and corroded microstructures of MgO–C refractories. **Journal of the European ceramic society**, Oxford, v. 21, n. 13, p. 2393-2405, 2001.

ZHANG, Z.; YAN, X.; LI, S. Analysis of a dynamic lot-sizing problem with production capacity constraint. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 23, n. 4, p. 813-833, 2016.

ZORZI, J. E. **Produção de peças de cerâmica avançada com perfil complexo**. Porto Alegre: Lume, 2001.

ZUM GAHR, K. H. Modelling of two-body abrasive wear. **Wear**, Lausanne, v. 124, n. 1, p. 87-103, 1988.

APÊNDICE A – Tabelas de demanda do modelo

Tabela 11 – Demanda do item i por período t , períodos 1 a 12.

Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
80	0	1000	0	1000	0	1000	0	1000	1000	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total por t	1000	2000	2000	2000	1000	2000	1000	2000	2000	1000	1000	1000

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Demanda do item i por período t , períodos 13 a 22.

(continua)

Item	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(conclusão)										
Item	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total por t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Demanda da faixa f por período t , períodos 1 a 12.

(continua)												
Faixa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18F	0	0	0	0	0	0	0	0	12000	0	0	0

14_28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20_40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28_48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(conclusão)										
Faixa	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
30_60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40_70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40_100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70_325	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total por t	0	0	6000	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor.