



MELHORIA DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE ALUMÍNIO

HÉLDER FILIPE MARTINS RIBEIRO

novembro de 2018

MELHORIA DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE ALUMÍNIO

Hélder Filipe Martins Ribeiro

2017/2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial



MELHORIA DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE ALUMÍNIO

Hélder Filipe Martins Ribeiro
Nº1161481

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Professor Doutor Manuel Pereira Lopes.

2017/2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial



JÚRI

Presidente

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira
Professor, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Professor Doutor Manuel Pereira Lopes
Professor, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Professora Doutora Carla Alexandra Soares Galdes
Professora, Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento vai para a minha mãe e minha irmã, que estão sempre presentes ao meu lado, sempre me incentivaram e mostraram todo o seu apoio durante toda esta caminhada.

À Alu Gold, S.A. porque, através da experiência adquirida na empresa, foi possível ingressar neste mesmo mestrado e por me ter permitido a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial igualmente ao Professor Doutor Manuel Pereira Lopes por toda a ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho, assim como pelo enorme interesse que sempre demonstrou pelo projeto.

Também, e não menos importante, aos meus colegas, sejam eles da faculdade, do trabalho e do futebol, que também me foram sempre apoiando e incentivando, em especial à Delfina e à Sofia.

O último agradecimento é o mais importante para mim, é para o meu Pai que mesmo já não estando cá para me apoiar fisicamente é, diariamente, a minha fonte de inspiração. É graças a ele que sou a pessoa que sou, e foi graças aos seus ensinamentos que durante todo este tempo lutei pelos meus objetivos, como ele sempre o fez durante a sua vida.

PALAVRAS-CHAVE

One-dimensional *cutting stock* problem; 1DCSP; Padrões de corte

RESUMO

Nesta dissertação pretende-se abordar o problema de corte de barras de perfil alumínio existente na empresa Alu Gold, S.A. em Santo Tirso. Esta questão é essencial neste tipo de indústrias de caixilharia e assume um papel fundamental no aproveitamento e otimização da matéria-prima.

A temática do corte unidimensional a abordar baseia-se no corte de uma quantidade de itens necessárias para responder à procura, de um conjunto de objetos disponíveis stock, utilizando, posteriormente, as sobras resultantes dos padrões de corte.

Como tal, foi criado um modelo de programação linear que, mediante as necessidades produtivas diárias, encontre o melhor padrão de corte que que responda à função objetivo: otimização de recursos e minimização de desperdício.

Foi criada uma nova linha de produção de artigos com medidas *standard*, sendo pretendido com esta análise, a criação de uma ferramenta essencial no auxílio da gestão de produção e do operador, para que de uma forma eficiente sejam encontradas soluções para as necessidades futuras. Este carácter exploratório da estratégia apresentada permite a implementação de um sistema de otimização de corte a uma linha de produção que ainda não se encontra em funcionamento. Desta forma, a otimização alcançada é superior aos casos de aplicação a produções existentes.

KEYWORDS

Cutting Stock Problem; One-dimensional *cutting stock* problem (1DCSP); One Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers.

ABSTRACT

In this project it was studied the problem of cutting aluminum bars existing in the company Alu Gold, S.A. in Santo Tirso. This is essential in this type of industries of aluminum joinery and assumes a key role in the optimization and exploitation of the raw material.

The thematic of the one-dimensional cut is based on the cutting, in a set of available stock objects, in a quantity of necessary items to satisfy the demands, using in the subsequent cuts the leftovers resulting from the cutting patterns.

A linear programming model was created so that through the daily productive needs, the best cut pattern would be found to correspond objective function: resource optimization and less waste.

A new production line with standard product measures was created, aiming the creation of an essential tool aiding the production management and the operator, so that solutions to the needs are quickly and efficiently found in future demands. This exploratory character of the presented strategy, allows the implementation of a system of optimization of cut to a production line that is not functioning yet. In this way, the optimization achieved is higher to the cases of application to existing productions.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CSP	<i>Cutting Stock Problem</i>
1DCSPUL	<i>One Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers</i>
1DCSP	<i>One Dimensional Cutting Stock Problem</i>
C&P	<i>Cutting and Packing Problem</i>
FFD	<i>First Fit Decreasing</i>
BFD	<i>Best Fit Decreasing</i>
MBS	<i>Minimal Bin Slack</i>
VBPP	<i>Bin Packing Problem with Variable Length</i>
MIP	<i>Mixed Integer Problem</i>

Lista de Unidades

mm	Milímetros
kg	Quilograma
ml	Metro Linear

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE ENCOMENDAS RECEBIDAS E ENCOMENDAS ENVIADAS	20
FIGURA 2- LAYOUT DA EMPRESA ALU GOLD, SA	21
FIGURA 3- EXEMPLO DE PROCESSO DE FABRICO ATUAL	22
FIGURA 4- <i>STOCK</i> LACADO	23
FIGURA 5- CERCA DE 1/3 DO <i>STOCK</i> EM BRUTO	23
FIGURA 6- <i>STOCK</i> DE SOBRAS	24
FIGURA 7- EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES COM A PALAVRA-CHAVE: <i>1DCSPUL</i> (FONTE: GOOGLE SCHOLAR)	31
FIGURA 8- CATEGORIAS DE C&P E SUBCATEGORIAS DE <i>CUTTING STOCK PROBLEM</i> (WÄSCHER ET AL., 2007)	33
FIGURA 9- PROBLEMA DE CORTE COM DIFERENTES SOLUÇÕES (A) OBJETOS (B) PEÇAS REQUERIDAS (C) (D) (E) DIFERENTES SOLUÇÕES (ADRIANA CRISTINA CHERRI, MARCOS NEREU ARENALES, 2009)	34
FIGURA 10- PROBLEMA INDÚSTRIA TÊXTIL EM ANÁLISE (GRADIGAR & RESINOVI, 1997)	36
FIGURA 11 - METODOLOGIA PROPOSTA POR (GRADIŠAR ET AL., 1999)	38
FIGURA 12- ALGORITMO <i>BRANCH AND BOUND</i>	38
FIGURA 13- FICHA DE ORDEM DE TRABALHO	67
FIGURA 14- EXEMPLO DE PADRÃO DE CORTE	67
FIGURA 15- EXEMPLO DE UM PLANO DE CORTE	67
FIGURA 16- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3001 (1ª ITERAÇÃO)	78
FIGURA 17- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3001	81
FIGURA 18- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3003 (1ª ITERAÇÃO)	83
FIGURA 19- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3003 (2ª ITERAÇÃO)	85
FIGURA 20- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3001 (A-F)	88
FIGURA 21- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3001 (G-L)	88
FIGURA 22- GRÁFICO DE PADRÕES DE CORTE ADL3001 (M-Q)	89
FIGURA 23- PLANO DE PRODUÇÃO ONDE SE COLOCAM OS ARTIGOS NECESSÁRIOS	111
FIGURA 24- FICHA DE ORDEM DE TRABALHO A ENTREGAR EM PRODUÇÃO	111
FIGURA 25- TABELA DE RESPOSTA DO MODELO PARA PERFIL ADL3001	112
FIGURA 26- TABELA DE RESPOSTA DO MODELO PARA PERFIL ADL3003	112

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- LISTA DE ITENS A CORTAR PARA OS PRODUTOS STANDARD	26
TABELA 2- ITENS A CORTAR E QUANTIDADES TOTAIS NO DIA 1 DE CORTE	70
TABELA 3- DADOS OBTIDOS PELO MODELO DESENVOLVIDO PARA O DIA 1	71
TABELA 4- ITENS A CORTAR E QUANTIDADES TOTAIS NO DIA 2 DE CORTE	72
TABELA 5- DADOS OBTIDOS PELO MODELO DESENVOLVIDO PARA O DIA 2	73
TABELA 6- ITENS A CORTAR E QUANTIDADES TOTAIS NO DIA 3 DE CORTE	74
TABELA 7- DADOS OBTIDOS PELO MODELO DESENVOLVIDO PARA O DIA 3	75
TABELA 8- RESULTADO DO MODELO PARA 3 MEDIDAS PADRÃO ADL3001.....	77
TABELA 9- RESULTADOS DE PADRÕES ADL3001 USANDO COMBINAÇÕES DISTINTAS DE ITENS	79
TABELA 10- NOVA ITERAÇÃO COM PERFIL ADL3001 ELIMINANDO PADRÃO	80
TABELA 11- RESULTADO DO MODELO PARA 3 MEDIDAS PADRÃO ADL3003.....	82
TABELA 12- PADRÕES DE CORTE ADL3003 (1ª ITERAÇÃO).....	83
TABELA 13- TABELA REALIZADA MANUALMENTE COM REPETIÇÃO DE ITENS NA MESMA BARRA	84
TABELA 14- RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO PARA SOBRAS ANTERIORES	86
TABELA 15- PADRÕES DE CORTE ADL3003.....	87
TABELA 16- ARTIGOS NUMERADOS DE 1 A 21	91
TABELA 17- PRODUÇÃO DE 20 DIAS CRIADA ALEATORIAMENTE	94
TABELA 18- PRODUÇÃO DE 20 DIAS CRIADA ALEATORIAMENTE ADL3001	96
TABELA 19- PRODUÇÃO DE 20 DIAS CRIADA ALEATORIAMENTE ADL3003	98
TABELA 20- RESUMO DOS RESULTADOS DA PRODUÇÃO ALEATÓRIA ADL3001	98
TABELA 21- RESUMO DOS RESULTADOS DA PRODUÇÃO ALEATÓRIA ADL3003	99

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	- 16 -
2	ANÁLISE DO PROBLEMA	20
2.1	LINHA DE PRODUÇÃO ATUAL	20
2.2	NOVA LINHA DE PRODUÇÃO	25
2.3	OBJETIVOS	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1	MÉTODOS HEURÍSTICOS NÃO BASEADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS DE PROGRAMAÇÃO	36
3.2	TERMINOLOGIA E NOTAÇÕES MATEMÁTICAS GERAIS.....	41
3.2.1	NOTAÇÃO MATEMÁTICA USADA NO PROBLEMA 1DCSPUL	41
4	TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS	61
4.1	METODOLOGIA	61
4.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	62
4.3	PARÂMETROS UTILIZADOS	63
4.3.1	FORMULAÇÃO	63
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DA FORMULAÇÃO EM EXCEL	66
4.5	RECOLHA DE DADOS	68
4.6	RESULTADOS COMPARATIVOS	69
4.7	DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE	76
4.7.1	PERFIL ADL3001	76
4.7.2	PERFIL ADL3003	81
4.8	UTILIZAÇÃO DO MODELO COM PADRÕES DE CORTE	90
4.8.1	FORMULAÇÃO <i>TRIM LOSS</i>	90
4.8.2	ANÁLISE DE RESULTADOS	91
4.8.3	COMENTÁRIO FINAL AOS RESULTADOS	98
5	CONCLUSÕES	103

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	107
ANEXOS	111
FERRAMENTA EXCEL	111
ÁRVORES DO PRODUTO	113

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com a inflação contínua do preço das matérias-primas e transporte das mesmas, torna-se essencial para as organizações, a otimização da eficiência dos seus recursos.

Na presente dissertação, será analisado um caso de uma indústria onde o alumínio é a principal matéria-prima, cujo preço está em constante alteração. Com a competitividade das empresas a aumentar, estas necessitam de reduzir os custos que incorrem com a aquisição das matérias-primas e com a mão-de-obra.

“O desenvolvimento económico e social de um país exige permanentes preocupações com a utilização dos seus recursos e com a sua transformação, assumindo a engenharia um papel determinante, dada a sua missão principal de transformar e adaptar a natureza com o fim de otimizar a qualidade de vida” (Ramos, 2015).

É o constante avanço que a engenharia promove que permite ao longo dos tempos, a evolução dos métodos e modelos já existentes com o objetivo de os melhorar e adaptar à realidade que se vai moldando.

No caso mais específico das indústrias cuja matéria-prima utilizada se encontra em barra, a otimização das mesmas torna-se essencial. É imprescindível que haja um aproveitamento do recurso durante a execução do corte, assim como a redução do desperdício resultante dessa operação.

(Gilmore & Gomory, 1961) designou de uma forma simples o CSP como o *Cutting Stock Problem* é o problema de satisfazer um pedido com custo mínimo para um número específico de comprimentos de material a ser cortado a partir de determinados comprimentos de *stock* de um determinado custo. No entanto, novos avanços permitiram que, mais do que satisfazer o pedido de itens necessários, a comunidade científica preocupou-se com o desperdício que disso mesmo resultava, e mais tarde ainda com o aproveitamento que deveria ser dado à matéria-prima, que mediante padrões estabelecidos, é considerada uma sobra reaproveitável nos cortes futuros. Os problemas de corte possuem realidades distintas, sendo que as formulações para a resolução desses mesmos problemas, podem assumir modelos extensos e demasiado complexos. Esta variedade de soluções que foram sendo desenvolvidas e são analisadas

mais detalhadamente na revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação, permitem que de uma forma ampla, possam ser resolvidos os diversos problemas existentes no corte de matéria-prima.

Existem diversas tipologias de CSP, que são devidamente ilustradas no capítulo 3.1, sendo que este problema irá se enquadrar e designar segundo (Wäscher, Haußner, & Schumann, 2007) de *One Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers* (1DCSPUL). O problema de corte baseia-se no corte em objetos que estão em *stock* de determinados itens menores necessários para satisfazer a procura. Este tipo de corte assenta no princípio de que existe uma heterogeneidade nos comprimentos de itens necessários e que apesar de um *stock* limitado de objetos, estes são capazes de satisfazer a necessidade.

No entanto a comunidade científica e os casos práticos de aplicação dos diversos métodos de otimização de corte, tendem a focar-se em melhorias de casos existentes. Embora sejam modelos passíveis de ser aplicados em casos existentes, estas mesmas aplicações podem não obter os resultados mais eficientes, devido a fatores já existentes que podem influenciar essa mesma aplicação.

Essa é a questão diferenciadora relativamente a este estudo, que além de uma aplicação possível na linha existente na empresa, aborda uma estratégia de análise antecipada dos problemas e de forma prévia implementar melhorias nos processos futuros.

Desta forma será implementada a criação de padrões de corte. Este tipo de tipologia existente em alguns casos específicos de CSP, será aplicado ao caso específico em estudo. Essa implementação irá passar pelo estudo aprofundado dos padrões de corte mais eficientes para a obtenção dos objetivos propostos, e que sejam no momento do início de produção da linha de produção, uma ferramenta já existente e passível de ser utilizada pelo operador, mas que mais ainda, seja uma ferramenta primordial na minimização do desperdício da empresa.

ANÁLISE DO PROBLEMA

2.1 LINHA DE PRODUÇÃO ATUAL

2.2 NOVA LINHA DE PRODUÇÃO

2.3 OBJETIVOS

2 ANÁLISE DO PROBLEMA

2.1 LINHA DE PRODUÇÃO ATUAL

Atualmente a empresa Alu Gold, S.A. possui uma linha de produção de portões de alumínio para exportação.

A tipologia de produtos destina-se ao mercado residencial, com venda direta a clientes particulares ou a pequenos revendedores em França. A estratégia de mercado da empresa, uma vez que vende diretamente a clientes particulares, é essencialmente produção de artigos por medida.

Neste momento, o foco produtivo fundamental é a produção dos portões que ocupam cerca de 90% da faturação anual, e por isso mesmo, neste momento é a secção de fabrico que requer maior atenção em termos de custos e implementação de melhorias. A necessidade de melhoria na questão do aproveitamento e gestão melhorada de *stock*, surgiu do aumento significativo no último ano das encomendas recebidas (fig.1) devido a uma estratégia de marketing implementada recentemente, assim como, o desenvolvimento de uma plataforma digital para venda online. Da mesma forma, as encomendas produzidas tiveram de acompanhar o constante crescimento, assim como houve necessidade de reforço ao nível de recursos humanos, maquinaria e *stock*.

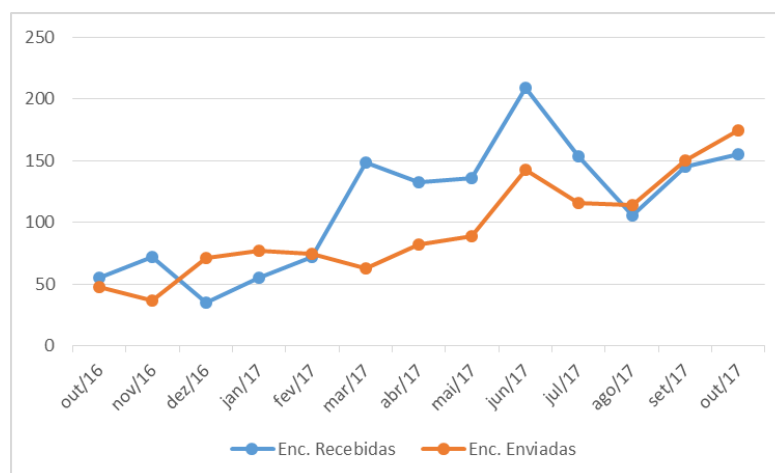


Figura 1 – Gráfico da relação entre encomendas recebidas e encomendas enviadas

A empresa divide-se, em termos de área produtiva usada no fabrico dos portões de alumínio, em 5 seções que compõem a totalidade do fluxo de produção. Sendo essas

seções visíveis no *layout* da empresa (fig.2) e constituídas por: secção de *stock* de perfis, secção de corte e furação, secção de montagem e acabamento, secção de embalagem e secção de *stock* de produto acabado. Todas as áreas a cinzento são secções destinadas a outro tipo de produção distinta.

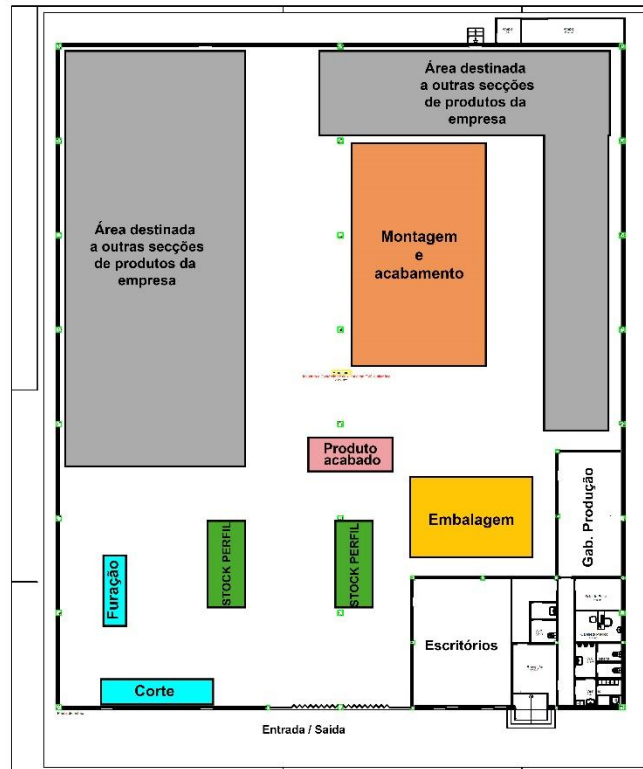


Figura 2- Layout da empresa Alu Gold, SA

O gabinete de produção é a secção que faz o elo de ligação entre cliente e produção. Nesta área são elaborados todos os processos de produção e encomendas a fornecedores, assim como faz a gestão logística e comunicação com clientes sobre datas de saída do produto acabado. É por isso mesmo o ponto inicial do fluxo de produção. Existem alguns problemas em termos de espaço que limitaram a disposição no chão de fábrica e fizeram com que neste momento, mesmo depois de diversas alterações em termos de *layout*, ainda existam distâncias consideráveis entre secções, tentando nesta fase que haja o menor número de deslocações.


Na secção de corte é onde é feita a gestão, neste momento visual, do *stock* quer de barras quer de sobras, antes de proceder ao início da produção. O *software* utilizado atualmente foi adaptado à realidade da empresa, pois foi desenvolvido na sua origem,

para produção de janelas. No entanto, a empresa que fez a implementação, fez pequenas adaptações para que fosse possível utilizar para os portões, contudo com essa situação limitou severamente as soluções. Neste momento, apenas é utilizado para gerar as medidas de corte para o portão a produzir (fig.4). O módulo existente no software destinado à gestão do *stock*, com estas adaptações foi inutilizada e é um ponto fundamental.

Folha de Trabalho 3/11/2017

Orçamento nº 20 151 204/1

Cliente: 123PVC-ALU
 Obra: WATRELOT 62
 Responsavel: ALUGOLD
 Código: TIGNES C



Pos.: 1 Quantid.: 1 Cor: 7016 Ral Data de entrega:

Referência	Descrição	Quant.	Q.Total	Longitude	Altura	Pos.	Corte A	Corte B
01 Perfis principais								
ADL3001 LAQ 7	PERFIL	1	1	4 280.00		H	90.00	90.00
ADL3002 LAQ 7	PERFIL	2	2	1 299.00		V	90.00	90.00
ADL3006 LAQ 7	PERFIL	2	2	1 299.00		V	90.00	90.00
ADL3006 LAQ 7	PERFIL	2	2	4 280.00		H	90.00	90.00
ADL3007 BRT	PERFIL	2	2	4 280.00		H	90.00	90.00
ADL3010 LAQ 7	PERFIL	1	1	4 280.00		H	90.00	90.00
05 Enchimentos								
P PORT LAQ 7	PAINEL PORTAO	1	1	3 935.00	1 230.00			
10 Acessorios								
BR POC	Braço Portail Couissant	1	1					
CONSUMABLE PF	Consumable PF	1	1					
CYLINDRE	CYLINDRE PORTAIL	2	2					
GJ792314	SERRURE LEVANT NOIR COULISSANT	1	1					
GUIA	RAIL PORTAIL COULISSANT	1	1					
NN000002	BUTÉE A VISSER	1	1					
NN712001	Gâche complète zamak	1	1					
PGN PO	POIGNÉE PORTAIL	1	1					
PLT01	PLATINE SERRURE PORTAIL	1	1					
R26080Z	RODAS PORTÃO	2	2					
TAMPA P	EMBOUT PROFIL COULISSANT	2	2					
TAMPA PERF	EMBOUT PROFIL	4	4					


Documento impresso por  PrefSuite
Página 1

Figura 3- Exemplo de Processo de Fabrico atual

Em termos de *stocks* tem havido alguns problemas no último ano. A produção como foi possível de verificar acima, tem aumentado a um ritmo elevado, o que originou, nos primeiros meses sucessivas ruturas de *stock*. De forma a prevenir as ruturas, a empresa optou por aumentar o volume de compras de forma a poder eliminar essas ruturas, no entanto com este método de compras acabou por criar em alguns momentos, um *stock* demasiado elevado para a realidade da empresa (pequena-média empresa) (figs. 5 e 6)



Figura 4- *Stock* lacado



Figura 5- Cerca de 1/3 do *stock* em bruto

Uma vez que a produção, na situação atual, é feita projeto a projeto, existe uma fraca otimização do corte. Desta forma existe um gasto elevado de matéria-prima com medida *standard*, e conseqüentemente uma criação excessiva de sobras. Estas são colocadas em *stock* de forma desorganizada e que por vezes se torna difícil para o operador recuperar para cortes futuros e acaba, por este motivo, optar por barras inteiras.

A dimensão e o tipo de perfil utilizado são os fatores de diferenciação entre sobra e desperdício. A matéria-prima que se torna sobra, caso seja de uma medida que possa ser utilizável no futuro, é colocada num carrinho de armazenamento perto da secção de corte. Caso seja um perfil que não permita a sua posterior utilização, é colocado num contentor de alumínio para reciclar. A dificuldade neste processo, passa pelo facto de que as sobras são colocadas aleatoriamente nesse mesmo carrinho, não havendo controlo sobre a dimensão, cor, nem sequer em termos de quantidades existentes. E neste caso, a forma como são armazenadas em nada contribui para que esse trabalho seja facilitado (fig.7). Os perfis estão todos aglomerados com cores, tamanhos e tipos de perfis diferentes.

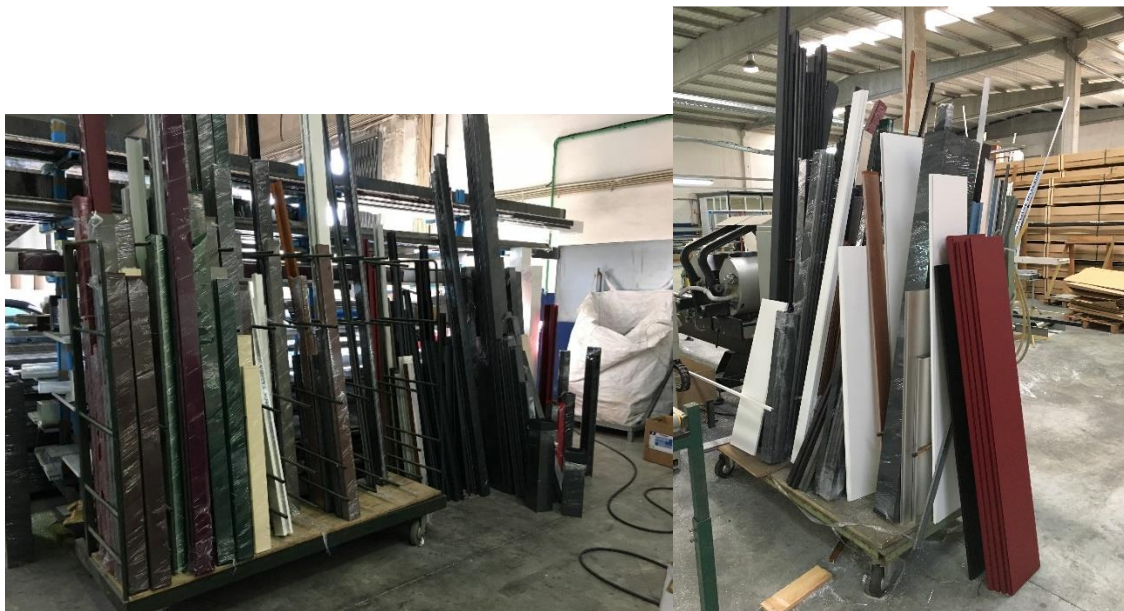


Figura 6- Stock de sobras

2.2 NOVA LINHA DE PRODUÇÃO

Ao ingressar num novo mercado, empresa sentiu necessidade de criar uma nova linha de produção. Esta nova linha tem como objetivo a venda a empresas e pequenas/médias superfícies comerciais, uma vez que a Alu Gold, S.A. não tem capacidade produtiva para grandes superfícies.

Este novo mercado irá implicar uma nova mudança nos produtos e estratégia produtiva. Os materiais usados como matéria-prima serão os mesmos da linha atual. No entanto, esta será implementada num novo edifício. Desta forma, haverá uma total separação entre as duas linhas e os dois tipos de produção. Assim como o stock da nova linha será completamente separado do atual.

Os produtos em si, assumirão uma produção mais simples e rápida uma vez que apenas serão produzidos produtos standard. Os produtos por medida ou pedido de cliente serão sempre realizados na linha atual. Foram, por isso, escolhidos 21 tipos de produtos, sendo eles 15 tipos de portões e 6 tipos de portões de passagem.

A diferença entre portão e portão de passagem é a tipologia. Ou seja, o portão é constituído por duas folhas e com medidas normalmente para entradas de viaturas, enquanto que o portão de passagem é usado apenas para entradas pedonais. Entre os diferentes produtos na sua categoria, o que os diferencia são apenas as dimensões.

Foram então definidas as características dos 21 produtos, conforme mencionado focando as medidas mais aproximadas dos produtos mais fabricados atualmente. Por isso mesmo esta é a lista de produtos criados:

- Portão 3000x1600
- Portão 3000x1800
- Portão 3000x2000
- Portão 3500x1600
- Portão 3500x1800
- Portão 3500x2000
- Portão 4000x1600
- Portão 4000x1800
- Portão 4000x2000
- Portão 4500x1600
- Portão 4500x1800
- Portão 4500x2000
- Portão 5000x1600
- Portão 5000x1800
- Portão 5000x2000
- Portão de passagem 900x1600
- Portão de passagem 900x1800
- Portão de passagem 900x2000
- Portão de passagem 1200x1600
- Portão de passagem 1200x1800

- Portão de passagem 1200x2000

Resumidamente, e sendo analisados apenas os itens de ADL3001 e ADL3003, que serão o alvo do estudo, segue em baixo uma tabela que compila todos os itens para corte, divididos pelos respectivos produtos, acompanhados das devidas quantidades.

PRODUTO	MEDIDA ADL3001	QUANTIDADE ADL3001		MEDIDA ADL3003	QUANTIDADE ADL3003
PORTÃO 3000X1600	1600 mm	4		1420 mm	4
PORTÃO 3000X1800	1800 mm	4		1420 mm	4
PORTÃO 3000X2000	2000 mm	4		1420 mm	4
PORTÃO 3500X1600	1600 mm	4		1670 mm	4
PORTÃO 3500X1800	1800 mm	4		1670 mm	4
PORTÃO 3500X2000	2000 mm	4		1670 mm	4
PORTÃO 4000X1600	1600 mm	4		1920 mm	4
PORTÃO 4000X1800	1800 mm	4		1920 mm	4
PORTÃO 4000X2000	2000 mm	4		1920 mm	4
PORTÃO 4500X1600	1600 mm	4		2170 mm	4
PORTÃO 4500X1800	1800 mm	4		2170 mm	4
PORTÃO 4500X2000	2000 mm	4		2170 mm	4
PORTÃO 5000X1600	1600 mm	4		2420 mm	4
PORTÃO 5000X1800	1800 mm	4		2420 mm	4
PORTÃO 5000X2000	2000 mm	4		2420 mm	4
PORTÃO PASSAGEM 900X1600	1600 mm	2		776 mm	2
PORTÃO PASSAGEM 900X1800	1800 mm	2		776 mm	2
PORTÃO PASSAGEM 900X2000	2000 mm	2		776 mm	2
PORTÃO PASSAGEM 1200X1600	1600 mm	2		1076 mm	2
PORTÃO PASSAGEM 1200X1800	1800 mm	2		1076 mm	2
PORTÃO PASSAGEM 1200X2000	2000 mm	2		1076 mm	2

Tabela 1- Lista de itens a cortar para os produtos standard

2.3 OBJETIVOS

O objetivo primordial deste trabalho foca-se na minimização do desperdício no processo de corte de barras de alumínio. Desta forma, pretende-se melhorar o aproveitamento dos recursos e o tempo utilizado pelo operador para a programação do corte.

Para isso ficou estabelecida a criação de um sistema de apoio à decisão, para reduzir o desperdício.

Na utilização do modelo com padrões de corte, foi usado como função objetivo, a minimização do número de barras padrão. Esta minimização surge como opção da empresa, uma vez que perante as questões existentes na linha atual, a empresa pretende transpor para a nova linha, a opção de poder ter um desperdício um pouco superior, sendo eu utiliza menos recursos e menos itens para stock.

Serão igualmente considerados como objetivos, o aumento da produtividade das duas linhas e uma gestão mais eficiente dos recursos. Estes mesmos objetivos estarão adjacentes aos anteriores. Por isso mesmo, podemos definir o principal objetivo da minimização do desperdício na criação dos padrões de corte, assim como a minimização de matéria prima no modelo de *trim loss*.

REVISÃO

BIBLIOGRÁFICA

3.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS NÃO BASEADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS DE PROGRAMAÇÃO

3.2 TERMINOLOGIA E NOTAÇÕES MATEMÁTICAS GERAIS

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A questão da otimização tem um papel fundamental nas empresas e tem vindo a assumir um papel cada vez mais fundamental na nossa indústria.

Por isso mesmo, esta temática tem sido estudada e analisada com frequência nos últimos anos pela comunidade científica.

Numa pesquisa por “*One Dimensional Cutting Stock Problem With Usable Leftover*”, muitos artigos encontrados abordam apenas a questão de *Cutting Stock Problem* e não necessariamente a metodologia que engloba o uso das sobras.

No entanto, segundo os resultados do motor de busca “Google Scholar” (Google Scholar, 2018), estes demonstram a importância do tema *Cutting Stock Problem* nos últimos anos, com um crescimento acentuado do número de publicações no decorrer dos anos.

Uma possível causa deste interesse por parte da comunidade científica pode dever-se à crise vivida nos últimos tempos que gerou uma preocupação com otimização dos sistemas produtivos de forma a reduzir custos.

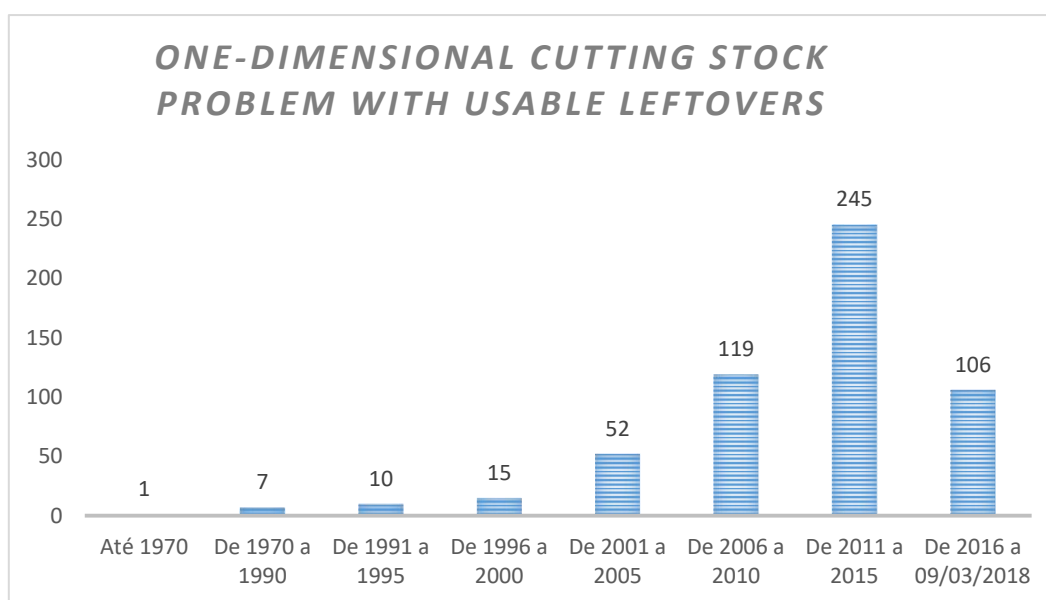


Figura 7- Evolução do número de publicações com a palavra-chave: *1DCSPUL* (fonte: Google Scholar)

Na pesquisa realizada, foram excluídas patentes e citações, sendo os resultados apresentados, referentes apenas a artigos relativos à palavra-chave utilizada.

Foi igualmente verificado que, de entre os 555 artigos devolvidos pela pesquisa, apenas 26 se encontram em língua portuguesa, mais precisamente, português do Brasil.

Quanto ao tipo de indústria que foi alvo de estudo nos artigos, foi possível verificar-se que a indústria metalúrgica é aquela onde são feitas mais aplicações. Por exemplo, na indústria das barras e tubos de aço, estruturas metálicas, assim como indústria automóvel. Outras indústrias surgem igualmente com alguns casos de aplicação, como por exemplo, indústria da madeira e indústria aeronáutica.

Foi especialmente analisada a questão da indústria do alumínio, uma vez que é relativa à indústria em estudo na presente dissertação. Porém, os resultados foram muito escassos, tendo sido encontrado apenas um artigo diretamente relacionado com esta indústria, artigo esse que não foi aqui desenvolvido, uma vez que era relacionado a área industrial, mas referia se a problema de 1DCSP sem o uso de sobras, sendo por isso excluído.

Neste capítulo, serão apresentadas as diversas categorias de problemas de corte e empacotamento (C&P), ver Figura 8- Categorias de C&P e subcategorias de *Cutting Stock Problem* (Wäscher et al., 2007).

O presente estudo irá centrar-se numa subcategoria, 1DCSPUL, inserida na categoria *Cutting Stock Problem*.

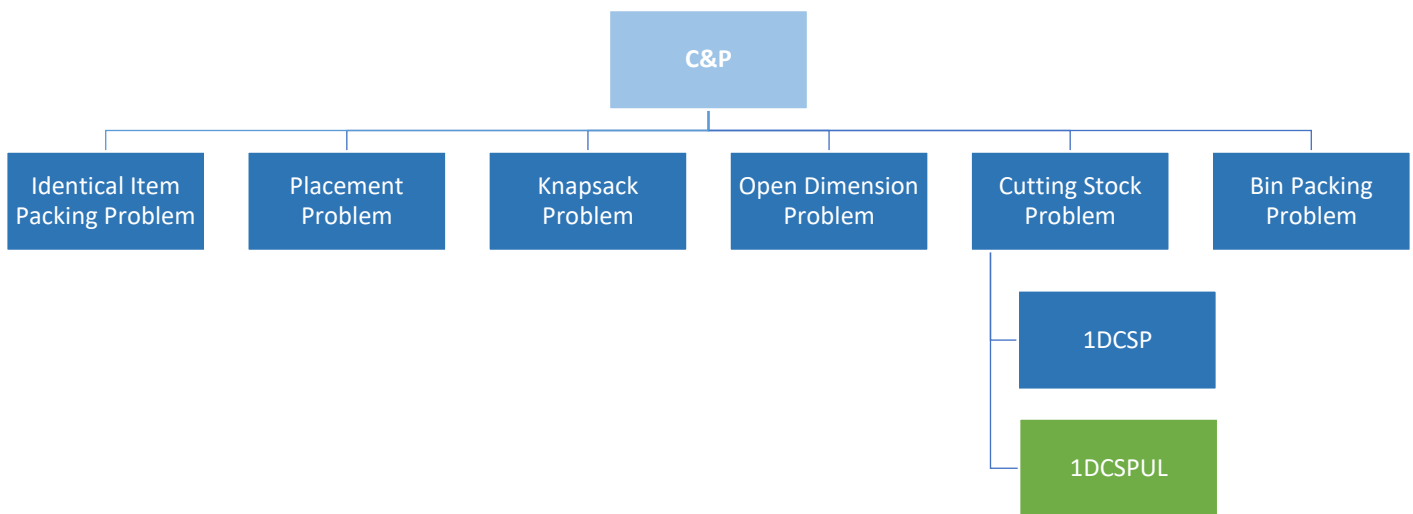


Figura 8- Categorias de C&P e subcategorias de *Cutting Stock Problem* (Wäscher et al., 2007)

O problema de corte de *stock* consiste em dividir um objeto num conjunto de itens (peças pequenas), numa quantidade específica, através de uma função objetivo, que pode representar diversas situações (Cherri, Arenales, Yanasse, Poldi, & Gonçalves Vianna, 2014).

Os problemas de 1DCSPUL, devido às suas diferentes características, quer seja por requererem otimização, minimização ou múltiplos objetos por exemplo, não possuem uma organização possível que permita a sua classificação, são por isso referidos de 1DCSPUL (*One Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers*).

Os autores (Cherri et al., 2014) que abordaram a temática em análise, dividiram as soluções estudadas em 3 tipos diferentes:

1. Métodos heurísticos não baseados em modelos matemáticos
2. Modelagem orientada para a alocação de itens
3. Modelos com abordagens orientadas para padrão de corte

Nas diferentes soluções, a base que as diferenciam do *cutting stock problem* dito generalista, é o aproveitamento das sobras.

O conceito de **sobra** baseia-se na criação de uma peça resultante do corte de um objeto, que, por sua vez, num futuro irá ser utilizada e se tornará objeto de corte.

E o conceito é mesmo ser algo utilizável num futuro, algo que reaproveite a matéria-prima. Aqui podem variar apenas as preferências do autor, empresa ou aplicação. O aproveitamento deste material, num problema de 1DCSP, tem como objetivo minimização do desperdício, maximização do aproveitamento da matéria-prima, e através disto mesmo uma redução dos custos.

Já no problema de 1DCSPUL, o objetivo vai de encontro aos anteriores, no entanto define-se como objetivo ter o mínimo ou até nenhum desperdício e reduzir ao máximo o número de cortes e sobras (Cherri et al., 2014) Logo por isso, duas soluções com mesmas sobras podem ter soluções diferentes (Figura 9).

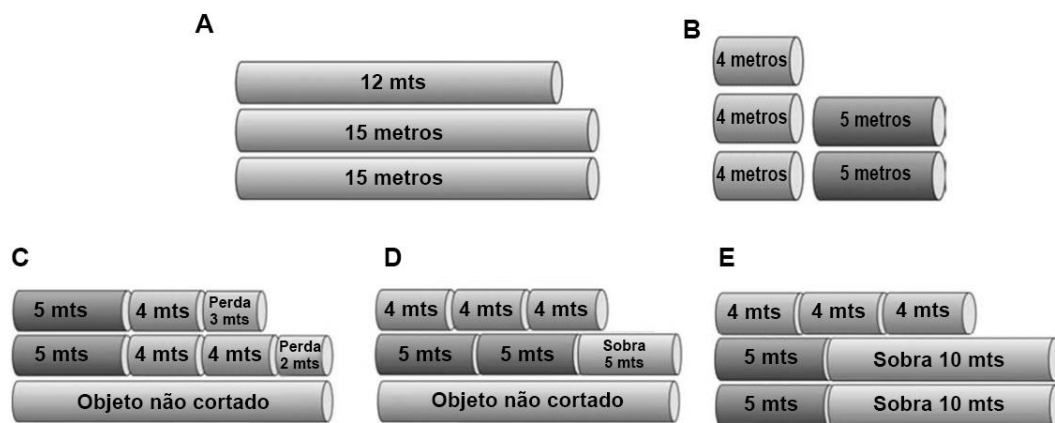


Figura 9- Problema de corte com diferentes soluções (A) Objetos (B) Peças requeridas (C) (D) (E) Diferentes soluções (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009)

Neste caso, em particular a solução (D) é a solução ideal. O que a diferencia da solução (C), é o facto de não produzir nenhum desperdício, enquanto que na solução (C) existem 5 metros de desperdício divididos em 2 peças.

Quanto à solução (E), esta produz demasiadas sobras. Mesmo podendo vir a ser utilizadas no futuro, o “excesso” de criação de sobras faz com que não seja uma solução ideal.

Desta forma os autores (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009) definiram as 3 categorias de soluções: *Ideal Solution*, *Acceptable solution* e *Undesirable solution* (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009), sendo estas atribuídas neste caso em particular às soluções (D) *Ideal Solution*, (E) *Acceptable solution* e (C) *Undesirable solution*.

Contudo, uma peça para se tornar sobra tem de respeitar alguns requisitos. Estes requisitos serão abordados nos modelos apresentados, mas a sua especificação é abordada de uma forma geral.

Isto porque os critérios que irão diferenciar sobra de desperdício terão obrigatoriamente de ser atribuídos dentro do ambiente e da realidade da empresa onde se aplica a tipologia escolhida e mais adequada.

Esses mesmos critérios podem ainda variar desde comprimento mínimo, tipo e especificidade inerente ao material. Podem igualmente serem adequados os critérios à procura ou produção atual da empresa.

Isto quer dizer que uma empresa pode adequar o critério de seleção entre sobra e desperdício para um uso num futuro próximo ou futuro longínquo.

- Caso seja uma metodologia em que as sobras são usadas num **futuro próximo**, devem então respeitar a medida mínima da peça mais pequena em produção naquele momento, para que haja a certeza que todas as sobras poderão ser reaproveitadas num curto espaço de tempo e durante o processo de fabrico atual.
- Caso se opte pelos critérios tendo em conta um **futuro longínquo**, deve ser estabelecido um mínimo de comprimento utilizável na globalidade da produção, quer seja atual ou tendo em conta histórico da produção, e toda a otimização será feita com essa restrição, que exigirá uma criação de *stock* de sobras que podem ser utilizadas a qualquer momento desde que a medida de corte esteja dentro desses mesmos parâmetros. São inúmeros os fatores que são passíveis de serem aplicados. Os mais usuais são: o “mínimo aceitável” ou o “suficientemente comprido” (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009).

3.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS NÃO BASEADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS DE PROGRAMAÇÃO

Os problemas de 1DCSPUL foram abordados, pela primeira vez, de uma forma mais aprofundada com os artigos (Scheithauer, 1991) e (Sinuany-Stern & Weiner, 1994). No entanto, na comunidade científica o primeiro método heurístico que surgiu foi o algoritmo COLA (Gradigar & Resinovi, 1997) que sofreu melhorias, originando o algoritmo CUT (Gradišar, Kljajić, Resinovič, & Jesenko, 1999).

O estudo desenvolvido foi feito numa empresa da indústria têxtil, onde os comprimentos de corte eram muito distintos.

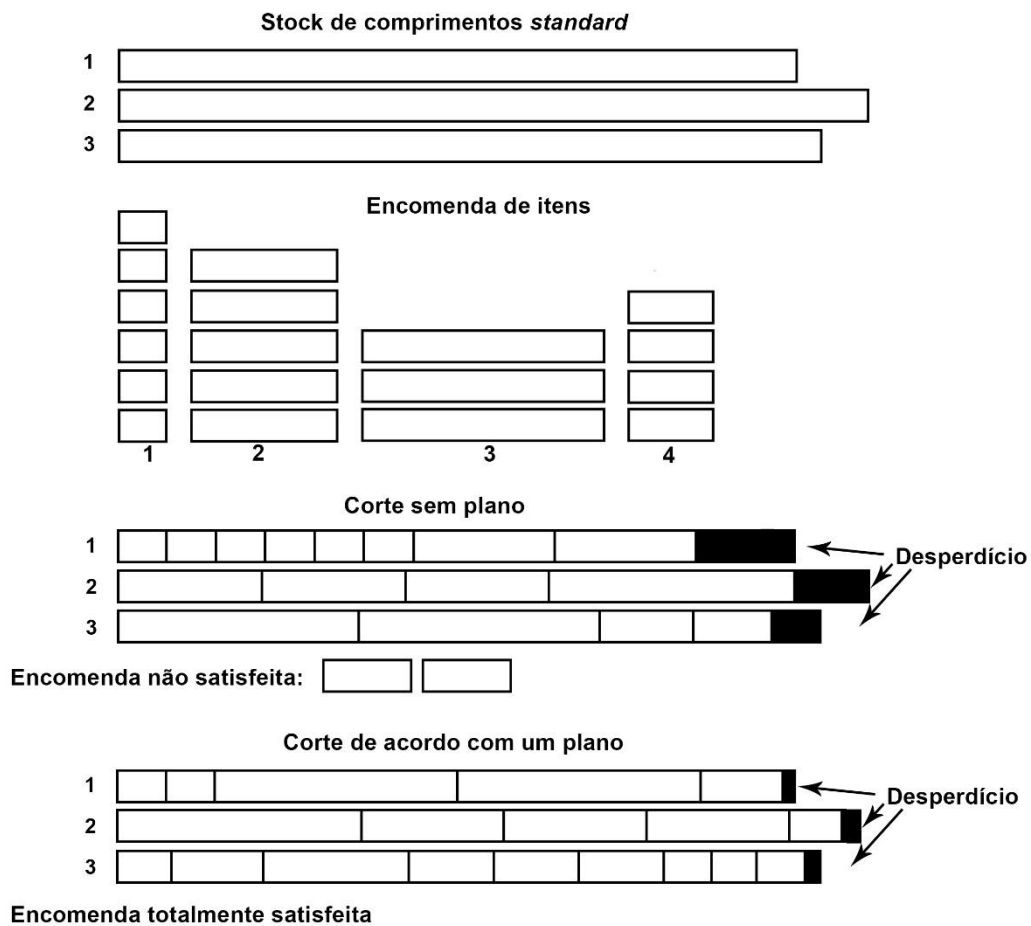


Figura 10- Problema indústria têxtil em análise (Gradigar & Resinovi, 1997)

Os autores na análise da solução do problema definiriam duas soluções possíveis para este caso em particular segundo a classificação de Dyckhoff: *item oriented* ou *pattern oriented* (Dyckhoff, 1990).

Neste caso, a escolha recaiu sobre a classificação de uma metodologia *item oriented*, uma vez que a otimização teria de ser desenvolvida individualmente para cada item. Apenas seria possível utilizar uma metodologia *pattern oriented* caso os comprimentos cortados fossem iguais ou, pelo menos, possuíssem um número reduzido de comprimentos *standard*, algo que não era a realidade nesta empresa.

Por isso mesmo, embora fossem propostos modelos matemáticos para este mesmo problema, os autores (Gradigar & Resinovi, 1997) optaram por um método heurístico, baseado em métodos exatos, que designaram por COLA (*Computerized Laying Out*).

Até então, na literatura existente, os métodos mais aproximados eram utilizados em “*bin packing problem*” como por exemplo o FFD (*First Fit Decreasing*) e o BFD (*Best Fit Decreasing*).

O algoritmo COLA consiste na classificação dos itens cortados por ordem decrescente de comprimento e para cada objeto são desenvolvidos 3 tipos de padrão de corte diferentes. Uma vez que, como foi referido anteriormente, a análise é feita individualmente, o valor utilitário usado nos padrões de corte vai se alterando conforme a produção e a procura. Sendo que no final, a escolha recai sobre o padrão de corte com menor perda de corte.

Foram feitos igualmente testes computacionais com o uso deste algoritmo que não foram descritos no artigo pelos autores, mas que alegam terem tido bons resultados.

O algoritmo CUT advém de uma melhoria e generalização do algoritmo anterior, realizada pelos mesmos autores (Gradišar et al., 1999). Este algoritmo é aplicado a situações onde o *stock* é suficiente para satisfazer a procura e em casos em que o *stock* é insuficiente. O método baseia-se igualmente em métodos exatos e novamente foram descartados os modelos matemáticos pelos autores. É aplicada então uma metodologia que permite reduzir o tempo de processamento computacional com a mesma capacidade de aproveitamento e seguindo na sua base 3 passos(Gradišar et al., 1999):

As metodologias anteriores abordam situações onde os objetos são de comprimentos muito distintos e, por isso mesmo, os autores sentiram necessidade de avançar com métodos que contemplassem essa especificidade da realidade empresarial a aplicar.

No entanto, nas situações em que é possível uniformizar algumas medidas de comprimento nos objetos, torna-se desta forma mais fácil podermos aplicar metodologias já usadas anteriormente, sendo apenas necessários no estudo do 1DCSPUL, incorporar o uso das sobras.

(Dimitriadis & Kehris, 2009) fizeram um estudo associado a uma empresa metalúrgica. A solução centra-se, neste caso, na minimização do uso de objetos de medida *standard* no processo de corte.

Para isso, é determinada um comprimento útil, que ao ser atingido no processo de corte do objeto *standard*, passa automaticamente a sobra e retorna ao *stock* inicial, e desta forma entra de imediato como objeto de corte nos processos seguintes.

Para que esta situação funcione foram usados os algoritmos FFD (*First Fit Decreasing*) e o MBS (*Minimal Bin Slack*). No primeiro algoritmo, os itens são cortados, ordem decrescente de comprimento. Ou seja, primeiro são cortadas as peças maiores até que no objeto não seja possível cortar mais nenhum item dessa mesma medida. Uma vez atingida essa situação deverá se passar para a segunda maior medida e assim consecutivamente até que o objeto seja utilizado na sua totalidade. Já no algoritmo MBS inicialmente é criada uma lista, designada lista B, que engloba os itens a cortar neste caso, classificados em ordem decrescente. A atribuição dos itens a cada objeto é determinada por um procedimento de busca que testa todos os subconjuntos possíveis, começando pelos itens de maior tamanho. Quando o processo de seleção encontra um subconjunto que preencha o objeto de forma completa, a mesma é interrompida e o preenchimento de um novo objeto é iniciado (Gupta & Ho, 1999). Nos testes computacionais realizados com estes dois algoritmos foi concluído que numa situação real em que os objetos *standard* são todos da mesma medida, o algoritmo MBS conseguiu melhores resultados.

Em 2009 (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009) vieram fazer algumas modificações nos procedimentos até então usados nos problemas de 1DCSPUL, nomeadamente nos algoritmos FFD e *Greedy*. Com essas alterações criaram aquilo que

chamaram FFD_a e $Greedy_a$, que basicamente partem do princípio de que a procura não deve exceder a capacidade do *stock* e foram feitas alterações aos padrões de corte de forma a que fossem reduzidas as perdas ou neste caso, aumentar para se se tornem sobras passíveis de utilização.

Igualmente nesse mesmo artigo, (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009) procedem a alterações na heurística RAG (Poldi & Arenales, 2009), alterando a designação para RAG_a . Na heurística apresentada, todos os desperdícios são analisados e, caso cumpram com requisitos de limites aceitáveis que são pré-definidos, então o padrão de corte é aceite. Caso contrário é rejeitado, sendo que desta forma, os itens que ficam pendentes para completar a procura, são cortados segundo o critério do algoritmo FFD_a .

Todos os algoritmos são passíveis de criarem sobras e criarem desperdício. O objetivo das soluções que vão sendo desenvolvidas é inicialmente reduzir sobras e desperdício, e não sendo possível, criar o menos número possível de sobras.

Foram feitos testes computacionais de forma a perceber se as soluções apresentadas por (Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, 2009) obtinham melhores resultados que os métodos convencionais até então apresentados. Os resultados demonstram que redução de desperdício e do *stock* de sobras, sendo melhores que os métodos convencionais.

Foi também desenvolvido um algoritmo genético híbrido (Kos & Duhovnik, 2002). Este apresenta soluções para situações onde existem objetos de diferentes comprimentos, sendo mais orientado para a indústria das estruturas metálicas.

Uma vez que aplicação era realizada em objetos de diferentes tamanhos, os autores definiram como *Bin Packing Problem with variable length* (VBPP), sendo proposta uma solução que criava um código de cromossomas e operadores genéticos.

Estes mesmos cromossomas definem-se como os objetos de corte, possuindo duas categorias: a **capacidade**, que representa a soma máxima dos tamanhos dos itens, e a segunda característica são os próprios **itens**, sendo listados aqueles que podem ser alocados com respetivos tamanhos. (Cherri, Arenales, & Yanasse, 2013).

Os autores (Kos & Duhovnik, 2002) apresentam igualmente uma solução de pré-processo a ser realizada antes do uso do VBPP, de forma a haver um maior aproveitamento das sobras. Deve por isso, ser realizado o procedimento seguinte:

- Encontrar o item mais pequeno a ser cortado e seleccionar a sobra em *stock* que possui comprimento suficiente para ser passível de uso no corte deste mesmo item. Omitir as sobras que são maiores que o maior item a ser cortado. Essas serão posteriormente utilizadas com o algoritmo VBPP (Cherri et al., 2013).

3.2 TERMINOLOGIA E NOTAÇÕES MATEMÁTICAS GERAIS

3.2.1 NOTAÇÃO MATEMÁTICA USADA NO PROBLEMA 1DCSPUL

Índices

- i : tipo de item;
- j : padrão de corte;
- k : tipo de objeto;

Stock

- K : número de tipos de objetos em *stock*;
- L_k : comprimento do objeto tipo k ;
- e_k : disponibilidade de objetos tipo k em *stock*;
- c_k : custo unitário do objeto tipo k ;

Itens

- m : número de tipos de itens;
- l_i : comprimento do tipo i ;
- d_i : procura para o item tipo i ;

Outros parâmetros

- N_k : número total de padrões de corte relativos ao objeto tipo k ;
- δ_k : comprimento limite para sobra no objeto tipo k ;
- α_{ijk} : número de itens tipo i no padrão de corte j do objeto tipo k ;

Variáveis

- x_{jk} : número de objetos tipo k cortados de acordo com o padrão de corte j (frequência);

- p_{ik} : número de itens tipo i cortados no objeto tipo k ;
- $s_k = L_k - \sum_{i=1}^m l_i p_{ik}$: sobra do objeto tipo k .

O objetivo foca-se na diminuição ou eliminação do desperdício e das sobras, e um reaproveitamento das mesmas sobras no futuro, reduzindo custos e *stock*. Para isso, os modelos apresentados determinarão a alocação de itens a objetos para que sejam atingidos estes mesmos objetivos.

O primeiro algoritmo em análise para resolução dos problemas de 1DCSPUL foi apresentado por (Sinuany-Stern & Weiner, 1994) num *workshop* em Israel sobre uma indústria que executava cortes em barras de metal e tubos. Como o próprio artigo assim o indica, foram determinados dois objetivos: **minimizar as sobras** e **juntar as sobras todas no último objeto**. Como já abordado em algoritmos anteriores, mantêm-se a diferenciação entre desperdício e sobra através de um limite mínimo de comprimento considerado aceitável, sendo que neste caso em particular seria o comprimento do objeto mais pequeno da procura.

A formulação do problema apresentada pelos autores (Sinuany-Stern & Weiner, 1994) é a seguinte:

- N : número de objetos usados durante o processo de corte

$$\text{Minimizar } N.L - \sum_{i=1}^m l_i d_i \quad (1)$$

$$\text{Maximizar } L - \sum_{i=1}^m l_i p_{iN} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m l_i p_{ik} \leq L, \quad k=1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N p_{ik} \geq d_i, \quad i=1, \dots, m \quad (4)$$

$$p_{ik} \geq 0, \quad N \geq 0 \text{ e número inteiro, } i=1, \dots, m, \quad k=1, \dots, N. \quad (5)$$

No entanto neste estudo o número de N não é conhecido e apenas se sabe que $N.L - \sum_{i=1}^m l_i d_i \geq 0$ para que os campos (3)-(5) não fiquem vazios.

É igualmente uma estratégia adequada a problemas de pequena dimensão. Em problemas de larga escala devem ser escolhidos outros métodos como, por exemplo, os que serão apresentados posteriormente.

A estratégia passa por começar com o limite inferior do número de barras necessário, dado por:

$$\left\lceil \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m l_i d_i \right\rceil$$

Os valores de N são fixos entre as linhas (2)-(5). Se uma solução for obtida então o problema encontra-se resolvido.

Caso contrário, deve se juntar mais uma unidade a N entre cada iteração, até que seja encontrada uma solução. Caso sejam consideradas as sobras, o modelo sofre alterações para que as mesmas sejam consideradas. Tendo em conta as sobras como S , o limite inferior do número de barras necessário passa a ser:

$$\left\lceil \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m d_i l_i - \sum_{q=1}^s L_q \right\rceil$$

Assim como as restrições (3) e (4) passam a apresentar respetivamente a seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m l_i p_{ik} \leq L_k, \quad k=1, \dots, N+S \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{N+S} p_{ik} \geq d_i, \quad i=1, \dots, m \quad (7)$$

Novamente na indústria do metal, mais precisamente numa empresa brasileira de estruturas metálicas para aviões usados na agricultura, (Abuabara & Morabito, 2009) desenvolveram um modelo matemático para resolução do problema de 1DCSPUL. Nesta situação é um modelo que se subdivide em dois modelos.

O primeiro modelo é uma adaptação do modelo (Gradigar & Resinovi, 1997), que é reformulado como *Mixed Integer Problem* (MIP), que consiste num modelo de programação linear. O modelo possui os seguintes parâmetros:

- M tem de ser um número largamente suficiente
- w_k é uma variável binária
- $w_k = 1$ se $s_k \leq \delta$ (desperdício)
- $w_k = 0$ se $s_k > \delta$ (desperdício)
- ε (pequeno positivo número inteiro para considerar a estrita desigualdade)

Qualquer valor inferior a δ é considerado desperdício. Sendo este o parâmetro que define o mínimo para a sobra ou desperdício, determinado por:

- $\min \{l_i, i=1, \dots, m; k=1, \dots, K\}$

O modelo apresentado por (Abuabara & Morabito, 2009) não apresenta qualquer tipo de restrição sobre o diferente número de itens a serem cortados, desde que o *stock* seja suficiente para cobrir essa mesma procura, sempre com o objetivo de minimizar o desperdício.

Modelo 1

$$\text{F.O.: minimize } \sum_{k=1}^K t_k \quad (8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m l_i p_{ik} + S_k = L_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{ik} = d_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (10)$$

$$z_k \leq \sum_{i=1}^m p_{ik}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m p_{ik} \leq M z_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (12)$$

$$(S_k - \delta) \geq -M w_k + \varepsilon, \quad k = 1, \dots, K, \quad (13)$$

$$(S_k - \delta) \leq -M(1 - w_k), \quad k = 1, \dots, K, \quad (14)$$

$$t_k - Mw_k \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (15)$$

$$t_k - Mz_k \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (16)$$

$$-s_k + t_k \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (17)$$

$$s_k - t_k + Mw_k + Mz_k \leq 2M, \quad k = 1, \dots, K, \quad (18)$$

$$-z_k + u_k \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (19)$$

$$w_k + u_k \leq 1, \quad k = 1, \dots, K, \quad (20)$$

$$z_k - w_k - u_k \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^k u_k \leq 1, \quad (22)$$

$$p_{ik} \geq 0 \text{ e inteiro, } s_k \geq 0, t_k \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ k = 1, \dots, K, \quad (23)$$

$$z_k \in \{0, 1\}, w_k \in \{0, 1\}, u_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (24)$$

Neste modelo a função objetivo (8) visa a minimização do desperdício, as linhas (9) e (10) contemplam os problemas da mochila e as restrições da procura respetivamente. As restrições (11) e (12) identificam se o objeto k é ou não utilizado no plano de corte. Já as restrições (13) - (21) verificam se a sobra que advém do processo de corte é ou não considerada como sobra, sendo que a restrição (22) limita o número de sobras que são geradas (Cherri et al., 2013).

Existe no modelo 1 uma condição que o torna inutilizável em situações onde a procura não é conhecida. Por isso mesmo foram feitos alguns melhoramentos no modelo 1, que resultaram no modelo 2 abaixo apresentado:

Modelo 2

$$\text{F.O.: minimizar } \sum_{k=1}^k t_k \quad (25)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m l_i p_{ik} \leq L_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^k p_{ik} = d_i, \quad k = 1, \dots, K, \quad (27)$$

$$\delta u_k \leq L_k z_k - \sum_{i=1}^m l_i p_{ik}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (28)$$

$$L_k z_k - \sum_{i=1}^m l_i p_{ik} \leq t_k + u_k M, \quad k = 1, \dots, K, \quad (29)$$

$$\sum_{k=1}^k u_k \leq 1, \quad (30)$$

$$p_{ik} \geq 0 \text{ e inteiro, } t_k \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, K, \quad (31)$$

$$z_k \in \{0, 1\}, \quad u_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (32)$$

São ínfimas as modificações em relação ao modelo 1, no entanto existe a consideração do critério de minimização do total do comprimento dos objetos cortados.

A função objetivo mantém-se igual, assim como as restrições (26) (27) e (30). As restrições (28) e (29) são as referentes às sobras e desperdício no padrão de corte.

Foi igualmente proposta uma alternativa para redução do desperdício com a não criação de novas sobras, onde a função objetivo do modelo 2 passaria a figurar como:

$$\text{F.O.: Minimizar } \sum_{k=1}^k t_k + \frac{\sum_{k=1}^k L_k z_k}{\sum_{k=1}^k L_k}$$

De novo através dos testes computacionais realizados com os dois modelos, verificou-se que o modelo 2 produziu melhores resultados na redução do desperdício e redução do *stock* de sobras, quer em relação ao modelo 1, quer em relação às soluções já existentes na empresa.

(Trkman & Gradisar, 2007) também desenvolveram um modelo matemático que visava a redução do desperdício e o custo das sobras e o seu retorno para *stock*.

A questão dos custos é algo implícito numa otimização que visa reduzir desperdícios e implementação de melhorias.

No entanto, nos casos anteriores essa situação está apenas implícita, sendo que neste caso os autores identificam realmente a redução de custos de produção como sendo o seu objetivo a par da redução de desperdício.

Os princípios do problema de 1DCSPUL mantêm-se na aplicação a situações em que existem comprimentos diferentes nos objetos, assim como nas sobras que são adicionadas ao *stock* como novos objetos.

Os autores (Trkman & Gradisar, 2007) identificaram que as resoluções dos problemas existentes se baseavam na sua essência, na otimização em encomendas únicas, dentro de um período definido, seguindo os parâmetros de uma orientação para o padrão de corte em que se aplicam as heurísticas e os métodos exatos, dentro da base clássica do *Column Generation Method* (Gilmore & Gomory, 1961).

Por isso mesmo, os autores sentiram a necessidade de desenvolver um método que não se baseasse unicamente numa simples encomenda, mas sim para encomendas em períodos consecutivos, que conseguiria abarcar de uma forma mais completa a necessidade das empresas.

O modelo desenvolvido foi estruturado da seguinte forma, sendo que existem alguns parâmetros a adicionar aos descritos no capítulo 2.1.2, e que são descritos em baixo:

- c : custo unitário do material perdido
- p_r : custo da sobra que volta para *stock*
- g_k : indica se a sobra s_k volta ou não para *stock*

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se e só se } s_k \geq \delta \text{ e } (s_k c) \geq p_r \\ 0, & \text{Caso Contrário} \end{cases} \quad (34)$$

- y_k : indica se o objeto k é ou não usado no plano de corte

$$y_k = \begin{cases} 0, & \text{se o objeto } k \text{ é usado o plano de corte} \\ 1, & \text{Caso Contrário} \end{cases} \quad (35)$$

- t_k : comprimento do desperdício no objeto k , $k = 1, \dots, K$:

$$t_k = \begin{cases} s_k, & \text{se } y_k = 0 \text{ e } = 0 \\ 0, & \text{Caso Contrário} \end{cases} \quad (36)$$

- O comprimento mínimo do desperdício para que possa voltar ao *stock*, é definido por $\delta \geq \{ \min\{l_i, i=1, \dots, m\}, p_r/c \}$, assumindo que $\min\{L_k, k = 1, \dots, K\} \geq \min\{L_k, i = 1, \dots, m\}$.

Segundo os parâmetros apresentados, a formulação do problema é a seguinte:

$$\text{F.O.: Minimizar } \sum_{k=1}^k (t_k c + g_k p_r) \quad (37)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m l_i p_{ik} + s_k = L_k(1 - y_k), \quad k = 1, \dots, K, \quad (38)$$

$$\sum_{k=1}^{mk} p_{ik} = d_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (39)$$

$$\delta - s_k + \delta(g_k - 1) \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (40)$$

$$s_k - t_k - (g_k + y_k)(\max L_k) \leq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (41)$$

$$p_{ik} \geq 0 \text{ e inteiro, } s_k \geq 0, t_k \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, K, \quad (42)$$

$$g_k \in \{0, 1\}, y_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (43)$$

Neste método apresentado a procura é desconhecida ou, pelo menos, pode ser considerada uma probabilidade mediante os valores apresentados no passado. E a restrição (39) é correspondente a essa mesma procura, sendo que a restrição (38) corresponde ao problema da mochila.

Por fim os testes computacionais mostraram que o método proposto apresentou resultados satisfatórios entre os métodos já existentes, reduzindo os objetos em *stock* e redução das sobras para *stock*, assim como redução do desperdício. O que igualmente vai de encontro ao objetivo proposto da redução dos custos de produção.

Por fim, é apresentado o modelo matemático de resolução dos problemas de 1DCSPUL mais recente, sendo desenvolvido por (Arenales et al., 2015). Este modelo possuiu uma formulação orientada para o objeto, fazendo um aproveitamento da diversificação dos objetos em *stock*, pois a diversidade de tamanhos reduz o desperdício.

Este modelo possui a vantagem promissora de enviar as sobras como objetos reduzidos para o *stock*. Enquanto objeto, é avaliada a possibilidade de utilização das mesmas. Caso seja vantajoso, as sobras são utilizadas.

Os princípios do CSP, mesmo que sem a contemplação das sobras, mantêm se na base dos modelos apresentados e este modelo não é exceção. Existe uma lista de tamanhos

de itens a serem cortados de um lado. Do outro lado uma lista de objetos com tamanhos definidos onde serão cortados os mesmos itens. E por isso os autores definiram 3 pressupostos práticos:

- Qualquer objeto *standard* pode ser completamente cortado ou parcialmente cortado para gerar dois novos objetos: um objeto reduzido a ser cortado e uma sobra para ser mantida em *stock* para futuras utilizações (Arenales et al., 2015);
- Qualquer sobra tem o tamanho pré-definido (Arenales et al., 2015);
- O número total de novas sobras é limitado.(Arenales et al., 2015)

Os **parâmetros** utilizados no modelo apresentado são os seguintes:

S : número de tipos de objetos *standard*. Tipo de objeto é descrito por s , $s \in \{1, \dots, S\}$;

R : número de tipos de sobras em *stock*; Tipo de sobra é descrito por $S+s$, $s \in \{1, \dots, R\}$;

e_s : número de objetos/sobras do tipo s disponíveis em *stock*, $s = 1, \dots, S + R$;

L_s : comprimento do objeto/sobra tipo s , $s = 1, \dots, S + R$;

m : número de tipos de itens encomendados;

d_i : procura para o item tipo i , $i = 1, \dots, m$;

l_i : comprimento do item tipo i , $i = 1, \dots, m$;

J_s : conjunto de padrões de corte para o objeto tipo s , $s = 1, \dots, S + R$;

$J_s(k)$: conjunto de padrões de corte para os objetos *standard* tipo s com sobras tipo $S + k$, $k = 1, \dots, R$, $s = 1, \dots, S$;

a_{ijs} : número de itens tipo i no padrão de corte j para objetos tipo s , $i = 1, \dots, m$, $s = 1, \dots, S + R$, $j \in J_s$;

a_{ijsk} : número de itens tipo i no padrão de corte j para objetos tipo s e sobras tipo $S + k$, $i = 1, \dots, m$, $k = 1, \dots, R$, $s = 1, \dots, S$, $j \in J_s(k)$;

c_{js} : desperdício do corte do objeto/sobra s de acordo com o padrão j , $s = 1, \dots, S + R$, $j \in J_s$;

c_{jsk} : desperdício do corte do objeto s de acordo com o padrão j gerando a sobra tipo $S + k$, $s = 1, \dots, S$, $k = 1, \dots, R$, $j \in J_s(k)$;

U: número máximo de sobras

Variáveis:

x_{js} : número de objetos tipo s cortados de acordo com o padrão j , $s = 1, \dots, S + R$, $j \in J_s$;

x_{jsk} : número de objetos tipo s cortados de acordo com o padrão j gerando a sobra tipo $S + k$, $s = 1, \dots, S$, $k = 1, \dots, R$, $j \in J_s(k)$;

Observações acerca do modelo:

- O tamanho de um objeto reduzido obtido pelo corte parcial de um tipo de objeto s com o restante tipo $S + k$ é dado por: $L_s - LS + k$. Apenas objetos *standard* podem ser cortados com uma sobra. (Arenales et al., 2015);
- Embora na observação anterior qualquer objeto *standard* possa ser usado para gerar uma sobra, é possível permitir sobras de apenas um tipo de objeto (Arenales et al., 2015);
- As sobras podem ser limitadas a apenas um tamanho (Arenales et al., 2015).

Após a descrição de todos os parâmetros necessários para a compreensão do modelo desenvolvido pelos autores (Arenales et al., 2015), é descrita em baixo a sua formulação.

$$\begin{aligned} \text{F.O.: Minimizar } f(x) &= \sum_{s=1}^S \sum_{j \in J_s} c_{js} x_{js} + \\ &\alpha' \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^R \sum_{j \in J_s(k)} c_{jsk} x_{jsk} + \alpha'' \sum_{s=S+1}^{S+R} \sum_{j \in J_s} c_{js} x_{js} \end{aligned} \quad (44)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S \sum_{j \in J_s} a_{ijs} x_{js} + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^R \sum_{j \in J_s(k)} a_{ijsk} x_{jsk} + \sum_{s=S+1}^{S+R} \sum_{j \in J_s} a_{ijs} x_{js} &= d_i, \\ i &= 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (45)$$

$$\sum_{j \in J_s} x_{js} + \sum_{k=1}^R \sum_{j \in J_s(k)} x_{jsk} \leq e_s, \quad s = 1, \dots, S, \quad (46)$$

$$\sum_{j \in J_s} x_{js} \leq e_s, \quad s = S+1, \dots, S+R, \quad (47)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^R \sum_{j \in J_s(k)} x_{jsk} - \sum_{s=S+1}^{S+R} \sum_{j \in J_s} x_{js} \leq U - \sum_{s=S+1}^{S+R} e_s, \quad (48)$$

$$x_{js} \geq 0, \quad s = 1, \dots, S+R, j \in J_s,$$

$$x_{jsk} \geq 0, \quad k = 1, \dots, R,$$

$$s = 1, \dots, S, j \in J_s(k), \quad (49)$$

A função objetivo (44) determina a minimização do desperdício, no corte de objetos *standard* com ou sem criação de sobras, assim como possibilidade da utilização das sobras provenientes de cortes anteriores.

Os fatores $\alpha' \geq 1$ e $\alpha'' \leq 1$ presentes na função objetivo definem se é atrativo ou não criar uma nova sobra no objeto *standard* ou se devemos utilizar uma sobra existente.

As restrições (45) (46) e (47) abordam a questão da procura e do *stock*, enquanto a restrição (48) limita o número de sobras para o próximo período, que não pode ser superior ao valor determinado por U.

Por fim, a restrição (49) garante a não-negatividade e a inclusão das variáveis x_{js} e x_{jsk} . Esta melhoria nos modelos 1DCSPUL originou um modelo flexível. Este permite o uso ou não de sobras anteriores ou objetos *standard* dentro do próprio modelo, segundos os limites pré-estabelecidos. Admite ainda que o operador possa fazer alterações nesses mesmos limites e permitir que sobras sejam retiradas do corte de sobras anteriores, algo que os autores (Arenales et al., 2015) não aconselham pois, desta forma, haverá uma maior criação de *stock* de sobras e um aumento dos tamanhos existentes, exigindo desta forma um controlo mais rigoroso do *stock* existente. Deve por isso dar-se prioridade à criação de sobras apenas em objetos *standard*.

No seguimento ao que foi anteriormente mencionado, foram feitos recentemente alguns desenvolvimentos a modelos existentes. (Tomat & Gradišar, 2017) abordam uma situação que até então tem sido posta de parte no estudo dos problemas de corte com o uso de sobras: o controlo do *stock* de sobras.

A criação de sobras passíveis de serem usadas no futuro e posteriormente integrarem no processo de corte pode ser benéfica, no entanto, se o processo de fabrico avançar com ritmos lentos ou os itens não possuírem no futuro os comprimentos que permitam a utilização das sobras, existe a probabilidade de elevados níveis do *stock* de sobras e custo desse mesmo armazenamento. Contudo, se o *stock* e a diversidade de comprimentos forem maiores, pode ser feita uma melhor otimização do processo. Por isso, o objetivo dos autores (Tomat & Gradišar, 2017) passa por encontrar um valor quase ideal de *stock* para colmatar as duas situações, e ainda como controlar o mesmo.

Os propósitos apresentados no artigo (Tomat & Gradišar, 2017) passam por:

1. Reformular o 1DCSPUL de uma forma que seja possível controlar a quantidade de sobras utilizáveis em *stock*;
2. Propor um método de otimização das sobras em *stock*;
3. Propor um método mais preciso para testar os algoritmos de 1DCSPUL que simulam encomendas consecutivas.

O problema é definido pela base dos problemas de 1DCSPUL, com a necessidade do corte de uma lista de itens em objetos *standard* e sobras existentes, de forma a minimizar os desperdícios e para que a quantidade ideal de sobras em *stock* seja mantida aproximadamente. Uma vez que a próxima encomenda depende das sobras resultantes das anteriores, a minimização não pode ser limitada a uma única encomenda (Tomat & Gradišar, 2017).

Terminologias usadas:

l_i : comprimento dos itens;

p_i : número de peças necessárias de l_i ;

L_j : comprimento das barras no local j -th no *stock*; $j = 1, \dots, m$. A capacidade da empresa é limitada a m locais;

S_j : Novas barras na medida standard no local j -th;

δ_j : Sobra de L_j ;

x_{ij} : número de peças l_i cortadas a partir de L_j ;

t : limite para o desperdício/sobra. Uma peça $\geq t$ é considerada sobra. Se for $<$ é desperdício;

U_{opt} : Nível ótimo aproximado de sobras em *stock*;

w_j : Desperdício produzido numa barra *standard*;

z_j : Desperdício produzido numa sobra;

u_j : Sobra produzida numa barra *standard*;

v_j : Nova sobra produzida numa sobra existente;

Sendo assim o modelo geral para a formulação do problema apresenta-se da seguinte forma:

$$\text{F.O.: Minimizar } \sum_{j=1}^m (f_1 \cdot \delta_j \cdot (w_j + z_j) + \delta_j \cdot u_j - f_2 \cdot (L_j \cdot z_j + (L_j - \delta_j) \cdot v_j)) \quad (50)$$

Sujeito a:

$$\delta_j = L_j - \sum_{i=1}^n (l_i x_{ij}), \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = p_i, \quad (52)$$

$$T \geq l^{min}, \quad (53)$$

$$x_{ij} \geq 0; L_j \geq \delta_j \geq 0$$

A função objetivo (50) pretende minimizar o desperdício produzido e reduzir a diferença entre as sobras produzidas e usadas (Tomat & Gradišar, 2017).

A restrição (51) refere-se ao tamanho da sobra da barra j -th, enquanto que a restrição (52) enquadra a procura.

Por fim, a (53) define a reutilização dos desperdícios, em que l^{min} é o comprimento do objeto mais pequeno. Logo o risco da sobra, que terá obrigatoriamente superior a esse valor, não ser utilizada no futuro é reduzido.

Igualmente no modelo apresentado, as variáveis w_j , z_j , u_j , e v_j são variáveis binárias, ou seja, tomam o valor 0 ou 1 que, no caso de serem 1, e apenas nesta situação, possuem estas indicações:

- w_j desperdício é produzido de uma barra *standard* j ;
- z_j desperdício é produzido de uma sobra;
- u_j Sobra produzida de uma barra *standard* j ;
- v_j Nova sobra é produzida de uma sobra anterior.

Existe ainda a observação de que, caso $u_j = 1$, origina o seguinte:

$\delta_j < L_j$ (a barra j -th é cortada)

$t < \delta_j$ (a sobra é reutilizada na próxima encomenda)

$L_j < S_j$ (a barra j -th L_j é uma sobra de situações anteriores; o seu comprimento é mais pequeno que a sua medida *standard*)

Da mesma forma $v_j = 1$ implica que $t < \delta_j < L_j$, e $L_j = S_j$, assim como $w_j = 1 - u_j$ e $z_j = 1 - v_j$.

As variáveis apresentadas de f_1 e f_2 referem-se à soma ponderada de alguns fatores, neste caso ao peso do desperdício e ao peso das sobras usadas respetivamente. No caso do f_2 , após a otimização da encomenda s -th naquele período de tempo, de ser atualizado para:

$$f_2 = (\sum_{j=1}^m \delta_j (u_j + v_j)) / U_{opt}$$

Surge, entretanto, nesta nova formulação de f_2 uma nova variável designada de U_{opt} . Esta refere-se ao valor ótimo aproximado de sobras em *stock*, sendo usada posteriormente num modelo de problema de multicritério. O modelo seguinte apresentado pelos autores (Tomat & Gradišar, 2017) pretende calcular o valor ótimo aproximado de t , neste casto t_{opt} , e das sobras em *stock* U_{opt} .

A heurística apresentada segue os seguintes passos:

1. **Definir o valor de e** - é definido pelo decisor e é o limite inicial de t e deve ser menor que t_{opt})
2. **Definir o valor de i** - número de instâncias problemáticas na experiência. Deve ser suficientemente alto de forma a que a certo ponto o número de sobras usadas e produzidas numa só instância sejam iguais)

h_0 : maxint (máximo valor inteiro presente no computador. h_0 é o valor inicial da função critério)

$g \leftarrow 0$ (número de experiências. Uma experiencia é a geração e otimização de r encomendas)

3. **Repetir** (experiências são repetidas enquanto o valor da função critério diminui. Uma vez que comece a aumentar, o mínimo aproximado é encontrado em h_{g-1} com o limite t_{opt})

$g \leftarrow g + 1$

4. **Stock vazio de sobras**

5. **Definir o *stock* de barras *standard*** (inicialmente todo o *stock* é composto por barras de medida *standard*)

6. **Repetir r vezes**

- a. Gerar nova encomenda
- b. Resolver o 1DCSPUL e guardar os resultados
- c. Gerar uma nova entrega de barras *standard* e adicionar ao *stock* (reabastecer o número de barras completas que foram previamente cortadas)
- d. Juntar as sobras ao *stock* existente

7. **Finalizar a repetição**

$U_g \leftarrow 0$ (U_g é o número de sobras em *stock* depois da experiência g -th. Valor inicial é 0)

$j \leftarrow 1$

8. **Enquanto $j \leq m$**

- a. Se $\delta_j > L_j \wedge \delta_j \geq t$ então $U_g \leftarrow U_g + 1$

b. Finaliza se $j \leftarrow j + 1$

9. Calcular o valor da função objetivo h_g

$t \leftarrow t + \Delta$ (Δ é o passo do qual o limite t vai aumentando entre cada experiência)

10. Até que $h_{g-1} < h_g$

$$t_{opt} = e + (g - 1) \cdot \Delta$$

$$U_{opt} = U_{g-1}$$

Os valores de t_{opt} e U_{opt} são resultantes de uma série de experiências, gerando aleatoriamente encomendas r , que são abastecidas por medidas standard e sobras em *stock*.

O resultado não nos fornecerá o valor ótimo, mas sim aproximado a isso, pois os valores dependerão da heurística aplicada para resolver o problema de 1DCSPUL que não garantem resultados ótimos. O valor de Δ que deve ser abrangente o suficiente para reduzir o tempo computacional, no entanto, quanto mais abrangente menos assertivos são os resultados.

A função objetivo pode ser melhorada adicionando as variáveis t_{opt} e U_{opt} como parâmetros de entrada, garantindo desta forma que os valores estarão inseridos automaticamente no algoritmo. Com estas mesmas variáveis é proposto o controlo do *stock* de sobras em *stock*, que neste caso, os autores utilizaram numa repetição de dois passos citados abaixo:

Passo 1: É feito um estudo sobre a situação prática. De um ponto de vista, as características básicas de uma encomenda são definidas: o intervalo em que o número de itens, os comprimentos dos itens e o número de peças estão situados. De outro ponto de vista, o número de diferentes barras *standard* em *stock*, os comprimentos e o número de peças são definidos.

Com base nos dados recolhidos, o valor e e r da heurística anterior são estimados, as barras *standard* são determinadas e os parâmetros para a geração da encomenda são selecionados. A heurística é aplicada e os resultados são t_{opt} e U_{opt} (Tomat & Gradišar, 2017);

Passo 2: O algoritmo 1DCSPUL selecionado é usado na prática para calcular o plano de corte até que o número exato de sobras em *stock* seja substancialmente divergente de U_{opt} .

Nesse caso, o passo 1 é repetido, sendo a decisão sobre a diferença crítica entre o número exato de sobras em *stock* e U_{opt} deixada a cargo do decisor (Tomat & Gradišar, 2017).

O método apresentado mostra-se importante e uma ferramenta necessária para o desenvolvimento da resolução dos problemas de 1DCSPUL.

No entanto não pode ser aplicado a apenas uma encomenda, sendo a sua principal vantagem, a otimização de múltiplas encomendas em múltiplos períodos de tempo. Apenas desta forma o aproveitamento das sobras em *stock* permite os resultados obtidos nos diversos testes realizados com este método.

A questão inicialmente descrita acerca da dualidade entre a vantagem e desvantagem de possuir *stock* de sobras em excesso (permite ter maior quantidade de comprimentos, mas exige maior custo de provisionamento e elevado *stock*) deixou de existir, pois a quantidade de *stock* é controlada e situa-se dentro de quantidades aproximadamente ideais. Desta forma, essa dualidade tende a ser neutralizada com o decorrer das encomendas.

Por fim, o algoritmo de 1DCSPUL usado é um fator importante, uma vez que este sistema depende igualmente dos resultados obtidos pelo método escolhido, sendo recomendado testar com vários algoritmos de forma a perceber qual deles obtém melhores resultados.

TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 METODOLOGIA

4.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

4.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA FORMULAÇÃO EM EXCEL

4.5 RECOLHA DE DADOS

4.6 RESULTADOS COMPARATIVOS

4.7 DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE

4.8 UTILIZAÇÃO DO MODELO COM PADRÕES DE CORTE

4 TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 METODOLOGIA

Este trabalho foi iniciado através do levantamento de necessidades junto da empresa Alu Gold, S.A. de forma a perceber qual a existência de problemas com necessidade de soluções imediatas.

Após ter sido determinado o problema a solucionar, neste caso referente à otimização de corte de barras, foi realizada uma revisão bibliográfica. Durante a pesquisa, verificou-se a existência de um enorme desenvolvimento na área de corte e nos últimos anos englobando o uso de sobras provenientes dos cortes realizados.

Posteriormente, foi desenvolvida uma ferramenta de apoio ao operador, de forma a que através de programação linear, fosse possível otimizar o corte dos itens necessários para colmatar a necessidade diária. Dessa forma foi feita uma análise comparativa de 3 dias de corte na linha atual, tendo em conta os recursos utilizados pelo operador com os métodos atuais. Esses resultados foram comparados com os resultados da ferramenta desenvolvida, de forma a comprovar a eficiência de corte, minimização do desperdício e as vantagens da implementação.

No entanto, abordando o problema de corte de um prisma distinto, aplicado a uma futura linha e não a uma linha já em funcionamento, foi utilizada a ferramenta com um caráter exploratório, para de uma forma prévia, serem determinados padrões de corte. O objetivo desses padrões de corte, passa pela tentativa de minimizar antecipadamente o desperdício. Foram analisadas situações através de vários pontos de vista, de forma a que sejam criados os padrões mais eficientes.

Com os padrões determinados, será testada a utilização dos padrões, através de um modelo de *Trim Loss*, na aplicação de casos fictícios gerados de forma aleatória para que não haja qualquer tipo de influência nos dados usados

Após os testes computacionais realizados com os dados recolhidos, foram analisados os resultados obtidos e demonstradas as devidas conclusões, mediante as soluções apresentadas.

4.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Analisando-se apenas as questões associadas aos problemas de 1DCSPUL, verifica-se que existe uma diversidade imensa de situações onde é possível aplicar os métodos e heurísticas apresentadas.

Em cada uma das realidades a aplicar e objetivos a atingir, existem especificidades que permitem identificar quais os métodos mais acertados.

No caso em análise nesta dissertação, e uma vez que se trata de uma empresa com pequena dimensão, o problema de corte não corresponde a situações complexas, logo a aplicação dos métodos exatos será a escolha mais adequada.

Não existe grande diversidade nas barras utilizadas, sendo que apenas serão analisados os dois perfis usados nos novos produtos. Estamos, por isso, diante de um problema que será resolvido, como acima mencionado, através de métodos exatos.

Caso haja alguma situação em que não seja possível a aplicação de métodos exatos, existe a hipótese da conjugação dos métodos matemáticos, e desta forma conseguir abranger a totalidade do problema e conseqüentemente, resolver da forma mais otimizada os objetivos propostos; neste caso, otimização do corte produzindo o menor número de sobras e utilização das mesmas em cortes futuros.

Neste capítulo será apresentada a formulação que permitirá o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio no dia-a-dia para o operador de corte, de forma a que sejam atingidos os objetivos propostos para o problema exposto.

No seguimento da revisão literária focada no problema de corte unidimensional, será aplicado neste caso específico, um modelo de programação linear inteira, método esse que será desenvolvido no software Excel e a ferramenta Open Solver, criando uma ferramenta capaz de gerar os modelos de corte nos objetos em stock e sobras, para satisfazer as necessidades diárias de itens da empresa. A ferramenta Open Solver foi a ferramenta escolhida, em primeiro lugar por ser gratuita e por isso não imputar qualquer custo à empresa, assim como por não possuir qualquer tipo de limitação em termos de uso. Este método de programação linear inteira torna-se um modelo eficiente e capaz de resolver o problema da melhor forma possível.

4.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Utilizando a base dos modelos anteriormente apresentados, será necessário cortar nos objetos (barras de alumínio) com um comprimento LO_j $j = 1, 2, 3, \dots, m$, a quantidade de itens necessária para satisfazer a procura, sabendo que os itens possuem comprimentos LI_i $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Abaixo, apresentam-se as notações necessárias para a formulação matemática do problema:

LI_i : comprimento dos itens ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

P_i : número de itens necessárias de LI_i ;

LO_j : comprimento dos objetos em *stock* ($j = 1, 2, 3, \dots, m$);

δ_j : Sobra de LO_j ;

x_{ij} : número de itens LI_i cortados a partir de LO_j ;

ESP: Espessura do disco de corte;

T: limite para o desperdício/sobra. Uma peça $\geq T$ é considerada sobra. Se for $<$ é desperdício;

4.3.1 FORMULAÇÃO

Variáveis de decisão

- Y_j : define se o objeto LO_j é utilizado ou não:

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o objecto } j \text{ é usado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

- X_{ij} : define o número de itens com o comprimento LI_i no objeto LO_j

$$X_{ij} \geq 0, \text{ e inteiro, } i: 1, 2, 3, \dots, n; j: 1, 2, 3, \dots, m.$$

Função objetivo

A função objetivo do problema apresentado passa por minimizar o desperdício.

$$F.O.: \text{Minimizar } \sum_{j=1}^m (LO_j - \sum_{i=1}^n ((LI_i \cdot X_{ij}) - (ESP \cdot (X_{ij} - 1))))$$

De forma a que não seja utilizado um número elevado de barras de medida standard, não foi estabelecido nenhum valor mínimo para o desperdício. Desta forma, apenas após a determinação do desperdício, é realizada a diferenciação através do valor de T.

Caso $\delta_j \geq T$ é sobra, caso seja $\delta_j < T$ é desperdício.

Se o tamanho mínimo fosse colocado como restrição, o modelo iria optar por usar um maior número de barras de comprimento standard de forma a que todo o desperdício fosse reaproveitado. Sendo assim iria criar um *stock* elevado de sobras e uso excessivo de matéria-prima bruta.

Restrições

- Restrição de satisfação da procura

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = P_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

- Restrição do comprimento dos objetos (oferta)

$$LO_j - \sum_{i=1}^n (LI_i \cdot X_{ij}) - \sum_{i=1}^n (X_{ij} - 1) \cdot ESP \geq 0$$

No momento em que o modelo é utilizado para a determinação dos padrões de corte, umas das restrições é alterada. De forma a que a restrição da procura seja mais abrangente, assim como seja capaz de criar padrões mais próximos do objetivo máximo de minimização do desperdício, deve ser alterada para:

- Restrição de satisfação da procura para padrões de corte

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq P_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA FORMULAÇÃO EM EXCEL

Determinada a formulação a mesma será implementada no software Excel com apoio da ferramenta Open Solver.

Antes de ser criado o modelo de programação linear que irá fornecer os resultados necessários, foi essencial desenvolver uma ferramenta completa que seja capaz de ser um auxílio ao operador e melhora quer em termos de rapidez quer em termos de simplicidade de uso. Esta ferramenta possui ações preliminares que irão fornecer informações ao operador sobre o plano de produção a produzir, assim como irão criar filtros de dados, para alimentar o modelo apenas com o estritamente necessário.


Dentro das informações preliminares, foram criadas fichas de ordem de trabalho a serem impressas com as informações sobre os produtos a cortar e respectivas medidas e quantidades, assim como os itens necessários para satisfazer a procura (fig.14). Neste mesmo documento, o operador deve informar a quantidade produzida, de forma a garantir a confirmação da produção, assim como, caso hajam produtos não conformes, deve assinalar os mesmos e será feita uma produção individual com alteração do stock, seja de sobras, caso haja em stock, seja de material standard.

Além disso, serão igualmente impressos os planos de corte que, mediante os resultados do modelo irão fornecer as informações relativas ao corte. Neste caso existirá uma lista de planos de corte onde irão constar, comprimento da barra, quantidade de itens a cortar por cada medida e medida da sobra resultante do corte (fig.15).

No caso específico da sobra, esta só irá surgir no campo destinado, caso a mesma seja superior ao tamanho mínimo definido para cada perfil como limite entre sobra e desperdício. Caso o valor seja 0, o material sobrando do corte é desperdício.

Estes planos de corte irão resultar dos dados fornecidos pelo modelo, enquanto que a ficha de ordem de trabalho é alimentada pelo operador mediante a necessidade diária.

ORDEM DE TRABALHO



Operação Corte Data 08/10/2018
 Nº 1

Plano Produção: Operação Corte

Artigo	Portão	Dim.	3500x1600	Qtd.	5
Artigo	Portão	Dim.	4000x1800	Qtd.	5
Artigo	Portão de Passagem	Dim.	900x2000	Qtd.	5
Artigo	Portão de Passagem	Dim.	1200x1600	Qtd.	5
Artigo		Dim.		Qtd.	

Necessidades Produção Intermédia

ADL3001				ADL3003			
Medida	Quantidade Corte	Cortado	Não Conforme	Medida	Quantidade Corte	Cortado	Não Conforme
1600	30			1420			
1800	20			1670	20		
2000	30			1920	20		
				2170			
				2420			
				776	10		
				1076	10		

Figura 13- Ficha de Ordem de Trabalho

Barra	Medida	Qtd
	1420	
	1670	
	1920	
	2170	
	2420	
	776	
	1076	
	Sobra	

Medida da barra

Número de itens a cortar por cada medida

Tamanho da sobra

Figura 15- Exemplo de um Plano de Corte

O modelo desenvolvido possui os dados dos produtos standard da futura linha, no entanto pode ser alterado e aplicado a outras medidas.

De forma a não sobrecarregar o modelo com stock desnecessário, foi criado um filtro de forma que, mediante a medida mínima necessária para satisfazer a procura, apenas sejam consideradas barras em stock superiores a essa mesma medida. O stock bruto, o que engloba todas as existências reais na empresa, é alimentado manualmente, quer de barras inteiras quer das sobras que advêm dos cortes anteriores. Após a aplicação do filtro obtemos o stock líquido, aquele que deve realmente ser usado no modelo.

A obtenção de resultados foi limitada a um tempo máximo de 10 minutos, caso não seja possível ao modelo apresentar o resultado em tempo inferior.

Esta limitação apenas foi usada aquando do uso da ferramenta como apoio na otimização de corte em situações do dia-a-dia. No caso da determinação dos padrões de corte, não foi estabelecido nenhum limite na obtenção dos resultados, de modo que haja a garantia que os resultados obtidos são definitivamente os melhores possíveis e com melhores resultados na minimização do desperdício.

4.5 RECOLHA DE DADOS

De forma a realizar uma análise comparativa entre a situação atual da empresa e as melhorias possíveis com a implementação do modelo desenvolvido, foi realizada uma recolha de dados durante 3 dias de produção da linha atual.

Após a recolha de dados, foram listados os itens relativos às necessidades diárias dos perfis ADL3001 e ADL3003, que foram a realidade do operador nesses mesmo 3 dias.

Durante a observação, o operador executou todo o processo de corte usando as ferramentas atuais disponíveis, e foram registados todos os consumos, quer de barras de medidas standard, quer de sobras e desperdício. Esses valores estão igualmente incluídos nas tabelas de levantamento de dados sobre a produção executada.

Foi igualmente feito um estudo produtivo de forma a perceber quais as quantidades máximas diárias de produção e diferentes tipologias. Esse levantamento mostrou que deve ser contemplado um valor máximo de 20 produtos por dia. A nova linha de produção irá possuir características, quer relativas a equipamentos quer em termos de

mão de obra, em tudo semelhantes à atual, deve por isso manter-se próxima dos valores atuais.

Através do estabelecimento do limite máximo relativo ao número de produtos máximo por dia, foi igualmente estabelecido um limite diário que não deve ser ultrapassar os 5 tipos de medidas diferentes de produto acabado. Por isso mesmo, na folha de Ordem de Trabalho (fig.14), apenas é possível colocar esses mesmos 5 produtos diferentes.

Em termos valorativos, à data de 06/10/2018, data em que o alumínio se fixava em 3,02/kg, os valores das barras em análise eram:

- ADL3001: 6,11€/ml
- ADL3001: 36,66€/barra
- ADL3003: 5,74€/ml
- ADL3003: 34,44€/barra

4.6 RESULTADOS COMPARATIVOS

Depois de realizado o levantamento dos dados relativos à produção da linha atualmente em funcionamento, obtiveram-se as necessidades diárias (tabela 2) de cada item.

Os dados foram posteriormente inseridos no modelo desenvolvido de forma a que fossem comparados os resultados obtidos pela ferramenta em relação aos da produção. O número de itens, uma vez que a linha atual trabalha com distintas medidas de produto, aumentou devido à diversidade de tamanhos de corte. No entanto o modelo mostrou-se rápido na demonstração de resultados, demorando uma média de 6 segundos para apresentar os resultados da simulação. Comparativamente ao tempo que o operador necessita para analisar as fichas de corte e idealizar alguma otimização, este dispara consideravelmente para um tempo total diário superior a 30 minutos comparativamente com o tempo do modelo.

Dia 1 ADL3001			
ITEM	Qtd.		
1380	4		
1420	4		
1489	4		
1498	4		
1540	8		
1560	4		
1570	2		
1571	2		
1670	4		
1710	2		
1820	2		
1884	4		
1980	4		
1982	4		
	21	Barras necessárias	
	37692	Desperdício Total	
	25830	Sobras	
	11862	Sucata	

Dia 1 ADL3003			
ITEM	Qtd.		
713	2		
838	2		
878	2		
938	2		
1320	4		
1410	4		
1470	4		
1711	4		
1720	4		
1760	4		
1784	4		
1810	4		
1905	4		
2069	4		
2370	4		
	20	Barras necessárias	
	40352	Desperdício Total	
	28754	Sobras	
	11598	Sucata	

Tabela 2- Itens a cortar e quantidades totais no dia 1 de corte

Nesta primeira fase, uma vez que não existe termo de comparação, é difícil perceber a eficiência dos dados obtidos.

Contudo, analisando-se o valor de desperdício, verifica-se que grande parte do desperdício total são sobras. Ou seja, mostra que estão a ser criadas várias sobras para stock. Embora as mesmas possam ser reaproveitadas no futuro, esse não é o objetivo.

Estes mesmos dados na ferramenta desenvolvida apresentaram os seguintes resultados:

Dia 1 ADL3001			
ITEM	X_{ij}		PROCURA
1380	4	=	4
1420	4	=	4
1489	4	=	4
1498	4	=	4
1540	8	=	8
1560	4	=	4
1570	2	=	2
1571	2	=	2
1670	4	=	4
1710	2	=	2
1820	2	=	2
1884	4	=	4
1980	4	=	4
1982	4	=	4
	15	Barras necessárias	
	4818	Desperdício Total	

Dia 1 ADL3003			
ITEM	X_{ij}		PROCURA
713	2	=	2
838	2	=	2
878	2	=	2
938	2	=	2
1320	4	=	4
1410	4	=	4
1470	4	=	4
1711	4	=	4
1720	4	=	4
1760	4	=	4
1784	4	=	4
1810	4	=	4
1905	4	=	4
2069	4	=	4
2370	4	=	4
	15	Barras necessárias	
	5882	Desperdício Total	

Tabela 3- Dados obtidos pelo modelo desenvolvido para o dia 1

Os resultados obtidos pelo modelo criado, mostram melhorias significativas no objetivo definido de minimização do desperdício.

Além de uma redução significativa das barras de medida standard utilizadas, o valor de desperdício é igualmente bastante inferior. Sendo que neste desperdício resultante do modelo, tudo é real desperdício, ou seja, sucata. Não houve criação de sobras utilizáveis no futuro uma vez que a média de desperdício por barra é inferior a 500mm.

Podemos, perante estes resultados, admitir de imediato que a ferramenta possui funcionalidades capazes de serem importantes na otimização do corte. No entanto, e uma vez que as medidas são constantemente distintas, podemos estar perante um caso

de sorte, em que a otimização foi visivelmente melhor pela especificidade dos itens a cortar.

Foi por isso analisado um segundo dia de produção de forma a obter novos dados, através de novos itens a cortar, para perceber qual a otimização alcançada.

Dia 2 ADL3001				Dia 2 ADL3003			
ITEM	Qtd.			ITEM	Qtd.		
1225	4			685	2		
1333	2			689	2		
1337	4			713	2		
1443	2			726	2		
1461	4			800	2		
1463	4			881	2		
1571	2			1607	4		
1579	2			1682	4		
1584	4			1690	4		
1730	4			1734	4		
1738	4			1868	4		
1799	4			1967	4		
1881	2			2037	4		
1884	4			2273	4		
1910	4			2383	4		
1916	2			2412	4		
	19	Barras necessárias			22	Barras necessárias	
	31318	Desperdício Total			41585	Desperdício Total	
	18240	Sobras			31579	Sobras	
	13078	Sucata			10006	Sucata	

Tabela 4- Itens a cortar e quantidades totais no dia 2 de corte

As quantidades de produtos em corte mantiveram se aproximadas aos valores do primeiro dia de produção, por isso os valores são semelhantes.

É visível novamente, que a tendência de criação de sobras mantém-se, assim como os valores da sucata, comparativamente com os resultados do modelo no primeiro dia analisado.

Dia 2 ADL3001				Dia 2 ADL3003			
ITEM	X_{ij}		PROCURA	ITEM	X_{ij}		PROCURA
1225	4	=	4	685	2	=	2
1333	4	=	4	689	2	=	2
1337	4	=	4	713	2	=	2
1443	4	=	4	726	2	=	2
1461	8	=	8	800	2	=	2
1463	4	=	4	881	2	=	2
1571	2	=	2	1607	4	=	4
1579	2	=	2	1682	4	=	4
1584	4	=	4	1690	4	=	4
1730	4	=	4	1734	4	=	4
1738	4	=	4	1868	4	=	4
1799	4	=	4	1967	4	=	4
1881	2	=	2	2037	4	=	4
1884	4	=	4	2273	4	=	4
1910	4	=	4	2383	4	=	4
1916	2	=	2	2412	4	=	4
	15	Barras necessárias			15	Barras necessárias	
	5962	Desperdício Total			2332	Desperdício Total	

Tabela 5- Dados obtidos pelo modelo desenvolvido para o dia 2

Analisando os dados obtidos, é possível verificar que a tendência do modelo segue um caminho inverso à metodologia do operador. O número de barras de medida standard assume números novamente visivelmente mais baixos.

Da mesma forma o desperdício foi minimizado sem recorrer à criação de nenhuma sobra.

De forma a garantir maior fiabilidade nos dados apresentados, assim como demonstrar de forma mais clara os benefícios da implementação da ferramenta em situações reais de problemas de corte, foi analisado um terceiro dia de corte com produção distinta.

Os dados obtidos seguem os mesmos padrões de quantidade dos anteriores, sendo que neste caso em particular da produção realizada nestes 3 dias, nenhum dos produtos possui medidas iguais.

Dia 3 ADL3001				Dia 3 ADL3003			
ITEM	Qtd.			ITEM	Qtd.		
1212	4			838	2		
1261	4			931	2		
1262	4			1051	2		
1273	4			1443	4		
1282	4			1470	4		
1351	2			1646	4		
1572	4			1670	4		
1634	4			1683	4		
1635	2			1775	4		
1679	4			1837	4		
1684	4			1871	4		
1687	2			1924	4		
1764	4			1982	4		
1800	4			2141	4		
1913	4			2243	4		
1936	4			2295	4		
	23	Barras necessárias			25	Barras necessárias	
	44570	Desperdício Total			47976	Desperdício Total	
	32180	Sobras			30875	Sobras	
	12390	Sucata			17101	Sucata	

Tabela 6- Itens a cortar e quantidades totais no dia 3 de corte

Os resultados recolhidos sobre o último dia analisado são semelhantes ao anteriores, de ressaltar apenas a tabela do perfil ADL3003. Este, embora com itens em termos de quantidades, idênticos aos dias anteriores, foi o dia com maior número de desperdício e sucata. Isto deve-se às especificidades das medidas dos itens.

Demonstração disso mesmo, foi o caso de o modelo, nos casos anteriores obter respostas quase imediatas, no entanto neste último caso para o perfil ADL3003 necessitou de vários minutos. Isto mostra que problemas semelhantes e na mesma ordem de grandeza, podem ter dificuldades de otimização completamente distintas.

Dia 3 ADL3001				Dia 3 ADL3003			
ITEM	X_{ij}		PROCURA	ITEM	X_{ij}		PROCURA
1212	4	=	4	838	2	=	2
1261	4	=	4	931	2	=	2
1262	4	=	4	1051	2	=	2
1273	4	=	4	1443	4	=	4
1282	4	=	4	1470	4	=	4
1351	2	=	2	1646	4	=	4
1572	4	=	4	1670	4	=	4
1634	4	=	4	1683	4	=	4
1635	2	=	2	1775	4	=	4
1679	4	=	4	1837	4	=	4
1684	4	=	4	1871	4	=	4
1687	2	=	2	1924	4	=	4
1764	4	=	4	1982	4	=	4
1800	4	=	4	2141	4	=	4
1913	4	=	4	2243	4	=	4
1936	4	=	4	2295	4	=	4
	16	Barras necessárias			18	Barras necessárias	
	5474	Desperdício Total			6348	Desperdício Total	

Tabela 7- Dados obtidos pelo modelo desenvolvido para o dia 3

Confirma-se a eficiente otimização e minimização de desperdício utilizando a ferramenta desenvolvida, comparativamente com os resultados obtidos do levantamento de dados na empresa.

Foi possível verificar novamente a minimização do desperdício nos cortes otimizados pelo modelo, assim como a não existência de sobras criadas para stock. Igualmente o modelo confirmou o que havia sido demonstrado pelos números do operador, de que devido à especificidade dos itens a cortar, este dia foi o que criou mais desperdício e mais dificuldade na criação dos resultados fornecidos.

No entanto, o conjunto de dados analisados permite nos confirmar e justificar, que esta pode ser uma ferramenta de apoio à decisão, importante no uso diário de um operador de corte numa linha semelhante.

4.7 DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE

4.7.1 PERFIL ADL3001

As análises que se seguirão, irão incidir sobre a realidade prevista para a linha que será implementada. Dessa forma será realizada uma análise e criação de padrões de corte, estabelecidos antecipadamente, de forma a garantir a minimização ideal de desperdício nos cortes a realizar.

Para a determinação dos padrões mais eficientes, será utilizada a ferramenta desenvolvida neste trabalho e que no subcapítulo anterior mostrou possuir resultados extremamente satisfatórios em termos de otimização e redução de desperdício.

A alteração restritiva a efetuar no modelo para estes novos testes, poderá inserir nos resultados um novo fator: produção de peças para stock. Deve ser diferenciado este fator relativamente aos resultados do operador no primeiro cenário utilizado.

Nesse modelo, o operador criava sobras para stock que iriam no futuro produzir mais desperdício, sendo que apenas não acontecia se a medida da sobra coincidissem exatamente com algum dos itens da procura, algo muito pouco provável. Neste caso são cortes de barras padrão inteiras com a medida de algum dos itens, por isso mesmo já sem qualquer desperdício futuro, apenas o resultante desse padrão.

Neste primeiro caso prático de criação de padrões de corte, testado o modelo com 3 medidas padrão distintas. Isto deve-se ao facto de que ao usar medida padrão de 6000mm, existir um valor de desperdício fora do razoável.

Sendo assim, forma determinados valores a alterar, sendo determinada uma margem de 500mm superior e inferior. Este valor foi determinado pelo fornecedor, que altera a medida em intervalos de 500mm.

Foi testado o modelo desta feita com barras de 5500mm, 6000mm e 6500mm. Não foi testado com barras de 7000mm pois dificulta o manuseamento da barra pelo operador, assim como com 5000mm exige uma maior existência em termos de espaço físico de stock.

Os resultados obtidos pelo modelo forma determinado em conjunto com as três medidas em simultâneo, uma vez que o número de itens é reduzido, e desta forma menos exigente para modelo. Para uma procura equivalente ao número de itens usado para apenas um produto, foi possível determinar em que medida de barra iriam ser criados os padrões e desta forma perceber qual a medida mais adequada (tabela 8).

Barras

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	X_{ij}		Procura
1600	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	≥	4
1800	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	≥	4
2000	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	≥	4
Y_j	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
Sobra	92	92	92	92	0	0	0	0	0	0	0	0			
LO_j	5500	5500	5500	5500	6000	6000	6000	6000	6500	6500	6500	6500			

Tabela 8- Resultado do modelo para 3 medidas padrão ADL3001

É possível verificar, aquando da iteração conjunta com 3 medidas standard, que o padrão de corte mais eficiente em termos de minimização do desperdício, é produzido em barras de 5500mm. No entanto foram testados outros cenários, em que a procura apenas incidia sobre uma das medidas, ou pelo menos uma não existia, de forma a perceber a continuação da viabilidade da alteração da medida padrão para 5500mm. Na utilização do modelo com procuras individuais por cada medida, determinaram-se os seguintes padrões.

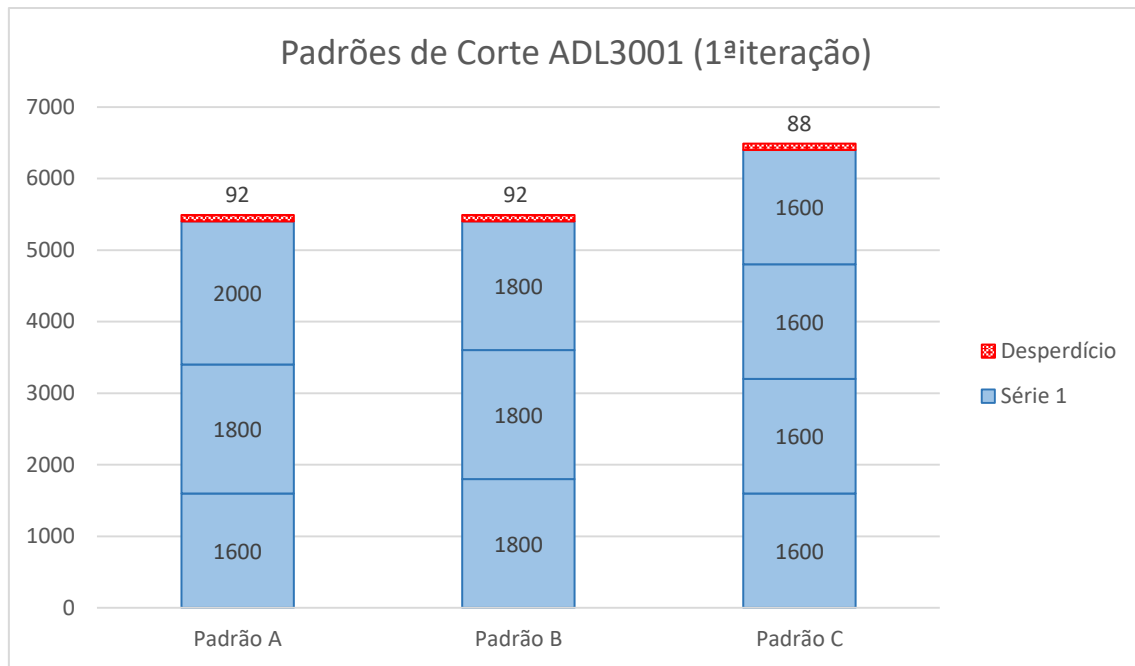


Figura 16- Gráfico de padrões de corte ADL3001 (1ª iteração)

Após a análise dos resultados, foi possível concluir que foi criado apenas um padrão na barra de 6500mm, em que o desperdício tem uma diferença inferior de apenas 4mm em relação aos anteriores. Por isso mesmo foram testadas as medidas individuais de forma a perceber qual o padrão necessário para cada medida (tabela 9).

	Itens	1600	1800	200
1º Teste	Procura	4	0	0
	Padrão	C		
	Solução	4	0	0
	Desperdício	88		
2º Teste	Procura	0	4	0
	Padrão	A+B		
	Solução	0	4	0
	Desperdício	184		
3º Teste	Procura	0	0	4
	Padrão	(4x)A		
	Solução	0	0	4
	Desperdício	368		
4º Teste	Procura	4	4	0
	Padrão	B+C		
	Solução	4	4	0
	Desperdício	272		
5º Teste	Procura	4	0	4
	Padrão	(4x)A		
	Solução	4	4	4
	Desperdício	368		
6º Teste	Procura	0	4	4
	Padrão	(4x)A		
	Solução	4	4	4
	Desperdício	368		

Tabela 9- Resultados de padrões ADL3001 usando combinações distintas de itens

Uma vez que o Padrão C, efetuado em barras de 6500mm, apenas se repete em duas situações específicas, foi utilizado novamente o modelo para determinar nestes casos, quais os resultados, apenas utilizando barras de 5500mm.

	Itens	1600	1800	200
7º Teste	Procura	4	0	0
	Padrão	A (4x)		
	Solução	4	4	4
	Desperdício	368		
8º Teste	Procura	4	4	0
	Padrão	A (4x)		
	Solução	4	4	4
	Desperdício	368		

Tabela 10- Nova iteração com perfil ADL3001 eliminando padrão

Os resultados mostram que o Padrão A, embora despolete um desperdício superior, cria itens para stock, que neste perfil em específico é uma boa solução. Esse benefício advém do facto de todos os produtos usarem estes comprimentos. Sendo apenas 3 medidas distintas de itens neste perfil, o stock criado rapidamente será utilizado.

A utilização de duas medidas padrão em simultâneo, não é uma solução benéfica em termos de processo de produção. O facto de existirem dois produtos standard, exige um acréscimo de stock, assim como um cuidado especial no controlo do stock e na encomenda. Seria apenas justificável se o padrão C se repetisse mais vezes. E uma vez que entre o padrão A e C, existem apenas 4mm de diferença, será feita a opção de utilizar apenas barras padrão com 5500mm.

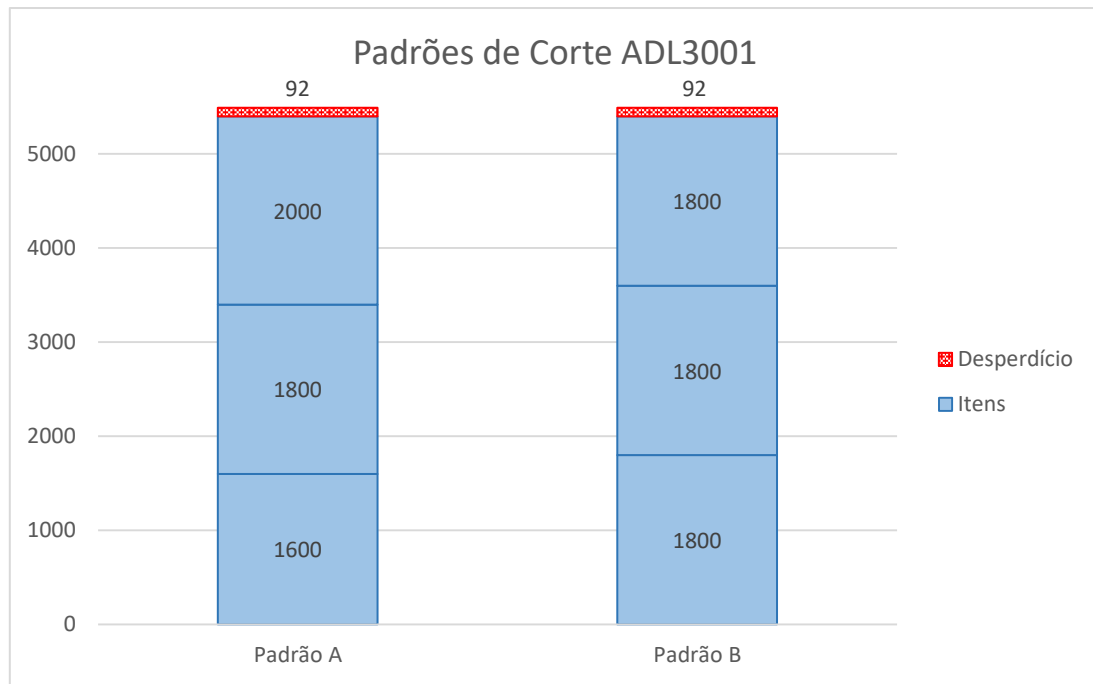


Figura 17- Gráfico de padrões de corte ADL3001

4.7.2 PERFIL ADL3003

Uma vez que foram efetuados testes com medidas padrão distintas no perfil ADL3001, foram igualmente realizados no perfil ADL3003, utilizando a mesma margem de 500mm superiores e inferiores à medida atual (6000mm).

Existe uma condicionante em relação a esta matéria-prima, que se prendem com a existência de material em stock no fornecedor com a medida *standard* de 6000mm. É um tipo de barra utilizada por vários clientes, por isso mesmo o fornecedor possui material em stock nas suas instalações. Sendo assim caso a medida seja alterada, perde-se a questão da celeridade no fornecimento das encomendas.

Para que seja solução alterar a medida *standard*, esta tem de ser justificada de resultados extremamente distintos e favoráveis para a diminuição do desperdício (tabela 11).

	Itens	1420	1670	1920	2170	2420	776	1076
BARRA 5500mm	Procura	4	4	4	4	4	2	2
	Padrão	>=	>=	>=	>=	>=	>=	>=
	X_{ij}	4	4	4	4	4	12	6
	Desperdício	820						
	Nº Barras	10						
BARRA 6000mm	Procura	4	4	4	4	4	2	2
	Padrão	>=	>=	>=	>=	>=	>=	>=
	X_{ij}	4	4	5	4	4	8	12
	Desperdício	436						
	Nº Barras	10						
BARRA 6500mm	Procura	4	4	4	4	4	2	2
	Padrão	>=	>=	>=	>=	>=	>=	>=
	X_{ij}	6	4	4	4	4	19	8
	Desperdício	252						
	Nº Barras	10						

Tabela 11- Resultado do modelo para 3 medidas padrão ADL3003

Conforme resultados apresentados, o número de barras padrão utilizado é sempre o mesmo. À medida que vai aumentando o comprimento, a tendência é a diminuição do desperdício. No entanto a tendência do número de itens para *stock* também aumenta. Embora no comprimento de 5500mm haja poucos itens para stock, o desperdício é o dobro em relação ao comprimento de 6000mm. Assim como, na medida de 6500mm, o número de itens para stock aumenta consideravelmente nos itens com menor procura. Assim, não se verificam vantagens em termos de resultados, que justifiquem a alteração da medida padrão.

Serão determinados, de seguida, os padrões de corte necessários para satisfazer as procuras diárias que possam surgir na futura linha para esta matéria-prima.

Numa primeira fase foi utilizado o modelo com uma procura, em todos os itens, superior ou igual a 1, de forma a que todos os itens estivessem presentes nos padrões de corte pelo menos uma vez.

Os resultados obtidos, de forma a não sobrecarregar o modelo, foram obtidos com uma limitação de um máximo de 10 barras standard.

No entanto o modelo, mediante as condições apresentadas, apenas necessitou de 3 barras com um desperdício total de 108mm. Os três primeiros padrões alcançados (tabela 12), são a melhor solução determinada pelo modelo, de forma a abarcar pelo menos um item de cada medida, com o menor desperdício possível.

	Padrões		
	A	B	C
1420			1
1670	1		
1920		1	1
2170		1	
2420	1		
776	1	1	2
1076	1	1	1
Sobra	46	46	16

Tabela 12- Padrões de corte ADL3003 (1ª iteração)

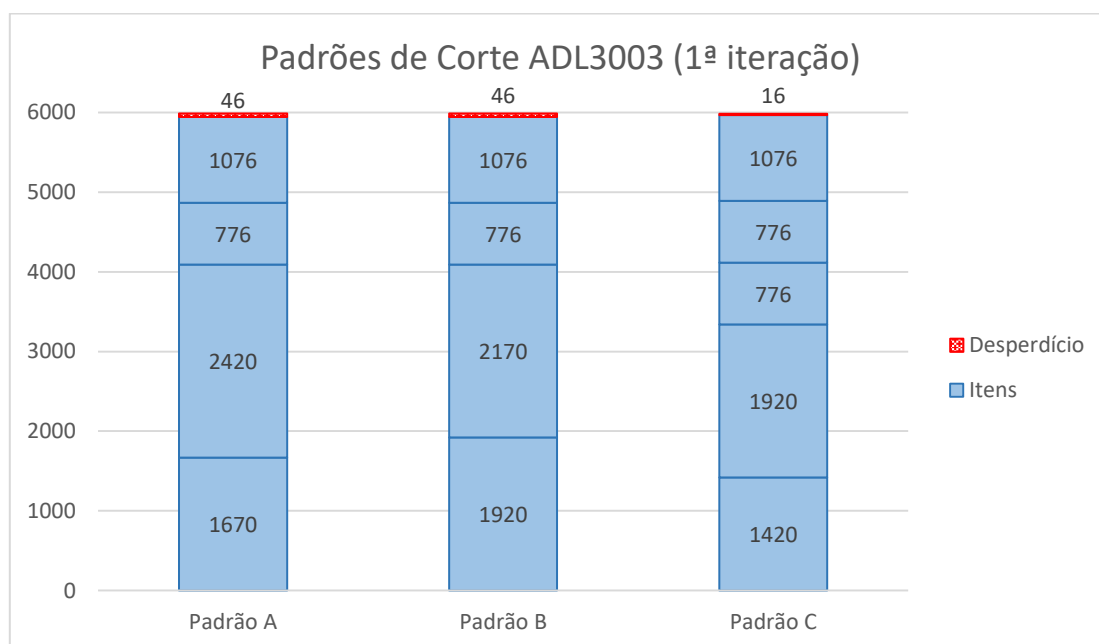


Figura 18- Gráfico de padrões de corte ADL3003 (1ª iteração)

Os padrões encontrados através da anterior iteração, são aqueles cuja minimização do desperdício é mais evidente. São os cortes mais eficientes a serem feitos numa barra de forma a conseguir todos os itens necessários para todos os produtos.

No entanto estes padrões não abrangem todas as possibilidades de padrões possíveis, em que por vezes, um padrão com maior desperdício poderá ser a melhor solução.

Isto deve-se ao facto de que um padrão com menor desperdício, se for repetido várias vezes para satisfazer a procura, na totalidade da soma dos desperdícios, pode ser uma solução pior que um padrão com maior desperdício e repetido menos vezes. Com esta hipótese, também o número de barras padrão é reduzido.

De forma a aumentar o número de padrões e possibilidades do modelo, foi efetuada uma tabela em que cada item foi sendo repetido dentro de uma barra, até que a sobra resultante não permita um novo item com a mesma medida. Sendo esse o caso, deu-se sequência com o item seguinte.

A sobra resultante é otimizada no modelo, para que essa mesma sobra seja aproveitada da melhor forma na redução do desperdício.

Barra nº	Itens							Sobra restante	Padrão
1	1420							4576	
2	1420	1420						3160	
3	1420	1420	1420					1740	
4	1420	1420	1420	1420				320	D
5	1670							4330	
6	1670	1670						2660	
7	1670	1670	1670					990	
8	1920							4080	
9	1920	1920						2160	
10	1920	1920	1920					240	E
11	2170							3830	
12	2170	2170						1660	
13	2420							3580	
14	2420	2420						1160	
15	776							5224	
16	776	776						4448	
17	776	776	776					3672	
18	776	776	776	776				2896	
19	776	776	776	776	776			2120	
20	776	776	776	776	776	776		1344	
21	776	776	776	776	776	776	776	568	F
22	1076							4924	
23	1076	1076						3848	
24	1076	1076	1076					2772	
25	1076	1076	1076	1076				1696	
26	1076	1076	1076	1076	1076			620	G

Tabela 13- Tabela realizada manualmente com repetição de itens na mesma barra

Na criação da tabela de forma manual, foi possível determinar mais 4 padrões de corte. Uma vez que a medida sobrando não permite a incorporação de mais nenhuma medida de itens, automaticamente torna-se um padrão.

Nesta tabela é possível de verificar que o desperdício nestes primeiros padrões de corte possui um valor mais elevado. No entanto a repetição de itens com a mesma medida não acontece nos resultados obtidos pelo modelo pois, não são a melhor solução na minimização do desperdício, mas podem num futuro ser uma solução viável.

Existe ainda a questão relativa ao operador. O operador será igualmente um decisor mediante a necessidade, a procura e a realidade naquele momento. Possuindo por isso mesmo um modelo com o máximo de padrões possíveis, que fará com que desta forma estejam cobertas as eventuais realidades e necessidades.

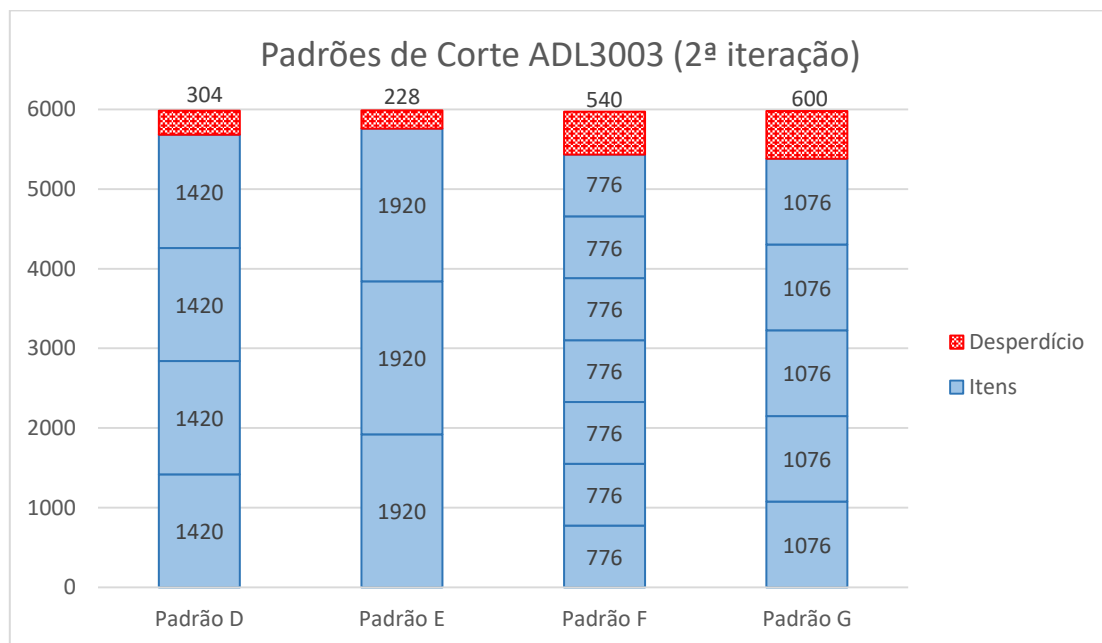


Figura 19- Gráfico de padrões de corte ADL3003 (2ª iteração)

Foi utilizada a ferramenta desenvolvida para otimizar as sobras resultantes da tabela anterior (tabela 13) de forma a que seja otimizada a barra na sua totalidade, e assim encontrados os restantes padrões de corte.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

Barra nº	Itens							Sobra restante	Padrão
1	1420	1420	1420	1420				304	D
2	1920	1920	1920					232	E
3	776	776	776	776	776	776	776	540	F
4	1076	1076	1076	1076	1076			600	G
5	1420	1920	776	776	1076			16	H
6	1420	1420	776	776	776	776		36	I
7	1420	1420	1420	1670				58	J
8	1670	1076	1076	1076	1076			10	K
9	1670	1670	776	776	1076			16	L
10	1670	1670	1670	776				202	M
11	1920	1420	776	776	1076			16	H
12	1920	1920	1920					232	E
13	2170	1920	776	1076				46	N
14	2170	2170	776	776				96	O
15	2420	1670	776	1076				36	P
16	2420	2420	1076					76	Q
17	776	1670	1670	776	1076			16	H
18	776	776	1670	1670	1076			16	L
19	776	776	776	776	1420	1420		36	I
20	776	776	776	776	1420	1420		36	I
21	776	776	776	776	776	1920		180	R
22	776	776	776	776	776	776	1076	244	S
23	1076	1420	1920	776	776			16	H
24	1076	1076	1420	776	776	776		80	T
25	1076	1076	1076	1920	776			60	U
26	1076	1076	1076	1076	1670			10	K

Tabela 14- Resultados obtidos pelo modelo para sobras anteriores

Os 4 primeiros padrões da tabela são aqueles que foram definidos anteriormente de forma manual. Nas linhas seguintes, utilizando o modelo foi possível encontrar os restantes, onde a verde é possível verificar os resultados obtidos (tabela 14).

Existem padrões que vão se repetindo, pois, a combinação entre itens é realmente a melhor em termos de aproveitamento da barra e redução do desperdício.

Foram analisados os resultados obtidos nesta última iteração, com os 3 padrões já encontrados no primeiro teste, e foi possível de verificar que os 3 padrões da primeira iteração se repetiram nestes últimos resultados.

O padrão A é igual ao padrão P, o padrão B é igual ao padrão N e o padrão C tem os mesmos valores que o padrão H.

Resumidos os resultados e compilando tudo numa tabela só, os padrões encontrados nas duas iterações para o perfil ADL3003 são os seguintes:

Barra nº	Itens							Sobra restante	Padrão
1	2420	1670	776	1076				36	A
2	2170	1920	776	1076				46	B
3	776	1670	1670	776	1076			16	C
4	1420	1420	1420	1420				304	D
5	1920	1920	1920					232	E
6	776	776	776	776	776	776	776	540	F
7	1076	1076	1076	1076	1076			600	G
8	1420	1420	776	776	776	776		36	H
9	1420	1420	1420	1670				58	I
10	1076	1076	1076	1076	1670			10	J
12	1670	1670	1670	776				202	K
13	2170	2170	776	776				96	L
14	2420	2420	1076					76	M
15	776	776	776	776	776	1920		180	N
16	776	776	776	776	776	776	1076	244	O
17	1076	1076	1420	776	776	776		80	P
18	1076	1076	1076	1920	776			60	Q

Tabela 15- Padrões de corte ADL3003

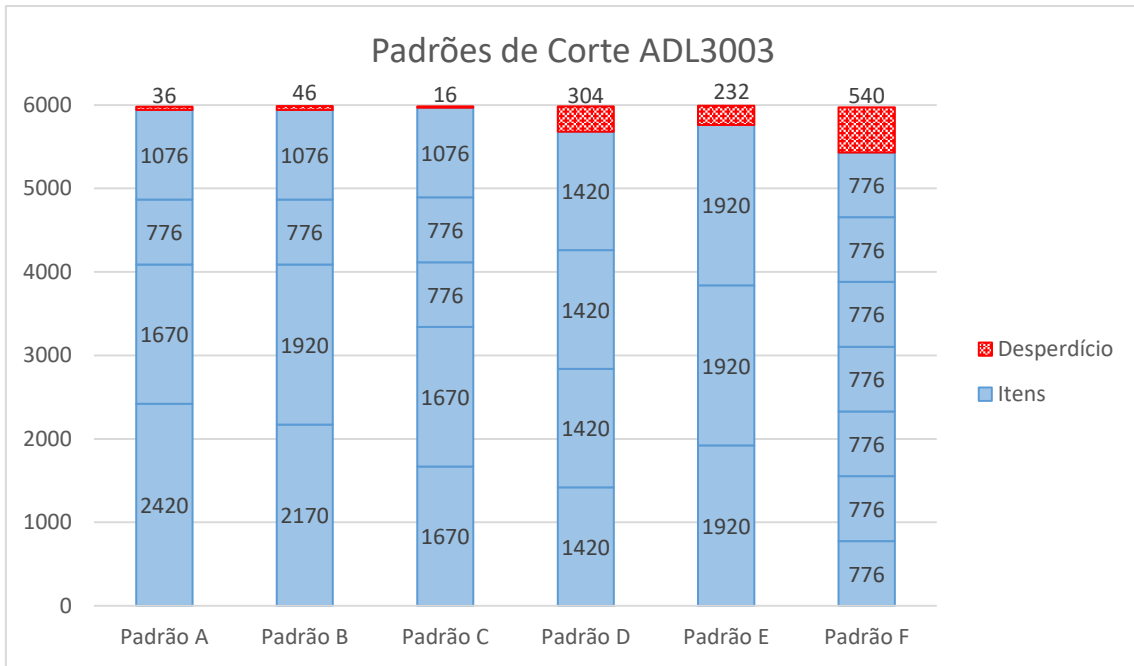


Figura 20- Gráfico de padrões de corte ADL3001 (A-F)

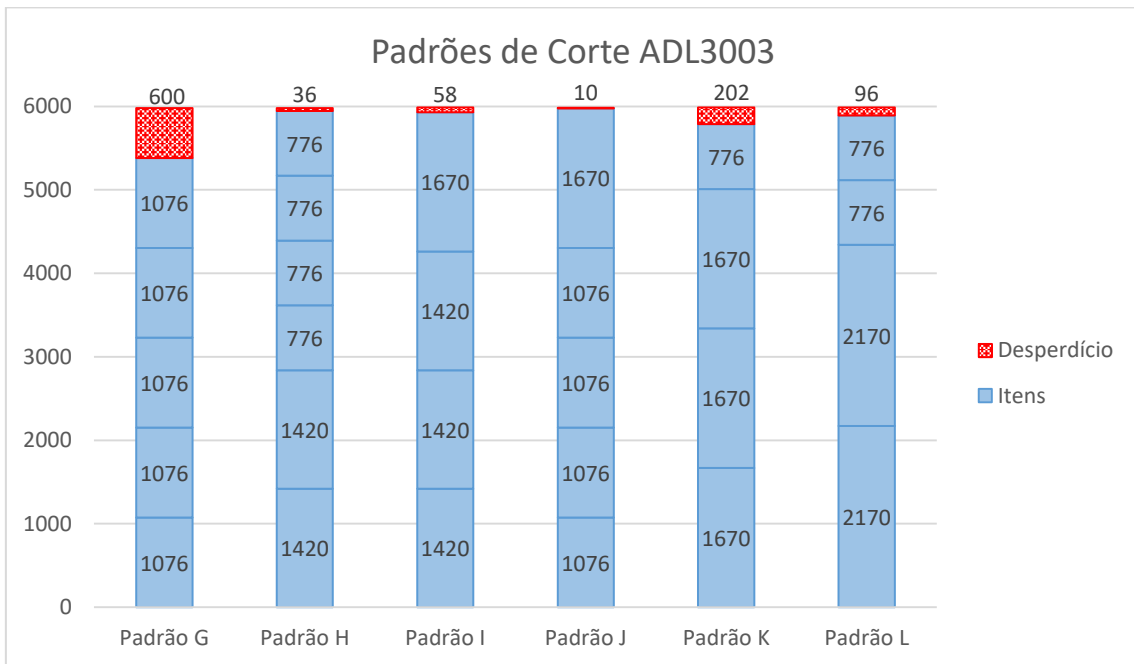


Figura 21- Gráfico de padrões de corte ADL3001 (G-L)

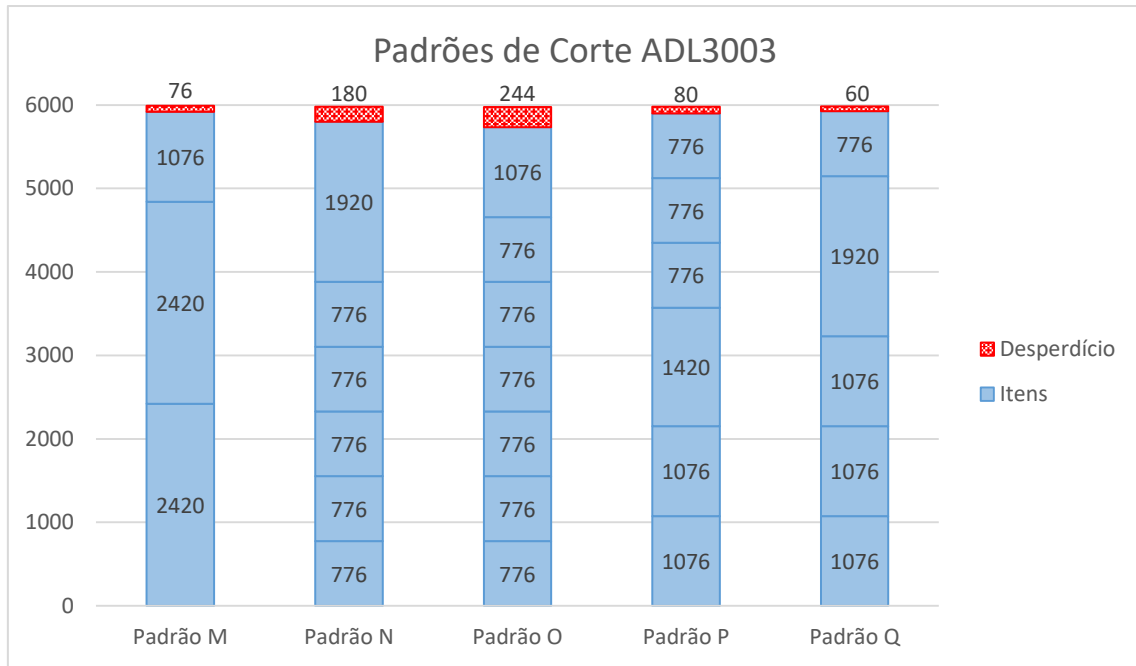


Figura 22- Gráfico de padrões de corte ADL3001 (M-Q)

4.8 UTILIZAÇÃO DO MODELO COM PADRÕES DE CORTE

Após a determinação dos padrões de corte para cada um dos perfis, foi efetuados novos desenvolvimentos no trabalho de forma a perceber os resultados possíveis de obter em diferentes cenários de produção.

Para isso foi elaborado um modelo de *Trim Loss* com utilização dos padrões estabelecidos anteriormente e de forma a otimizar as necessidades com um menor número de barras padrão possíveis. Como referido anteriormente, este modelo minimiza o número de barras a utilizar de forma a que haja um melhor aproveitamento dos recursos e menos criação de itens para stock. No entanto, este mesmo modelo é aberto e permite que o operador possa testar novos resultados, neste caso com minimização do desperdício.

4.8.1 FORMULAÇÃO TRIM LOSS

A_{ji} : número de vezes que o item j se repete no padrão i ($i = 1,2,3, \dots, n$); ($j = 1,2,3, \dots, m$);

P_j : Procura do item com a medida j ($j = 1,2,3, \dots, m$);

Variáveis de decisão

- X_i : quantidade de barras com o padrão de corte i ($i = 1,2,3, \dots, n$);

Função objetivo

A função objetivo pretende minimizar o número de barras padrão.

$$F.O.: \text{Min} \sum_{i=1}^n X_i$$

Restrições

- Restrição de satisfação da procura

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ji} \cdot X_i \geq P_j$$

$X_i \geq 0$, e inteiro; ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

4.8.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Foi criada uma tabela de artigos, onde foi atribuída uma numeração entre 1 e 21. Esta numeração servirá para a criação aleatória de 20 simulações de produção. A aleatoriedade fará com que possam surgir vários casos possíveis, incluindo os melhores e piores cenários.

Nº. Atribuído	Artigo	Dimensão
1	Portão	3000x1600
2	Portão	3000x1800
3	Portão	3000x2000
4	Portão	3500x1600
5	Portão	3500x1800
6	Portão	3500x2000
7	Portão	4000x1600
8	Portão	4000x1800
9	Portão	4000x2000
10	Portão	4500x1600
11	Portão	4500x1800
12	Portão	4500x2000
13	Portão	5000x1600
14	Portão	5000x1800
15	Portão	5000x2000
16	Portão de Passagem	900x1600
17	Portão de Passagem	900x1800
18	Portão de Passagem	900x2000
19	Portão de Passagem	1200x1600
20	Portão de Passagem	1200x1800
21	Portão de Passagem	1200x2000

Tabela 16- Artigos numerados de 1 a 21

Seguindo os parâmetros definidos para a nova linha, devem ser produzidos no máximo 5 artigos diferentes, numa produção total nunca superior a 20 unidades. Desta forma, através da fórmula ALEATÓRIOENTRE no software Excel, foi possível determinar 5 artigos aleatoriamente entre 0 e 21, havendo a possibilidade de 0 e desta forma não serem produzidos os 5 artigos.

As quantidades a produzir foram igualmente definidas pela mesma fórmula, utilizando os valores que na totalidade não ultrapassavam o limite diário (tabela 17).

Foram utilizados apenas os cenários criados aleatoriamente que eram inferiores, em termos de quantidades totais, inferiores ou iguais ao limite máximo de 20 unidades diárias, e superior ao limite razoável definido de 15 unidades. Todos os restantes cenários foram descartados.

1º Teste	Artigo	10	9	17	6	3
	Designação	Portão	Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão
	Medida	4500x1600	4000x2000	900x1800	3500x2000	3000x2000
	Quantidade	1	1	5	9	3
2º Teste	Artigo	5	13	11	8	17
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão	Portão de Passagem
	Medida	3500x1800	5000x1600	4500x1800	4000x1800	900x1800
	Quantidade	1	8	0	5	4
3º Teste	Artigo	21	17	17	6	16
	Designação	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão	Portão de Passagem
	Medida	1200x2000	900x1800	900x1800	3500x2000	900x1600
	Quantidade	4	3	3	1	5
4º Teste	Artigo	14	2	14	14	5
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão	Portão
	Medida	5000x1800	3000x1800	5000x1800	5000x1800	3500x1800
	Quantidade	2	0	2	10	1
5º Teste	Artigo	12	5	18	8	17
	Designação	Portão	Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão de Passagem
	Medida	4500x2000	3500x1800	900x2000	4000x1800	900x1800
	Quantidade	4	1	6	5	2
6º Teste	Artigo	9	9	14	13	7
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão	Portão
	Medida	4000x2000	4000x2000	5000x1800	5000x1600	4000x1600

	Quantidade	4	4	5	1	5
7º Teste	Artigo	9	11	7	2	21
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão	Portão de Passagem
	Medida	4000x2000	4500x1800	4000x1600	3000x1800	1200x2000
	Quantidade	1	5	4	4	1
8º Teste	Artigo	16	16	8	2	5
	Designação	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão	Portão	Portão
	Medida	900x1600	900x1600	4000x1800	3000x1800	3500x1800
	Quantidade	4	4	3	2	5
9º Teste	Artigo	13	6	14	2	16
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão	Portão de Passagem
	Medida	5000x1600	3500x2000	5000x1800	3000x1800	900x1600
	Quantidade	3	5	3	5	3
10º Teste	Artigo	7	4	20	20	20
	Designação	Portão	Portão	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão de Passagem
	Medida	4000x1600	3500x1600	1200x1800	1200x1800	1200x1800
	Quantidade	3	2	3	7	1
11º Teste	Artigo	10	17	15	17	13
	Designação	Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão de Passagem	Portão
	Medida	4500x1600	900x1800	5000x2000	900x1800	5000x1600
	Quantidade	1	3	2	4	5
12º Teste	Artigo	10	18	11	14	11
	Designação	Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão	Portão
	Medida	4500x1600	900x2000	4500x1800	5000x1800	4500x1800
	Quantidade	5	5	4	4	2
13º Teste	Artigo	11	19	7	2	8
	Designação	Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão	Portão
	Medida	4500x1800	1200x1600	4000x1600	3000x1800	4000x1800
	Quantidade	5	3	1	4	5
14º Teste	Artigo	0	1	17	14	18
	Designação		Portão	Portão de Passagem	Portão	Portão de Passagem
	Medida		3000x1600	900x1800	5000x1800	900x2000
	Quantidade		5	3	3	6
15º Teste	Artigo	4	3	0	6	5
	Designação	Portão	Portão		Portão	Portão
	Medida	3500x1600	3000x2000		3500x2000	3500x1800
	Quantidade	4	5		9	2
16º Teste	Artigo	15	7	2	16	20
	Designação	Portão	Portão	Portão	Portão de Passagem	Portão de Passagem

	Medida	5000x2000	4000x1600	3000x1800	900x1600	1200x1800
	Quantidade	5	2	3	3	5
17º Teste	Artigo	4	0	18	6	3
	Designação	Portão		Portão de Passagem	Portão	Portão
	Medida	3500x1600		900x2000	3500x2000	3000x2000
	Quantidade	5		7	4	2
18º Teste	Artigo	18	17	18	19	20
	Designação	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão de Passagem
	Medida	900x2000	900x1800	900x2000	1200x1600	1200x1800
	Quantidade	3	3	4	4	5
19º Teste	Artigo	17	1	13	0	8
	Designação	Portão de Passagem	Portão	Portão		Portão
	Medida	900x1800	3000x1600	5000x1600		4000x1800
	Quantidade	3	4	4		6
20º Teste	Artigo	11	16	19	14	7
	Designação	Portão	Portão de Passagem	Portão de Passagem	Portão	Portão
	Medida	4500x1800	900x1600	1200x1600	5000x1800	4000x1600
	Quantidade	5	5	3	5	1

Tabela 17- Produção de 20 dias criada aleatoriamente

O modelo utilizando os padrões de corte possui respostas imediatas, sem muito tempo de processamento como por vezes existia no modelo de minimização do desperdício. Isto deve-se ao facto de o modelo não ter a necessidade de colocar itens dentro de cada barra individualmente, mas sim, segundo os padrões definidos, apenas mostrar quantas vezes o padrão deve ser repetido.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Perfil ADL3001

1º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	52	0	52	Total Barras
	Desperdício	4784	0	4784	Total Desperdício
2º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	32	0	32	Total Barras
	Desperdício	2944	0	2944	Total Desperdício
3º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	12	0	12	Total Barras
	Desperdício	1104	0	1104	Total Desperdício
4º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	0	20	20	Total Barras
	Desperdício	0	1840	1840	Total Desperdício
5º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	28	0	28	Total Barras
	Desperdício	2576	0	2576	Total Desperdício
6º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	32	0	32	Total Barras
	Desperdício	2944	0	2944	Total Desperdício
7º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	16	7	23	Total Barras
	Desperdício	1472	644	2116	Total Desperdício
8º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	16	8	24	Total Barras
	Desperdício	1472	736	2208	Total Desperdício
9º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	4	24	Total Barras
	Desperdício	1840	368	2208	Total Desperdício
10º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	1	21	Total Barras
	Desperdício	1840	92	1932	Total Desperdício
11º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	24	0	24	Total Barras
	Desperdício	2208	0	2208	Total Desperdício
12º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	7	27	Total Barras
	Desperdício	1840	644	2484	Total Desperdício
13º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	11	15	26	Total Barras

	Desperdício	1012	1380	2392	Total Desperdício
14º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	0	20	Total Barras
	Desperdício	1840	0	1840	Total Desperdício
15º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	56	0	56	Total Barras
	Desperdício	5152	0	5152	Total Desperdício
16º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	1	21	Total Barras
	Desperdício	1840	92	1932	Total Desperdício
17º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	38	0	38	Total Barras
	Desperdício	3496	0	3496	Total Desperdício
18º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	14	1	15	Total Barras
	Desperdício	2944	92	2944	Total Desperdício
19º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	32	0	32	Total Barras
	Desperdício	2944	0	2944	Total Desperdício
20º Teste	Padrão	A	B		
	Quantidade	20	7	27	Total Barras
	Desperdício	1840	644	2484	Total Desperdício

Tabela 18- Produção de 20 dias criada aleatoriamente ADL3001

- Perfil ADL3003

1º Teste	Padrão	E	I	K	L		
	Quantidade	2	4	11	2		19
	Desperdício	464	232	2222	192		3110
2º Teste	Padrão	B	E	K	M	N	
	Quantidade	1	6	2	16	1	26
	Desperdício	46	1392	404	1214	180	1438
3º Teste	Padrão	C	J	O			
	Quantidade	2	1	3			6
	Desperdício	32	100	732			864
4º Teste	Padrão	A	K	M			
	Quantidade	1	1	28			30
	Desperdício	36	202	2128			2366
5º Teste	Padrão	E	K	L			

	Quantidade	7	2	8			17	Total Barras
	Desperdício	1624	404	768			2796	Total Desperdício
6º Teste	Padrão	B	E	M				
	Quantidade	1	17	12			30	Total Barras
	Desperdício	46	3944	912			4902	Total Desperdício
7º Teste	Padrão	B	D	E	L			
	Quantidade	2	4	6	9		21	Total Barras
	Desperdício	92	1216	1392	864		3564	Total Desperdício
8º Teste	Padrão	E	F	H	I	K		
	Quantidade	4	1	1	2	6	14	Total Barras
	Desperdício	928	540	36	116	1212	2832	Total Desperdício
9º Teste	Padrão	D	I	K	M			
	Quantidade	4	2	6	12		24	Total Barras
	Desperdício	1216	116	1212	912		3456	Total Desperdício
10º Teste	Padrão	E	J	K				
	Quantidade	4	6	1			11	Total Barras
	Desperdício	928	600	202			1730	Total Desperdício
11º Teste	Padrão	F	L	M				
	Quantidade	2	2	14			18	Total Barras
	Desperdício	1080	192	1064			2336	Total Desperdício
12º Teste	Padrão	L	M					
	Quantidade	22	8				30	Total Barras
	Desperdício	2112	608				2720	Total Desperdício
13º Teste	Padrão	B	D	E	L			
	Quantidade	6	4	6	7		23	Total Barras
	Desperdício	276	1216	1392	672		3556	Total Desperdício
14º Teste	Padrão	D	H	M				
	Quantidade	3	5	6			14	Total Barras
	Desperdício	912	180	456			1548	Total Desperdício
15º Teste	Padrão	I	K					
	Quantidade	7	18				25	Total Barras
	Desperdício	406	3636				4042	Total Desperdício
16º Teste	Padrão	D	E	H	M			
	Quantidade	2	3	2	10		17	Total Barras
	Desperdício	608	696	72	760		2136	Total Desperdício
17º Teste	Padrão	H	I	K				
	Quantidade	1	3	11			15	Total Barras
	Desperdício	36	174	2222			2432	Total Desperdício
18º Teste	Padrão	G	O					
	Quantidade	3	4				7	Total Barras
	Desperdício	1800	976				2776	Total Desperdício
19º Teste	Padrão	D	E	H	M			
	Quantidade	3	8	2	8		21	Total Barras

	Desperdício	912	1856	72	608		3448	Total Desperdício
20º Teste	Padrão	B	E	L	M			
	Quantidade	1	1	10	10		22	Total Barras
	Desperdício	46	232	960	760		1998	Total Desperdício

Tabela 19- Produção de 20 dias criada aleatoriamente ADL3003

4.8.3 COMENTÁRIO FINAL AOS RESULTADOS

Foi elaborada uma tabela resumo de forma a perceber, na globalidade dos testes efetuados, a utilização dos padrões e seus respetivos desperdícios (tabelas 20 e 21).

ADL3001		
Padrão	Nº Utilizações	Desperdício
A	483	44436
B	71	6532
	554	92
	Total de barras	Desperdício p/barra

Tabela 20- Resumo dos resultados da produção aleatória ADL3001

Analisando os resultados no perfil ADL3001, é possível verificar que o padrão mais eficiente é o padrão A e por isso utilizado num maior número de vezes. No entanto é um padrão que produz a mesma quantidade de itens em cada barra, o que significa que caso as procuras não sejam iguais nos diferentes itens, existe automaticamente uma produção para stock nos itens de menor procura.

O desperdício médio por barra no final das iterações, no conjunto das 554 barras, é inferior a 100mm. Foi definido pela administração da empresa Alu Gold, S.A. que um valor médio abaixo de 200mm por barra seria um valor espetável. Este valor mostra-se muito satisfatório pois é um desperdício que está dentro de valores considerados muito eficientes na redução do desperdício, valor que se encontra abaixo do limite espetável, assim como um valor muito baixo em comparação com valores atuais na linha de produção em funcionamento.

ADL3003		
Padrão	Nº Utilizações	Desperdício
A	1	36
B	11	506
C	2	32
D	20	6080
E	64	15760
F	3	1620
G	3	1800
H	11	396
I	18	1044
J	7	700
K	57	11716
L	60	5760
M	124	5224
N	1	180
O	7	1708
P	0	0
Q	0	0
	389	135
	Total de barras	Desperdício p/barra

Tabela 21- Resumo dos resultados da produção aleatória ADL3003

No que diz respeito ao perfil ADL3003, este obteve valores de desperdício igualmente muito favoráveis em relação ao esperado. Possui um valor médio de desperdício por barra de 135mm, que, pese embora seja um pouco superior ao alcançado no perfil ADL3003, mantêm-se abaixo do valor de 200mm e possui uma menor utilização de barras standard.

Esta utilização menor de barras standard advém deste material possuir um número de itens mais vasto e conseqüentemente um maior número de diferentes padrões. Desta forma permite uma melhor otimização, menor uso de barras padrão e menor produção de itens para stock.

É igualmente possível de verificar que os três padrões inicialmente definidos (padrões A/B/C) como sendo os que possuem menor desperdício, não são os que, neste conjunto de iterações, possuem maior utilização.

Estes resultados vêm mostrar que por vezes, um padrão com menor desperdício não é a melhor solução, pois pode necessitar de ser repetido num número superior de vezes para colmatar a procura.

Os três padrões mais utilizados são o padrão E, L e M, sendo o padrão M o que mais se destaca, mostrando ser um padrão eficiente pois é usado num maior número de vezes com produções distintas.

Em sentido inverso, os padrões P e Q nunca foram utilizados em 20 diferentes necessidades produtivas. Não quer com isso dizer que sejam padrões a serem retirados do modelo ou que não são eficientes, não foram apenas, mediante as necessidades, uma solução para o modelo no objetivo de minimização de barras standard, no entanto podem ser no futuro.

Analisando em termos monetários, comparativamente com os valores recolhidos da linha atual, foi possível verificar a redução possível com a aplicação do novo modelo. Os valores de desperdício por barra na linha atual, rondam os 550mm no perfil ADL3001 e os 500mm no perfil ADL3003. Isto quer dizer que há uma redução de 405mm no perfil ADL3001 e de 365mm no perfil ADL3003.

Aplicando estes valores na produção realizada aleatoriamente, teríamos uma redução total de 224 370mm no perfil ADL3001 e de 141 985mm no perfil ADL3003. Isto permitiu verificar que apenas numa produção de 20 dias, seria possível poupar, de forma estimada, 1370.90€ no perfil ADL3001 e 814.99€ no perfil ADL3003.

De uma forma resumida e assumindo que os resultados obtidos vão ser idênticos no decorrer do ano, assumindo igualmente um valor de 20 dias de produção por mês, no final de um ano, na sua totalidade, a empresa Alu Gold, S.A. tenderá obter reduções de desperdício no corte que rondam os 26 000€.

CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta capaz de solucionar um problema de otimização de corte de barras de alumínio, passível de ser utilizado na empresa Alu Gold, S.A.

A ferramenta utilizada foi desenvolvida segundo um modelo de programação linear, com um objetivo de minimização do desperdício em cada barra.

Esta ferramenta mostrou, através de resultados comparativos com a produção atual, que a minimização do desperdício alcançada justifica a utilização do modelo desenvolvido.

Aplicando posteriormente o modelo numa visão estratégica e de caráter exploratório, foi possível determinar padrões de corte eficientes que permitem, através do corte de uma barra inteira, obter os itens necessários para os diferentes produtos. A opção de utilização de padrões de corte surgiu da escolha de cortar sempre a totalidade da barra de forma a que não haja criação de sobras em stock, mas sim de itens já nas medidas necessárias à produção, sem uma nova criação de desperdício.

A aplicação dos padrões de corte em simulações aleatórias de produções diárias, mostrou que o novo modelo desenvolvido, responde de forma eficiente e rápida com os resultados necessários. Possibilitou ainda criar uma ferramenta, que numa vertente de antecipação daquilo que será a realidade da nova linha de produção, antecipar aquilo que serão as necessidades, corrigindo os problemas antes mesmo deles existirem.

Este mesmo modelo permitiu perceber que por vezes as soluções com menor desperdício não são as mais eficientes. Padrões de corte com valores menores de desperdício sendo repetidos imensas vezes, podem possuir somatórios de desperdícios mais elevados. Por isso mesmo houve a necessidade de identificar o maior número de padrões possíveis, cobrindo a totalidade das hipóteses.

Através dos resultados de uma produção aleatória de 20 dias, foi possível de verificar essa mesma questão relativa aos padrões com menor e maior desperdício. Os resultados mostram que alguns dos padrões com menor desperdício foram os menos utilizados. Isto não quer dizer que não houve uma redução do desperdício, pois ela existe. No entanto não é feita de forma individual pelo padrão utilizado, mas sim na soma das

utilizações. A globalidade do desperdício criado no final da produção é menor em relação à utilização de padrões com menor desperdício.

Em termos monetários, a aplicação desta ferramenta na realidade produtiva da empresa, possui reduções significativas. Analisando os valores de apenas 20 dias de produção, existe uma redução de 2185.89€. Caso esta proporção seja aplicada a valores anuais será possível alcançar valores superiores a 25 000€ de redução de desperdício.

Estes valores são alcançados pois, com a criação de uma produção por padrões de corte, foi possível reduzir, nos valores médios de desperdício produzido por barra, 550mm no perfil ADL3001 e 405mm no perfil ADL3003.

Esta capacidade de aplicação do modelo antes da linha de produção estar em funcionamento, permite que não hajam limitações ao modelo de situações já existentes e que não sejam passíveis de serem alteradas. Sendo assim, a otimização que pode ser alcançada na nova linha de produção será superior caso fosse aplicada a uma situação semelhante já em funcionamento.

Com os dados obtidos permitirá à empresa Alu Gold, S.A. antecipar algumas situações, nomeadamente a alteração de uma medida padrão junto do fornecedor, e desta forma iniciar a nova produção já com resultados extremamente eficientes.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Abuabara, A., & Morabito, R. (2009). Cutting optimization of structural tubes to build agricultural light aircrafts. *Annals of Operations Research*, 169(1), 149–165. <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0438-7>
- Adriana Cristina Cherri, Marcos Nereu Arenales, H. H. Y. (2009). The one-dimensional cutting stock problem with usable leftover – A heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 204(2), 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.028>
- Arenales, M. N., Cherri, A. C., Nascimento, D. N. do, Vianna, A., Arenales, M. N., Cherri, A. C., ... Vianna, A. (2015). A NEW MATHEMATICAL MODEL FOR THE CUTTING STOCK/LEFTOVER PROBLEM. *Pesquisa Operacional*, 35(3), 509–522. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2015.035.03.0509>
- Cherri, A. C., Arenales, M. N., & Yanasse, H. H. (2013). The usable leftover one-dimensional cutting stock problem—a priority-in-use heuristic. *International Transactions in Operational Research*, 20(2), 189–199. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2012.00868.x>
- Cherri, A. C., Arenales, M. N., Yanasse, H. H., Poldi, K. C., & Gonçalves Vianna, A. C. (2014, July 16). The one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers - A survey. *European Journal of Operational Research*. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.026>
- Dimitriadis, S., & Kehris, E. (2009). Cutting stock process optimisation in custom door and window manufacturing industry. *International Journal of Decision Sciences, Risk and Management*, 1(1/2), 66. <https://doi.org/10.1504/IJDSRM.2009.027247>
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 145–159. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K)
- Gilmore, P. C., & Gomory, R. E. (1961). A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem. *International Business Machines Corporation*, 12. Retrieved from <http://www4.ncsu.edu/~kksivara/ma505/handouts/gilmore-gomory1.pdf>
- Google Scholar. (2018). “One Dimensional cutting stock problem with usable leftovers “[Consultado a 23/02/2018] Diponivel na internet em: https://scholar.google.pt/scholar?as_ylo=2014&q=on.
- Gradigar, M., & Resinovi, G. (1997). OPTIMIZATION OF ROLL CUTTING IN CLOTHING INDUSTRY. *Computers Ops Res*, 24(10), 945–953. Retrieved from https://ac.els-cdn.com/S0305054897000051/1-s2.0-S0305054897000051-main.pdf?_tid=8670a5ea-136c-11e8-97da-00000aab0f27&acdnat=1518821927_0ee02502656cd886e80c3d10a0524d30
- Gradišar, M., Kljajić, M., Resinovič, G., & Jesenko, J. (1999). A sequential heuristic procedure for one-dimensional cutting. *European Journal of Operational*

- Research*, 114(3), 557–568. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00140-4)
- Gradisar, M., & Trkman, P. (2005). A combined approach to the solution to the general one-dimensional cutting stock problem. *Computers & Operations Research*, 32(7), 1793–1807. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2003.11.028>
- Gupta, J. N. D., & Ho, J. C. (1999). A new heuristic algorithm for the one-dimensional bin-packing problem. *Production Planning & Control*, 10(6), 598–603. <https://doi.org/10.1080/095372899232894>
- Kos, L., & Duhovnik, J. (2002). Cutting optimization with variable-sized stock and inventory status data. *International Journal of Production Research*, 40(10), 2289–2301. <https://doi.org/10.1080/00207540210128161>
- Poldi, K. C., & Arenales, M. N. (2009). Heuristics for the one-dimensional cutting stock problem with limited multiple stock lengths. *Computers & Operations Research*, 36(6), 2074–2081. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2008.07.001>
- Ramos, C. M. (2015). A engenharia como factor determinante no crescimento económico e social, 2015.
- Scheithauer, G. (1991). A note on handling residual lengths. *Optimization*, 22(3), 461–466. <https://doi.org/10.1080/02331939108843687>
- Sinuany-Stern, Z., & Weiner, I. (1994). The One Dimensional Cutting Stock Problem Using Two Objectives. *Journal of the Operational Research Society*, 45(2), 231–236. <https://doi.org/10.1057/jors.1994.28>
- Tomat, L., & Gradišar, M. (2017). One-dimensional stock cutting: optimization of usable leftovers in consecutive orders. *Central European Journal of Operations Research*, 25(2), 473–489. <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0466-y>
- Trkman, P., & Gradisar, M. (2007). One-dimensional cutting stock optimization in consecutive time periods. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 291–301. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2006.03.027>
- Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1109–1130. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2005.12.047>

ANEXOS

ANEXOS

FERRAMENTA EXCEL

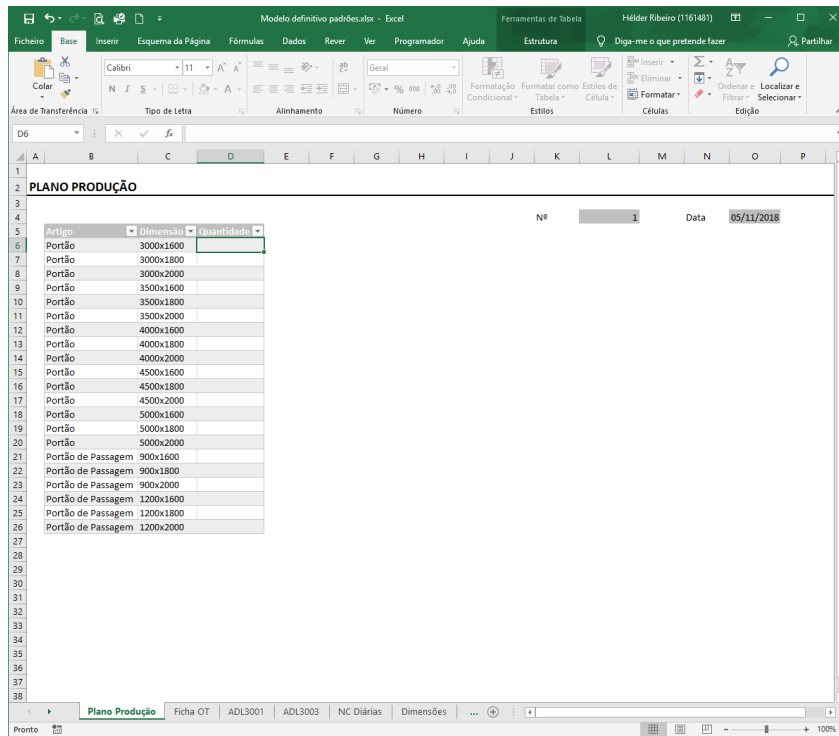


Figura 23- Plano de Produção onde se colocam os artigos necessários

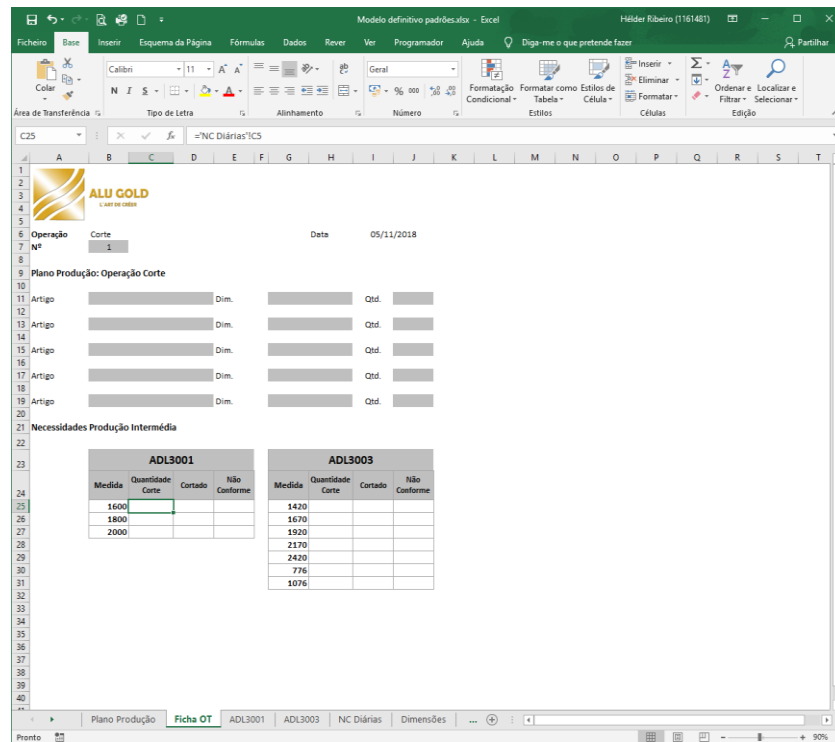


Figura 24- Ficha de ordem de Trabalho a entregar em produção

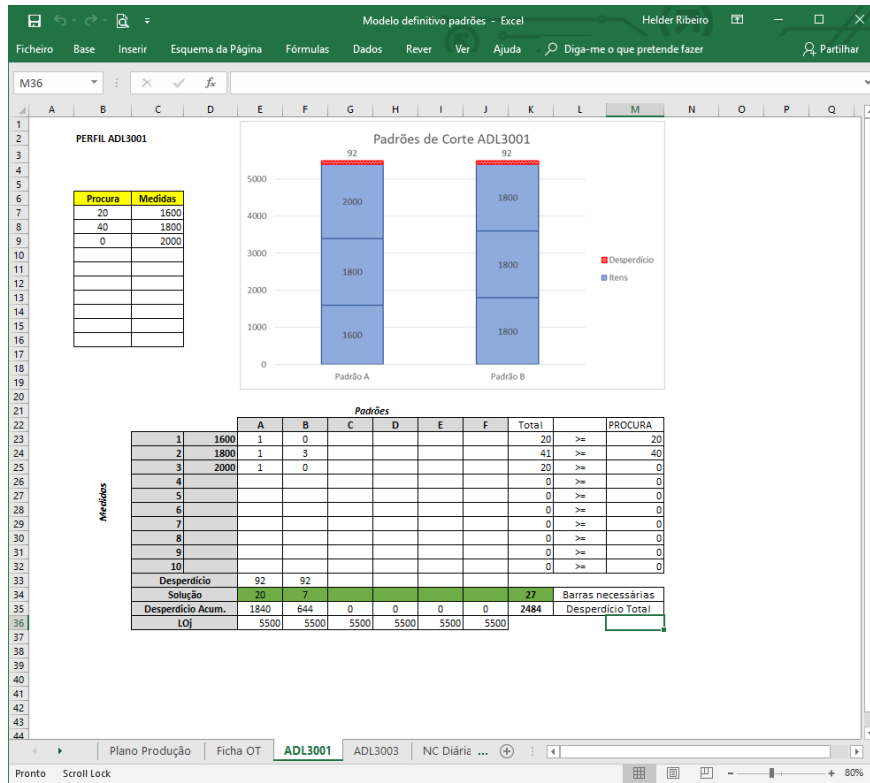


Figura 25- Tabela de resposta do modelo para perfil ADL3001

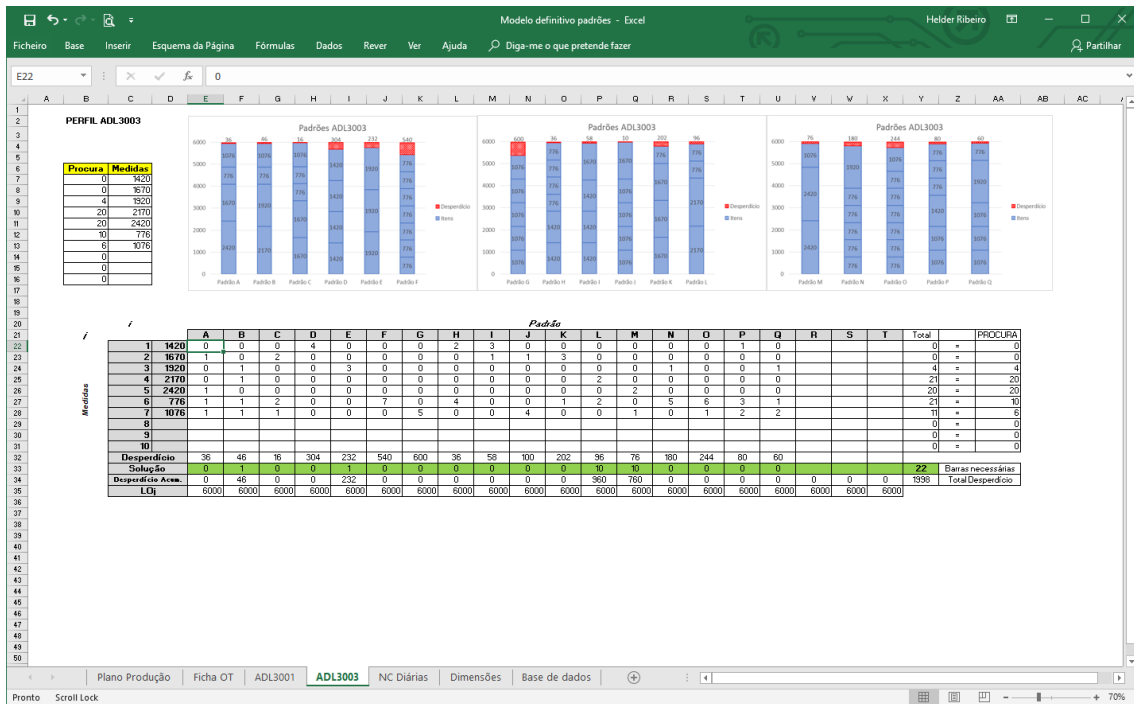


Figura 26- Tabela de resposta do modelo para perfil ADL3003

ÁRVORES DO PRODUTO

