



OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE BOBINES DE AÇO

PEDRO MIGUEL TEIXEIRA FERREIRA

Outubro de 2016

OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE BOBINES DE AÇO

Pedro Miguel Teixeira Ferreira

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE BOBINES DE AÇO

Pedro Miguel Teixeira Ferreira

Número 1100108

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

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Manuel Pereira Lopes pela motivação e todo o apoio prestado no contributo deste trabalho.

À Ferpinta S.A. que me abriu as portas ao mundo do trabalho e me possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Exmo. Sr. Avelino Ribeiro, administrador da Ferpinta S.A. por todo o apoio dado e por permitir a realização do trabalho no âmbito Ferpinta S.A..

Ao Eng.º Bruno Marques, responsável da qualidade na Ferpinta S.A., por todo o apoio prestado durante este trabalho.

A todos os meus amigos que me apoiaram e que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao Daniel que foi meu companheiro na etapa ISEP.

Ao meu Pai, Mãe, Irmão e Irmã por todo o apoio dado ao longo da minha vida.

Agradeço em especial à minha mulher Susana e ao meu filho Simão pelo apoio, paciência, incentivo e por toda a minha ausência.

PALAVRAS CHAVE: Problema de corte de *stock* Unidimensional; Multiobjectivo; Otimização; Programação linear inteira.

RESUMO

Enquadrado com a realidade no corte de bobines de aço na empresa Ferpinta S.A., este trabalho apresenta uma abordagem de resolução aos problemas numa perspetiva fundamental de racionalização e otimização dos recursos, orientada para objetivos específicos. Os problemas de corte de *stock* unidimensional consistem em cortar um conjunto de objetos disponíveis em *stock*, para satisfazer uma determinada procura de itens de modo a otimizar uma determinada função objetivo. É composta por três objetivos distintos (multiobjectivo), i.e., a minimização de perdas geradas no processo de corte (otimização da matéria-prima), a minimização do número de diferentes padrões de corte (tempo de preparação da máquina) e a minimização do corte de itens para *stock* (sem consumo imediato definido). É apresentado um modelo de programação linear inteiro para resolver o problema de corte unidimensional. O principal propósito é desenvolver como base na estrutura dos problemas de corte, um modelo de apoio à decisão que auxilie no dia-a-dia o decisor a escolher melhores soluções possíveis. Pretende-se otimizar não só em termos de qualidade de solução mas também em termos de tempo necessário para determinar a solução. Foram realizados testes computacionais com dados gerados aleatoriamente e com dados recolhidos na empresa, de forma a avaliar empiricamente o impacto da utilização do modelo proposto.

KEYWORDS: *One dimensional cutting Stock Problem; Multi-objective; optimization; integer linear programming.*

ABSTRACT

Enclosed within the reality on slitting steel coils in Ferpinta S.A., this paper presents an approach on solving problems in an ultimate perspective of downsizing and optimizing resources, focused on specific objectives. The one-dimensional cutting-stock problem consists of cutting a set of objects available in stock to satisfy a given search items, in order to optimize a given objective function. It consists of three different objectives (multi-objective), i.e., to minimize losses generated in the slitting process (optimization of the raw material), to minimize the number of different cutting patterns (machine setup time) and the minimization of cutting items to stock (without defined immediate consumption). It is presented as an integer linear programming model to solve the one-dimensional slitting problem. The main objective is to develop has a base on the structure of the cutting problems, a model of decision to assist in the day-to-day decision-maker to choose the best possible solutions. It is intended to optimize not only on a quality of results but also in terms of the time required to determine the finest solution. Computational tests were performed with randomly generated data and also collected in the company in order to empirically evaluate the impact of using the proposed model.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CSP	<i>Cutting Stock Problem</i>
C&P	Problemas de corte e empacotamento
1D-MSSCSP	<i>one dimensional multiple Stock Size Cutting Stock Problem</i>
PLMO	Programação Linear Multiobjectivo
IO	Investigação Operacional

Lista de Unidades

mm	Milímetro
ton	Tonelada
kg	Quilograma
m	Metro
€	Euro

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Stakeholders</i>	Organizações ou grupos ou indivíduos (internos ou externos) que são afetados pelas atividades de uma organização e por isso a procuram influenciar.
Matérias-primas	Materiais básicos utilizados na elaboração de produtos.
Algoritmo	Conjunto de regras ou processos bem definidos para a solução de um problema num número finito de passos.
Afetação	Procedimento de programação utilizado para distribuir os meios em função das necessidades, ou para relacionar origens com destinos.
Custo de Posse	Custo inerente ao fato de se possuir <i>stocks</i> de matérias-primas, existências em cursos e produtos acabados.
Flexibilidade	Capacidade de uma entidade responder com rapidez e variedade a alterações do contexto que a circunda, o que constitui a base da sua adaptação.
Fluxo de processo	Percurso específico que o processo de uma encomenda segue ao longo de uma fábrica.
Função objetivo	Função associada a um problema de otimização que determina qual a melhor solução.
Mapa de Gantt	Mapa de planeamento e controlo, que representa graficamente através de barras, a relação entre a produção planeada e realizada, o que permite acompanhar a evolução da produção.
Heurística	Forma de resolução de problemas em que as regras utilizadas são determinadas pela experiência ou intuição e não por otimização.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DE UM PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL (ADAPTADO DE (DYCKHOFF H. , 1990)).....	9
FIGURA 2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO PROCESSO (FERPINTA S.A.)	11
FIGURA 3 - FLUXO DO PROCESSO (FERPINTA S.A.).....	12
FIGURA 4 - MAPA DE GANTT (ADAPTADO FERPINTA S.A.).....	13
FIGURA 5 - EXEMPLO DE PADRÃO DE CORTE PARA O PROBLEMA DO CORTE DE BOBINES (ADAPTADO FERPINTA S.A.)	18
FIGURA 6 - ARCOS ENROLADOS APÓS A OPERAÇÃO DE CORTE (FERPINTA S.A.).....	20
FIGURA 7 - ARMAZÉM DE BOBINES FTE (FÁBRICA DE TUBO ESTRUTURAL FERPINTA S.A.)	20
FIGURA 8 – CASOS DISTINGUIDOS NO QUE RESPEITA À VARIEDADE DE PEQUENOS ITENS (ADAPTADO DE (G. WÄSCHER, 2007))	32
FIGURA 9 - CASOS DISTINGUIDOS NO QUE RESPEITA À VARIEDADE DE OBJETOS DE GRANDES DIMENSÕES (ADAPTADO DE (G. WÄSCHER, 2007)).....	33
FIGURA 10 - TIPOS DE PROBLEMAS BÁSICOS C&P (ADAPTADO DE (G. WÄSCHER, 2007))	34
FIGURA 11 - QUADRO COM OS TIPOS DE PROBLEMAS INTERMEDIÁRIOS: MAXIMIZAÇÃO DE SAÍDA (ADAPTADO DE (G. WÄSCHER, 2007))	36
FIGURA 12 - QUADRO COM OS TIPOS DE PROBLEMAS INTERMEDIÁRIOS: MINIMIZAÇÃO DE ENTRADA (ADAPTADO DE (G. WÄSCHER, 2007))	38
FIGURA 13 – GRÁFICO COM A EVOLUÇÃO DOS OBJETIVOS POR ALTERAÇÃO DO VALOR DE N	62
FIGURA 14 – SOLUÇÃO APRESENTADA PELO DECISOR PARA O PROBLEMA SEM O RECURSO A UM MODELO DE APOIO À DECISÃO (FERPINTA S.A.)	75
FIGURA 15 – SOLUÇÃO APRESENTADA PELO MODELO DE APOIO À DECISÃO (FERPINTA S.A.)	75

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - EXCERTO DE LISTAGEM DO PLANEAMENTO DE TUBO (ADAPTADO FERPINTA S.A.)	15
TABELA 2 - LISTA DE PEDIDOS PARA CORTE DE ARCO (ADAPTADO FERPINTA S.A.)	16
TABELA 3 - RESULTADOS OBTIDOS POR ALTERAÇÃO DO VALOR DE N NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA A CADA ITEM	61
TABELA 4 – RESULTADOS OBTIDOS COM FUNÇÃO MULTIOBJECTIVO	65
TABELA 5 – RESULTADOS COM O MODELO A UTILIZAR O OBJETIVO ÚNICO DA MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE	66
TABELA 6 - RESULTADOS COM O MODELO A UTILIZAR O OBJETIVO ÚNICO DA MINIMIZAÇÃO DO DESPERDÍCIO	68
TABELA 7 - RESULTADOS COM O MODELO A UTILIZAR O OBJETIVO ÚNICO DA MINIMIZAÇÃO DO CORTE DE ITENS PARA <i>STOCK</i>	70
TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS POR ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS ($W_1; W_2; W_3$) PARA FUNÇÃO MULTIOBJECTIVO	73
TABELA 9 – LISTA DE PEDIDOS, SEM POSSIBILIDADE DE CONCILIAÇÃO COM ITENS PARA <i>STOCK</i> (EXEMPLO REAL FERPINTA S.A.)	74
TABELA 10 - LISTA DE PEDIDOS PARA DIFERENTES TIPOS DE MATÉRIA-PRIMA, COM POSSIBILIDADE DE CONCILIAÇÃO COM ITENS PARA <i>STOCK</i> (EXEMPLO REAL FERPINTA S.A.)	76
TABELA 11 – RESUMO COMPARATIVO COM SOMATÓRIO DOS VALORES OBTIDOS PARA OS PRINCIPAIS OBJETIVOS DE CORTE (COM E SEM O AUXÍLIO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO)	76

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	9
2.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	11
2.2	PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO DE TUBO	13
2.3	PLANEAMENTO DO CORTE LONGITUDINAL	14
2.3.1	OBJETIVOS E RESTRIÇÕES	21
2.4	O PROBLEMA NUM CONTEXTO <i>LEAN THINKING</i>	22
3	REVISÃO DA LITERATURA	27
3.1	ANTIGA ESTRUTURAÇÃO DOS PROBLEMAS C&P	28
3.2	A NOVA TIPOLOGIA	31
3.2.1	TIPOS DE PROBLEMAS BÁSICOS C & P	34
3.2.2	ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	39
3.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	49
5	IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	57
5.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA A CADA ITEM	57
5.2	FUNÇÃO MULTIOBJETIVO	62
5.2.1	OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE	65
5.2.2	OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO DESPERDÍCIO	67
5.2.3	OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO CORTE DE ITENS PARA <i>STOCK</i>	68
5.3	PONDERAÇÃO DOS OBJETIVOS	70
5.4	TESTES COMPUTACIONAIS COM EXEMPLOS REAIS	73
5.5	IMPACTO ANUAL	77

6	CONCLUSÕES	83
7	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	87
8	ANEXOS	93
8.1	FICHAS DE CORTE DO EXEMPLO REAL APRESENTADO EM 5.4	95

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo dos preços da matéria-prima e energia requerem a minimização das despesas de produção em todos os processos. (Ramos, 2015) afirma que “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.” Com os avanços computacionais, e também por motivos económicos, as empresas tem estimulado os seus processos produtivos para serem mais eficientes, o que leva a pesquisas académicas de modelos de otimização para o controlo e planeamento dos seus sistemas produtivos. A maioria dos materiais utilizados na indústria são fornecidos em formatos e comprimentos padrão, e a sua utilização direta de tais formatos, na maior parte dos casos, é impossível. Estes devem ser previamente cortados nas dimensões ótimas no que respeita a minimização do desperdício.

O problema do corte de *stock*, conhecido como *Cutting Stock Problem (CSP)*, está entre as primeiras aplicações de pesquisa operacional e, durante as últimas décadas, muitos artigos sobre problemas de corte e empacotamento (C&P) foram publicados. C&P já existe há muitos anos e mesmo sem grandes cálculos as tarefas eram realizadas, ou seja, com base na intuição e experiência das pessoas. No entanto, problemas de C&P evoluíram para um campo muito ativo de estudo matemático desde 1939, quando (Kantorovich K. V., 1939) considera a minimização de sucata, num problema de corte unidimensional. Uma série de pequenos pedaços de material tinha de ser cortado a partir de um número limitado de peças maiores, e o objetivo é o de minimizar o desperdício de corte das peças maiores.

Os problemas de corte têm muitas aplicações práticas nos problemas do dia-a-dia e até podem ser relativamente fáceis de formular. Contudo, esses problemas são difíceis de resolver uma vez que são considerados NP-difíceis. A sua solução deriva da procura de uma solução num espaço grande de possíveis soluções. É usado extensivamente programação matemática e métodos combinatórios na sua resolução.

Muitos problemas reais são computacionalmente difíceis de resolver e podem ser formalizados apenas como problemas NP-difíceis. O interesse por estes problemas surge das muitas aplicações práticas e também pelos desafios que eles oferecem aos pesquisadores.

CSP consiste em determinar a melhor maneira de cortar objetos disponíveis em *stock*, em itens menores de modo que uma determinada procura seja satisfeita e uma certa função objetiva seja otimizada. Neste trabalho, trataremos do problema de corte de *stock* unidimensional, uma classe dos problemas de corte e empacotamento, onde há uma variedade fracamente heterogénea de objetos e a quantidade de cada objeto em *stock* é limitada, mas suficiente para produzir todos os itens. De acordo com a tipologia proposta em (G. Wäscher, 2007), este problema é classificado como *one dimensional multiple Stock Size Cutting Stock Problem* (1D-MSSCSP).

Neste trabalho, são considerados três objetivos na obtenção da solução final. Minimizar o desperdício, minimizar o número de padrões de corte e minimizar o corte de itens para *stock*. Em geral, nos problemas de corte de *stock*, utiliza-se como critério de otimização a minimização da perda do material que, no caso dos problemas com apenas um tipo de objeto (uma largura) em que a procura deve ser exatamente satisfeita, é o equivalente à minimização do número de objetos cortados. No entanto, com base em alguns problemas práticos, verifica-se que outros critérios de otimização são também importantes e devem ser levados em consideração. Por exemplo, nos casos onde existe escassez de capacidade, o tempo necessário para a troca de padrão de corte ganha significativa importância e, conseqüentemente, a redução do número de padrões de corte passa a ser um critério relevante (Moretti, 2008). Outro critério que também é considerado está relacionado com a redução de itens não necessários no padrão de corte, mas que por vezes têm de ser incluídos de modo a otimizar o corte. Estas situações ocorrem sempre que o corte não é otimizado apenas com os itens necessários. Como não existe o corte parcial de objetos, o padrão de corte inclui itens que podem ser utilizados no futuro. O número de padrões de corte depende diretamente das larguras e quantidades dos itens a serem produzidos. Assim sendo, podemos considerar que se o padrão de corte, que contém apenas itens necessários,

apresenta um desperdício superior ao aceitável, então é preferível incluir itens com procura prevista no futuro.

No presente trabalho é desenvolvido um modelo de apoio à decisão que considera os três critérios referidos numa única função multiobjectivo. A execução do mesmo teve o suporte no programa MICROSOFT OFFICE EXCEL 2010, utilizando o comando *OpenSolver* (otimizador desenvolvido para o Excel). O computador utilizado para resolver os problemas do modelo possui um sistema operacional Windows 10 Pro, Processador Intel Core i5-4460 CPU 3.20 GHz, 8GB de RAM e um sistema Operativo de 64 bit.

Uma descrição e definição dos problemas de corte são apresentadas no capítulo 2. É explicado a metodologia utilizada na empresa no planeamento do corte longitudinal, abordando os objetivos e restrições bem como a sua ligação ao planeamento de produção do tubo. Uma breve abordagem ao conceito *Lean Thinking* no enquadramento ao problema é feita. O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica dos problemas de corte existentes na literatura assim como as tipologias desenvolvidas. É feito um enquadramento do problema em estudo com a tipologia apresentada por (G. Wäscher, 2007). No capítulo 4 é apresentado o modelo matemático de programação linear inteira adequado ao modelo de apoio à decisão desenvolvido. No capítulo 5 é justificado, com dados obtidos aleatoriamente num gerador de dados do Excel, qual a necessidade de o modelo utilizar uma função multiobjectivo. É exposto qual o peso que cada objetivo deve representar na decisão final. Uma análise de sensibilidade ao modo como é atribuído a necessidade de corte de um determinado item é também demonstrado. Resultados obtidos com exemplos reais recolhidos na empresa são comparados com testes computacionais utilizando o modelo desenvolvido. Também é realizado uma estimativa do ganho anual com a utilização do modelo proposto. No último capítulo é apresentado observações conclusivas e referências a trabalhos futuros.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

2.2 PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO DE TUBO

2.3 PLANEAMENTO DO CORTE LONGITUDINAL

2.3.1 OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

2.4 O PROBLEMA NUM CONTEXTO *LEAN THINKING*

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os problemas de corte, de um modo geral, consistem na divisão de um recurso em partes mais pequenas, de acordo com uma procura e uma dimensão pré-estabelecida, otimizando uma determinada função objetivo, por exemplo, a minimização dos desperdícios, a minimização dos custos de produção ou a maximização do lucro. Estes problemas estão presentes em diferentes processos industriais tais como, o corte de bobines de aço, de papel ou de barras de aço, de placas de metal, de madeira ou de vidro, de rolos de tecido, entre outros.

A figura 1 ilustra o clássico problema de corte unidimensional. Por um lado, há um *stock* ilimitado de objetos grandes com comprimento 1000 mm para produção de itens. A lista de pedidos (itens) com comprimentos de 55 a 480 mm deve ser produzida para satisfazer as necessidades de corte.

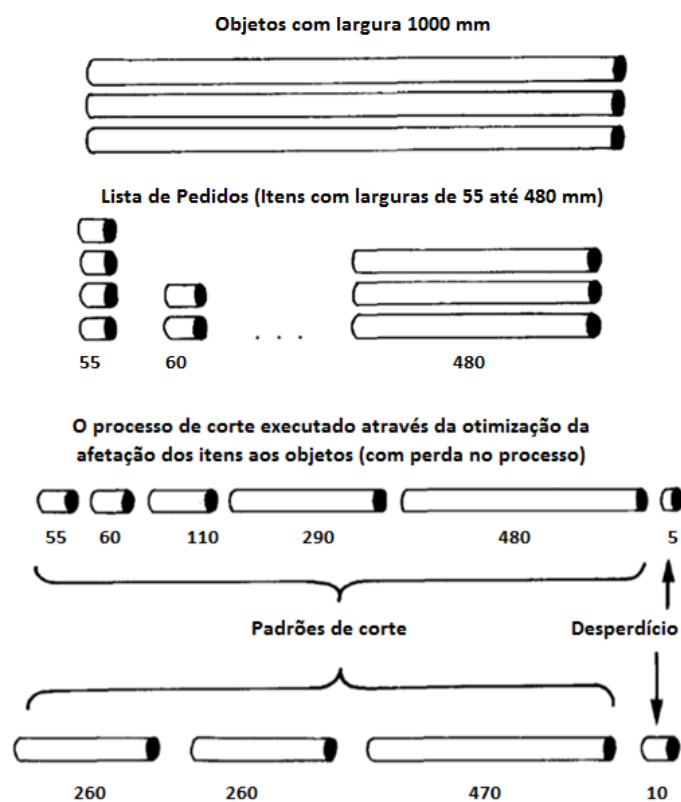


Figura 1 - Exemplo de um problema de corte unidimensional (adaptado de (Dyckhoff H. , 1990))

Estes dois grupos, o *stock* de objetos grandes e as necessidades de itens pequenos, constituem os dados básicos do problema de corte de material. Os itens menores são simultaneamente conciliados formando padrões de corte que são atribuídos aos objetos grandes de *stock*. O processo deve obedecer a certos objetivos e restrições, específicos do problema em questão.

Para a definição do problema de corte são então necessários dois conjuntos de dados: o conjunto dos materiais a cortar (bobines), que são designados por objetos; e o conjunto das partes cortadas que são designadas por itens (parcela da bobine, ou arco como designado na empresa). A variedade de itens possíveis para corte permite diferentes modos de cortar os objetos. Esta diversidade de corte dos objetos (para produzir os diferentes itens) é designada por padrão de corte.

Os diferentes ambientes industriais em que surgem estes problemas têm as suas especificidades, conduzindo a diferentes exigências práticas e objetivos. Nestas indústrias, reduções substanciais dos desperdícios significam uma melhoria da eficiência, conduzindo a um aumento da competitividade e do lucro, o que, de certo modo, motiva a investigação académica em modelos de otimização para os problemas de corte.

Diariamente ocorrem situações em que é necessário tomar uma decisão. Algumas delas são rotineiras e inconsequentes, enquanto outras podem ter um grande impacto na empresa, podendo mesmo condicionar o ganho (ou perda). Por isso mesmo, certas decisões têm de ser devidamente ponderadas, devendo procurar garantir-se que, quando tomada, essa é a melhor opção disponível. No caso específico do problema tratado, o número de opções disponível é tão elevado que se torna praticamente inviável que o agente de decisão (a pessoa a quem foi delegado o poder de decidir) opte sempre pela decisão mais assertiva. O objetivo do trabalho é criar uma ferramenta que permita otimizar a capacidade do agente decisor.

2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Ferpinta S.A. sediada em Carregosa, Oliveira de Azeméis é uma empresa de base metalomecânica integrada no grupo Ferpinta ocupando 35.580 m² de área coberta, num total de 108.994 m², dedicada primordialmente ao fabrico de tubo de aço conformado a frio soldado longitudinalmente para aplicações estruturais, engenharia e de precisão.

A matéria-prima base que alimenta todo o processo é o aço em formato de bobina, com diferentes características mecânicas (classe de aço), espessuras, acabamentos superficiais e até processos de laminagem (laminado a frio ou a quente). A capacidade produtiva ronda as 350.000 toneladas por ano de tubo fabricado, sem inclusão de qualquer operação de valor acrescentado, o que a torna num dos maiores produtores de tubos de aço soldado da europa. À soldadura por alta frequência e conformação a frio do tubo acrescentam operações de valor acrescentado tais como roscagem, ranhuragem, galvanização a quente e ensaio hidrostático. Produz ainda outros produtos por conformação como os perfis abertos (calha), corte transversal e corte longitudinal (formatos e arco). A descrição sumária do processo está identificada na figura 2.

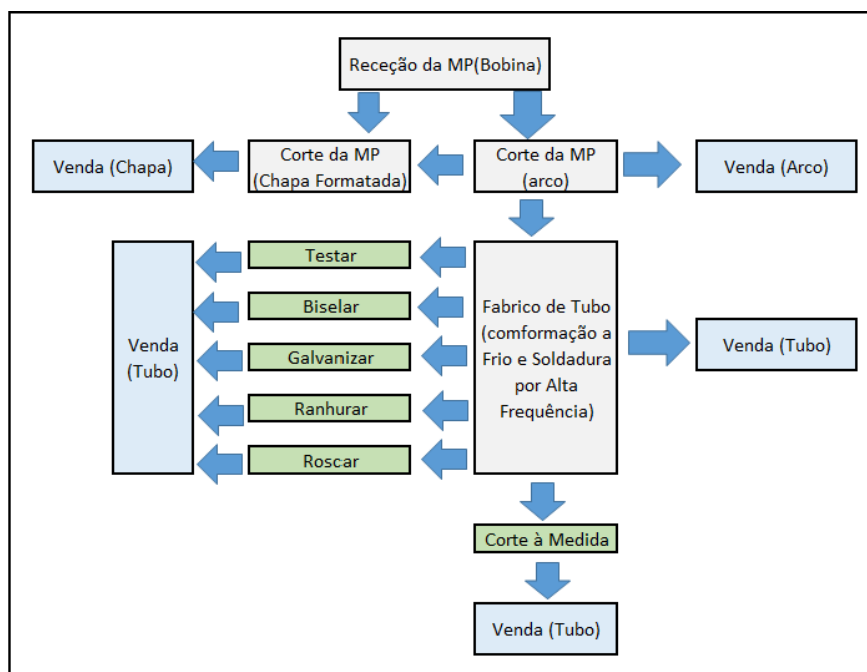


Figura 2 - Descrição sumária do processo (Ferpinta S.A.)

A empresa possui várias máquinas de corte longitudinal de matéria-prima. Todas elas com capacidades diferentes, bem como com restrições de corte diferentes, i.e., a largura mínima de cada item, a largura máxima de cada objeto, a espessura mínima ou máxima, a resistência mecânica do aço, o número de itens máximo admissível (inversamente proporcional à espessura da matéria-prima) ou o peso máximo de cada objeto.

A figura 3 mostra uma abordagem sucinta do fluxo do processo produtivo da empresa. As bobinas são rececionadas e após a sua inspeção, são armazenadas e localizadas. Assim que surge a necessidade de corte, as bobinas são encaminhadas para as respetivas linhas de corte para serem cortadas longitudinalmente, sendo assim transformadas em arcos. Após a operação de corte, os arcos são identificados (e localizados). São encaminhados para as respetivas linhas de tubo. A transformação do arco em tubo é feita após a alta frequência e conformação a frio nas linhas de fabrico de tubo. O tubo é então armazenado até que seja expedido.

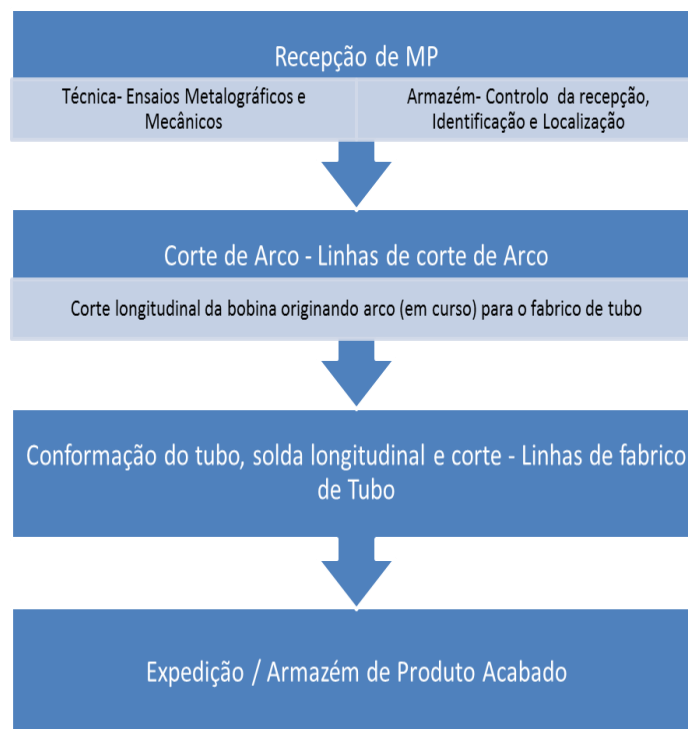


Figura 3 - Fluxo do processo (Ferpinta S.A.)

2.2 PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO DE TUBO

A empresa labora em produção contínua, num sistema de produção do tipo *Flow shop*, ou seja, orientada para o produto. Este tipo de processo caracteriza-se pelo fabrico de produtos em maiores quantidades (lotes) e em menor variedade. É portanto menos flexível, embora consiga adaptar-se aos pedidos do cliente (em quantidade, tempo e tipo). Como tal, o planeamento é elaborado tendo como base uma sequência de produção que minimize as trocas de ferramentas. Mensalmente é elaborado um plano que define quais os produtos e quantidades a produzir.

A figura 4 exibe um excerto de um mapa de *Gantt* utilizado na empresa. O gráfico é utilizado como uma ferramenta de controlo da produção. Nele, pode ser visualizado a data estimada da produção de cada item. É também com este tipo de informação que o Departamento Comercial assume novas encomendas e tem conhecimento da data estimada para produção de um determinado projeto.

Ferramenta	Projeto	Ordem de Produção	Item	Unidades	Compr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Q225		250025349	TUBO RECT 300x150x10 S355J2H	20	12,000	>>							
Q225		250025350	TUBO RECT 300x150x10 S355J2H	1	6,000	>>							
Q250		250025351	TUBO RECT 300x200x5 S275J0H	35	12,000	>>							
Q250		250025352	TUBO RECT 300x200x5 S275J0H	1	6,000		>>						
Q250		250025353	TUBO RECT 300x200x12 S355J2H	290	12,000		>>	>>	>>	>>			
Q250		250025354	TUBO RECT 300x200x12 S355J2H	1	6,000						>>		
Q250		250025355	TUBO QUAD 250x6 S275J0H	40	12,000						>>		
Q250		250025356	TUBO QUAD 250x6 S275J0H	1	6,000						>>		
R114		250025357	TUBO RED 114,3x3,0 S235JRH	50	12,000						>>		
R114		250025358	TUBO RED 114,3x3,0 S235JRH	205	6,000						>>	>>	
R114	400005377	250025359	TUBO RED 114,3x3,0 S235JRH	400	7,000						>>	>>	

Figura 4 - Mapa de Gantt (adaptado Ferpinta S.A.)

Todos os pedidos chegam ao Departamento de produção através do registo de encomendas na base de dados do sistema ERP. É com base nesses registos que o plano é elaborado. A empresa fabrica tubos por encomenda (*make-to-order*) e tubos para *stock* (*make-to-stock*).

- ✓ Na produção por encomenda, apenas é produzido o que é pedido pelo cliente e de acordo com os requisitos e data previamente acordada. Normalmente está associado a tubos com comprimentos diferentes de 6 e 12 metros e/ou pedidos com requisitos especiais. Este tipo de registos é denominado na empresa por projetos.
- ✓ Os itens a produzir para *stock*, normalmente tubos com comprimentos de 6 e 12 metros, são planeados com base nas previsões de vendas. Para tal, é analisado um conjunto de fatores, tais como, o histórico de vendas, a rotação da ferramenta, o *stock* existente, as encomendas registadas, a sazonalidade, etc.

O planeamento de tubo pode ser visto como a base da produção na organização. Permite uma perceção da ocupação por máquina e, como tal, entre outros aspetos, ajuda a determinar prazo para novas encomendas. Auxilia também no planeamento do corte longitudinal, ou seja, quanto mais informação referente às necessidades de arco a médio prazo melhor. Este plano não é irrevogável, isto é, permite o incremento de novas encomendas (extra programa), bem como a alteração da sequência de entrada de ferramentas sempre que se justifique. Sendo um processo rígido, a capacidade de adaptação às variações de mercado e negócios pontuais é uma mais-valia. Essa postura faz com que constantemente um planeamento rígido é obrigado a se tornar flexível, ficando em grande parte dependente da sua etapa inicial, o corte longitudinal.

2.3 PLANEAMENTO DO CORTE LONGITUDINAL

As necessidades do corte de arco chegam através do planeamento do tubo, pois a produção dos tubos tem como estrutura o arco, assim como a produção de arcos tem como estrutura as bobines. Tal como anteriormente referido, o planeamento de tubo é elaborado com base numa sequência lógica de entrada de ferramentas que minimizem os tempos de *setup* e afinações. No caso do planeamento

do corte longitudinal, as necessidades de corte são agrupadas por tipo de matéria-prima, ou seja por espessura e classe do aço (*steel grade*).

O formato da listagem de necessidades do corte de arco pode ser observado na tabela 1. Cada linha apresenta a informação principal de cada ordem de produção, i.e., o número do projeto (se aplicável), o tipo de perfil, a quantidade e comprimento que deve ser produzido. Nas últimas colunas da tabela, pode-se analisar a informação mais útil para o planeamento de corte longitudinal, a estrutura do produto e suas necessidades. A largura do arco é mensurada em milímetros e corresponde aproximadamente ao perímetro do tubo. Por ultimo, as necessidades de cada arco são apresentadas em toneladas.

Tabela 1 - Excerto de listagem do planeamento de tubo (adaptado Ferpinta S.A.)

Ordem de Produção	Projeto	Item	Unidades	Compr.	Estrutura	Nec. (ton)	Stock (ton)	Falta (ton)
250025049		TUBO RECT 100x80x6 S275JOH	72	12,000	ARCO PRT 339x6 (S275JO)	13,0	30,1	
250025050	40005378	TUBO RECT 100x80x5 S235JRH	280	7,500	ARCO PRT 341x5 (S235JR)	26,9	3,0	-23,9
250025051		TUBO RECT 100x80x4 S275JOH	128	12,000	ARCO PRT 344x4 (S275JO)	16,0	55,9	
250025052		TUBO RECT 100x80x6 S275JOH	160	6,000	ARCO PRT 339x6 (S275JO)	14,4	17,1	+2,6
250025053		TUBO RECT 100x80x3 S235JRH	80	12,000	ARCO PRT 355x3 (S235JR)	7,6	0,0	-7,6

Com base nas previsões de fabrico (mapa de *gantt*), é conhecido a importância de corte de cada item em termos de período de tempo, i.e., um item que tenha um histórico de consumo mas não tem necessidade planeada, só deve ser considerado no padrão de corte caso seja imprescindível para otimizar a bobine. Não se sabe quando vai ser utilizado. Os itens com necessidade definida devem ser conciliados simultaneamente, dentro do exequível, com o mínimo de padrões possível. Por último, os itens planeados mas que apenas serão utilizados alguns dias (ou até semanas) depois devem ter uma importância intermédia na definição do padrão de corte.

Os objetos para corte estão disponíveis para consulta na base de dados. São codificados por espessura, largura e classe do aço. Normalmente têm dimensões normalizadas, i.e., largura 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm e 2000 mm. As bobines com larguras específicas, para tubos específicos, não têm importância para o problema

deste trabalho, i.e., já é conhecido o padrão de corte. A dimensão da bobine tem largura múltipla do item a cortar (bobine com total aproveitamento).

Com a informação dos objetos e a lista de pedidos para corte com a respetiva importância, o planeador pode definir os padrões de corte. O objetivo é encontrar um padrão de corte que permita simultaneamente otimizar a bobine, reduzir do número de *setups* da máquina e minimizar o corte de itens sem necessidade a curto prazo (minimizar existências em armazém). Todos estes conceitos existem, mas encontrar o melhor padrão de corte, aquele que mais se aproxima dos objetivos e que cumpra com todas as restrições, atualmente é executada por tentativa erro, ou seja, sem o auxílio de um programa que calcule a melhor combinação possível. A escolha desse padrão de corte é feita com base na experiência dos planeadores/decisores, o que pode levar a produzir mais desperdício de material que o inevitável, gerando então um maior custo do que o necessário. O tempo aplicado até encontrar uma solução, que cumpra minimamente com o pretendido, é outro aspeto muito importante.

Como exemplo, para facilitar a explicação do procedimento utilizado na empresa, a tabela 2 mostra uma lista de pedidos para corte. É admitido que existe um *stock* limitado mas suficiente, de bobines com largura 1500 mm, para satisfazer todas as necessidades. Para definir o padrão de corte será necessário primeiro saber quantos itens, de cada tipo de item, deve ser incluído no padrão de corte.

Tabela 2 - Lista de pedidos para corte de arco (adaptado Ferpinta S.A.)

Arco (mm)	Importância de corte	Necessidades (ton)	Necessidades em itens para bobines com 10 ton e largura 1500 mm
341	máxima	23,900	10,51
182	alta	6,370	5,25
222	média		
370	média		
470	muito baixa		
630	muito baixa		

Como o peso das bobines é muito variável, o cálculo da quantidade de itens para cada bobine torna-se impraticável. Se fosse necessário calcular o peso de cada

arco associado a cada bobine, o planeador necessitava de muito tempo para o fazer, e a probabilidade de cometer erros era muito superior. Para contornar este obstáculo é considerado uma quantidade fixa de 10 toneladas, i.e., todas as bobines, independentemente da sua largura, têm peso de 10 toneladas.

De modo a exemplificar como foi determinado 10,51 itens como necessidade de corte para o arco 341 mm, exposto na tabela 2, os seguintes cálculos são apresentados:

$$10.000 \text{ Kg} / 1500 \text{ mm} = 6,67 \text{ kg/mm}$$

Realizando uma regra três simples, se cada milímetro da bobine pesa 6,67 kg, o item 341 mm terá um peso de 2.273 kg.

$$341 \text{ mm} \times 6,67 \text{ Kg/mm} = 2.273 \text{ kg}$$

Se é necessário o corte de 23.900 kg do item 341 mm, que tem um peso unitário de 2.273 kg, a necessidade em unidades do item 341 mm é de 10,51.

$$23.900 \text{ Kg} / 2.273 \text{ Kg} = 10,51$$

O mesmo raciocínio deve ser realizado para os todos os itens com necessidade definida. A grande vantagem de transformar as necessidades dos itens em unidades é poder encontrar uma relação de proporção na definição do padrão de corte. No exemplo apresentado, a proporção do arco 182 mm, comparativamente ao arco 341 mm, é de 1:2, ou seja, o padrão de corte deve tentar conciliar 1 arco de 182 mm e 2 arcos de 341 mm (ou quantidades múltiplas). Se for seguido este raciocínio, no caso em que o padrão de corte tenha como objetivo satisfazer mais do que uma

necessidade de arco, é possível uma melhor aproximação das quantidades pretendidas e reduzir o número de padrões de corte.

Se não fosse considerado o objetivo de criar padrões de corte com o máximo de necessidades definidas para utilização próxima, poderíamos definir como solução o seguinte padrão de corte:

$$\text{Padrão de corte: } 3 \times 341 + 1 \times 470 = 1493 \text{ mm}$$

Este padrão de corte satisfaz a necessidade principal do item 341 mm mas num futuro próximo será necessário executar um outro padrão de corte de modo a incluir e satisfazer a necessidade de corte do item 182 mm. Empregando a relação de proporção referida, um melhor padrão de corte é apresentado na figura 5.

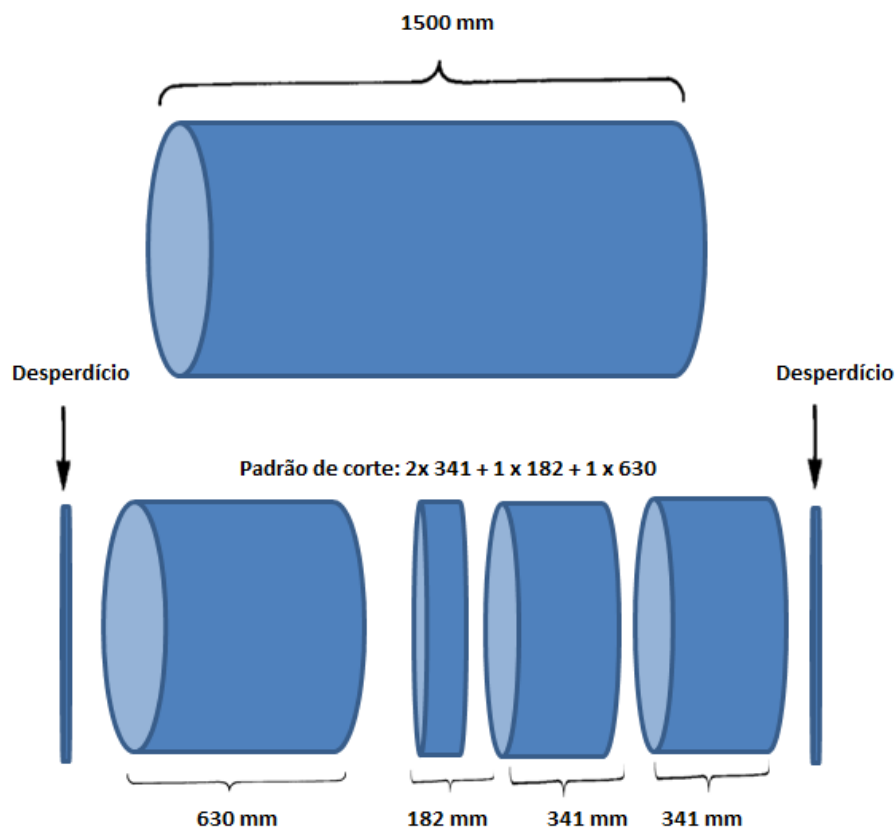


Figura 5 - exemplo de padrão de corte para o problema do corte de bobines (adaptado Ferpinta S.A.)

Definido o padrão de corte, será necessário determinar a quantidade de objetos (peso) a cortar. Como foi considerado que cada bobine tem um peso de 10 toneladas e se em cada bobine é extraído um arco de 314 mm, a quantidade para corte será de 105.100 kg de acordo com o cálculo abaixo:

$$10,51 \text{ (arcos necessários)} \times 10.000 \text{ kg (peso de cada bobines)} = 105.100 \text{ kg}$$

Mas como o padrão de corte inclui dois arcos de largura 341 mm, a quantidade de bobines necessário é de 52.560 kg

$$105.100 \text{ kg (para um padrão de corte com um arco)} / 2 \text{ (arcos)} = 52.560 \text{ kg}$$

A quantidade calculada é apenas um valor de referência, muito próxima do que é executada, ou seja, a quantidade é ajustada ao peso das bobines. Não é garantido o corte de arco com quantidade exata. Trabalha-se com uma tolerância de quantidade admissível.

Quando se trata do corte de arco para o fabrico de tubo para *stock*, a tolerância de quantidade é o menos importante. No caso do corte de arco para encomenda, em que é previsto desvios significativos, previamente é acordado com o cliente uma tolerância de quantidade prevista, sabendo também existe perdas geradas no próprio processo de fabrico de tubo.

Embora seja tecnicamente possível, o corte de objetos parciais não é aceite. Depois de iniciar o processo de corte, este não deve ser interrompido, a não ser que algum problema ocorra e a máquina pare, i.e., quando iniciado o corte de uma bobine, esta deve percorrer todo o seu comprimento. Conforme demonstrado na figura 6, os itens resultantes são automaticamente enrolados em novas bobines (arco).



Figura 6 - arcos enrolados após a operação de corte (Ferpinta S.A.)

A escolha de bobine específica, para o caso geral aqui tratado, não é aplicável. Solicitar bobina (s) específica (s) ocorre apenas quando é necessário o cumprimento de algum requisito em que, nem todas as bobines cumprem com o solicitado, tais como, propriedades químicas e/ou mecânicas do aço, tolerância de quantidade, *etc.* Na prática verifica-se que muitas vezes a bobine selecionada encontrava-se em posição de difícil acesso (várias bobines empilhadas sobre a bobine selecionada). Tal facto dificulta a operação de retirada das bobines selecionadas, pois é necessário um maior número de movimentações a serem realizadas, ver como exemplo a figura 7, onde é possível verificar a forma empilhada como as bobines são armazenadas.



Figura 7 - Armazém de bobines FTE (Fábrica de tubo estrutural Ferpinta S.A.)

2.3.1 OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

O processo de corte longitudinal deve obedecer a certos objetivos e restrições, específicos do problema em questão, i.e.:

- ✓ Objetivo de determinar o(s) padrão(ões) de corte que otimize(m) os objetos, ou seja, o corte longitudinal de todos os itens satisfazendo as suas necessidades, minimizado o desperdício no corte (também designado por *apara*). Designa-se por *apara* a perda inevitável na lateral das bobinas para eliminar as irregularidades dimensionais das extremidades e permitir o corte de arco com largura exata. Um valor médio de 6 a 10 mm (*apara*) é o necessário para conseguir o corte de uma bobine.
- ✓ Objetivo de reduzir o número de *setups*. O tempo de preparação de uma máquina de corte é de 45 a 90 minutos (depende do número de cortes e se é realizada a pré-montagem) e o tempo médio para corte de uma bobina é de 15 a 25 minutos. Deve existir o objetivo de executar padrões de corte que minimizem as trocas de ferramenta.
- ✓ Objetivo de minimizar o corte de arco para *stock*. Para satisfazer a totalidade da procura, tendo sempre como principal objetivo otimização da bobina, frequentemente é necessário corte de arco, que não sendo necessário no imediato, é sabido (com base em previsões de venda) que acabará por ser utilizado mais tarde, sendo armazenado até ao momento da sua utilização.
- ✓ Restrição do número máximo de arcos conciliáveis. Está limitado pela capacidade da máquina, e disponibilidade de ferramenta (como por exemplo laminas de corte, casquilhos, etc). Quando maior a espessura das bobines a cortar, menor será o número máximo possível de arcos conjugados.

2.4 O PROBLEMA NUM CONTEXTO *LEAN THINKING*

Numa perspetiva económica, as empresas só conseguem subsistir se constantemente procurarem minimizar o desperdício tornando-se mais competitivas (aumentando a sua margem). Ganhar mais vendendo mais caro é cada vez difícil devido à fixação de preços onde o cliente já procura um preço adaptado ao resultado/valor final que pretende ao seu produto. Daí ser tão importante aumentar as margens. O desperdício deve ser minimizado ao máximo mas sempre sem por em causa a qualidade do produto, ou seja, deve ser adotado uma estratégia que tem de ser acompanhada por um nível de qualidade aceitável. Estes ganhos devem ser o mais próximos possível de uma situação ótima, gastando apenas o indispensável. Num enquadramento ao problema, a situação ótima será o corte das bobines sempre com a máxima otimização. Apenas a perda necessária no corte deve ser desperdício.

O conceito *Lean Thinking* enquadra-se totalmente no âmbito deste trabalho. (Womack, J. and D. Jones , 2005) referem-se ao *Lean Thinking* como sendo o “antídoto para o desperdício”. De acordo com estes autores, o desperdício refere-se a qualquer atividade humana que não acrescenta valor. Contudo na opinião do autor, o conceito de desperdício deve ser alargado, passando a incluir não apenas as atividade humanas como também qualquer outro tipo de atividades e recursos usados indevidamente e que contribuem para o aumento de custos, de tempo e da não satisfação do cliente ou das demais partes interessadas (*stakeholders*) no negócio.

Existem 7 desperdícios identificados por Shigeo Shingo no início da década de 80 como referido em (CORRÊA e GIANESI, 1996.) em que a aplicação do modelo proposto terá como objetivo minimizá-los, são eles:

- Excesso de produção: É um dos desperdícios mais graves, uma vez que produzir a mais do que é necessário dá origem a várias atividades que não são necessárias, faz aumentar os níveis de *stocks* que correm o risco de não vender. Num sistema de produção *lean* produz-se exatamente aquilo que o mercado procura, sendo encarado como pior, a produção em excesso do que a produção

por defeito (Imai, 1997). O objetivo é de reduzir a quantidade de itens que não tenham necessidade de corte mas que por vezes são considerados de modo a otimizar o corte da bobine. Se for alcançado este objetivo, ganha-se também disponibilidade de máquina e de recursos. Ter-se-á uma maior disponibilidade de matéria-prima, i.e., se for utilizado menos objetos para satisfazer as mesmas necessidades, haverá menos itens em *stock* (inventário) e a matéria-prima poderá ser utilizada para outras encomendas. Pode ser considerando ainda o desperdício de energia ao produzir mais itens do que o necessário e uma menor flexibilidade de planeamento ao ter a máquina ocupada a produzir itens não necessários.

- Tempo de espera: Diz respeito ao tempo que as pessoas ou equipamentos perdem sempre que estão à espera de algo. No enquadramento do problema, o tempo que um planeador emprega na execução de um padrão de corte pode ser minimizado com a utilização de um modelo de apoio à decisão. Problemas com grau de dificuldade elevado podem levar horas até serem resolvidos.

- Transporte e movimentações: Transporte é qualquer movimentação ou transferência de materiais, de um sítio para outro, por alguma razão. Os sistemas de transporte e movimentação causam efeitos inconvenientes nas organizações. Estes ocupam espaço na fábrica, acrescem custos, aumentam o tempo de fabrico e, muitas vezes, levam a que os produtos se danifiquem com as movimentações. Não é esperado que se elimine todas as movimentações, mas que se consiga minimizar ao máximo estas transações.

- Desperdício do próprio processo: Quanto mais otimizado for o corte das bobines, menor será o desperdício do processo. Todos os processos geram perdas, contudo estas devem ser eliminadas ao máximo. Podem ser alcançadas através da formação dos colaboradores ou pela substituição de processos por outros mais eficientes, tais como a otimização das bobines.

- Stocks: Material ou informação parada, falta de ordem no processamento é sempre desperdício. Este faz com que seja necessário mais espaço de armazenamento e origina uma elevada carga ao nível de logística interna. Pretende-se que o modelo procure minimizar o *stock* de arco (inventário). Problemas de qualidade são também uma causa comum do excesso de *stock*. O material com o tempo tem tendência a deteriorar-se.

- Defeitos: A definição de desperdício inclui os defeitos ou problemas de qualidade. Estão também associados os custos de inspeção, resposta às queixas dos clientes e as reparações (*rework*). Os erros humanos criam defeitos. Quando os defeitos ocorrem, as queixas dos clientes aumentam. Esta é uma medida da taxa de defeitos (%). Quando os defeitos acontecem com alguma frequência, são aumentadas inspeções para evitar que os defeitos passem para os clientes, e os *stocks* aumentam para compensar os itens com defeito. Em consequência, a produtividade diminui e o custo dos produtos e serviços aumenta.

- Trabalho desnecessário: Refere-se ao que não é realmente necessário para executar as operações. A produção de itens ou o número de *setups* a mais do que o necessário, a utilização de recursos desnecessários, o *rework*, pode ser tudo minimizado com uso adequado de uma ferramenta capaz de ajudar o decisor a otimizar os processos. Encontrar um padrão de corte por tentativa erro pode também ser visto como um trabalho desnecessário. Muitas vezes pode mesmo levar à desmotivação da pessoa.

REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ANTIGA ESTRUTURAÇÃO DOS PROBLEMAS C&P

3.2 A NOVA TIPOLOGIA

3.2.1 TIPOS DE PROBLEMAS BÁSICOS C &P

3.2.2 ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

3.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 REVISÃO DA LITERATURA

Dentro dos tópicos do problema de corte e empacotamento, surgem problemas onde a estrutura lógica e a finalidade são as mesmas, mas na literatura aparecem descritos com nomes diferentes. Por isso (Dyckhoff H. , 1990) apresenta uma lista com os nomes mais usados para se referir a este tipo de problemas:

Problema de Corte e Empacotamento (*Cutting and Packing Problems*)

- ✓ *Cutting Stock e Trim Loss Problems.*
- ✓ *Bin Packing, Dual Bin Packing, Strip Packing, Vector Packing e Knapsack Problem* (Problema da Mochila).
- ✓ Carregamento de veículos, carregamento de paletes ou carregamento de contentores;
- ✓ Problemas de encaixe (*assortment problems*) ou partição (*partitioning problems*), de formas irregulares (*nesting problems*), ou problemas de *layout*, associados maioritariamente a aplicações geométricas
- ✓ *Line Balancing, Memory Allocation e Multiprocessor Scheduling Problems.*

Durante muitos anos foram publicados muitos trabalhos de problemas do tipo C&P. No entanto não existia nenhuma pesquisa que reunisse sistematicamente o assunto de C&P e que integrasse os vários tipos de problemas e suas noções. De modo a alcançar esse objetivo, foram desenvolvidas tipologias. Segundo (G. Wäscher, 2007), a tipologia é uma organização sistemática de objetos em diferentes categorias homogêneas com base num critério de caracterização base. Destina-se a lidar com objetos reais considerados importantes em primeiro lugar, enquanto os hipotéticos e/ou menos importantes podem ser negligenciados. Orientada para a prática, a tipologia fornece uma visão mais concisa dos objetos mais relevantes e unifica definições e nomenclaturas. Prepara assim o terreno para a investigação ao facilitar a comunicação entre pesquisadores da área. (G. Wäscher, 2007) afirmam ainda que se as publicações são classificadas de acordo com uma tipologia existente, irá proporcionar um acesso mais rápido à literatura relevante.

Com o aumento de publicações nas últimas décadas na área de C&P, a primeira tipologia introduzida (Dyckhoff H. , 1990) nem sempre encontrou aceitação por parte da comunidade científica. Segundo (G. Wäscher, 2007) passado quase 15 anos após a sua publicação, tornou-se óbvio que a tipologia apresentada por (Dyckhoff H. , 1990) era insuficiente no que diz respeito à inclusão dos desenvolvimentos atuais.

Deste modo, (G. Wäscher, 2007) apresentam uma nova e melhorada tipologia que teria como objetivo principal unificar a opinião da comunidade científica. A tipologia permitirá uma classificação total de todos os problemas de C&P conhecidos. Irá ajudar a identificar e catalogar trabalhos em áreas em que nenhum, ou muito pouca pesquisa tem sido feita. Por último, a tipologia sugerida também está aberta a novos tipos de problemas que possam ser introduzidos no futuro. (G. Wäscher, 2007) sempre que possível, tiveram o cuidado de manter os conceitos da tipologia em vigor de forma a evitar problemas de interpretação e confusão dentro da mesma.

Nos subcapítulos seguintes é apresentado a estrutura definida pelos autores bem como os parâmetros usados na categorização dos problemas de C&P. Por último, será exposto o enquadramento da tipologia ao problema de corte de bobines de aço.

3.1 ANTIGA ESTRUTURAÇÃO DOS PROBLEMAS C&P

Para a definição do problema de C&P são necessários dois conjuntos de dados, o conjunto dos materiais a cortar, que são designados por objetos e o conjunto das partes cortadas que são designadas por itens.

- ✓ Conjunto de objetos grandes (entrada, oferta);
- ✓ Conjunto de itens pequenos (saída, procura).

O objetivo do problema é distribuir o conjunto de itens pequenos, com número de elementos que varia de 1 a n , pelo conjunto de objetos grandes, que poderá variar

também de 1 a n . A nível de posicionamento podem ser retiradas portanto algumas restrições:

- ✓ Os itens pequenos não poderão ser colocados de forma sobreposta nos objetos grandes;
- ✓ Os itens pequenos terão de ficar na sua totalidade dentro das margens dos objetos grandes.

Este tipo de restrições depende da dimensão do problema, que pode ser unidimensional ou multidimensional. O objetivo da solução também é distinguido como fator de classificação do problema. A utilização parcial ou total do conjunto de objetos grandes e itens pequenos, respetivamente, permite a distinguir dois tipos de solução: a minimização de objetos grandes utilizados ou a maximização de itens pequenos. Estas soluções partilham no entanto um conjunto de outros problemas que são necessários resolver de forma a alcançar a solução final ótima:

- ✓ Seleção de objetos grandes;
- ✓ Seleção de itens pequenos;
- ✓ Problema de agrupamento relativamente a itens pequenos;
- ✓ Problema de alocação relativamente aos grupos de itens pequenos nos objetos grandes;
- ✓ Problema de *layout* relativamente ao arranjo dos itens pequenos selecionados em cada um dos objetos grandes considerando a condição geométrica;

A tipologia de (Dyckhoff H. , 1990) utiliza também como critérios, a classificação tanto dos objetos grandes como dos itens pequenos. Para os objetos grandes são consideradas três classes diferentes: objeto único, objetos parecidos, objetos diferentes. Para os itens pequenos são consideradas quatro classes: poucos itens de diferentes tipos, muitos itens de diferentes tipos, muitos itens de relativamente poucos tipos, itens congruentes. Abaixo segue a categorização apresentada por

(Dyckhoff H. , 1990) com os quatro critérios de acordo com a qual os problemas de C&P são classificados.

1. Dimensão

- (1) Uma dimensão
- (2) Duas dimensões
- (3) Três dimensões
- (N) N-dimensões, com $N > 3$

2. Tipo de atribuição

- (B) Todos os objetos e uma seleção dos itens
- (V) Uma seleção dos objetos e todos os itens

3. Características dos objetos

- (O) Um objeto
- (I) Formas idênticas
- (D) Formas diferentes

4. Características dos itens

- (F) Poucos itens (de diferentes formas)
- (M) Muitos itens de muitas formas diferentes
- (R) Muitos itens com relativamente poucas formas diferentes (não congruentes)
- (C) Formas congruentes.

Segundo (G. Wäscher, 2007), o trabalho de (Dyckhoff H. , 1990) quando foi publicado inicialmente representou um marco na pesquisa de C&P, contudo o código utilizado pelas categorias não era autoexplicativo do ponto de vista de uma comunidade (de língua Inglesa) internacional de pesquisadores. O fato de derivar de uma língua que não era o inglês (alemão), provocou alguma dificuldade na aceitação por parte da comunidade científica. Para além disso, em alguns tipos de problemas,

como é o caso do *Vehicle Loading Problem*, a classificação do problema era clara. Para (G. Wäscher, 2007) o problema tanto foi codificado como 1/V/I/F como 1/V/I/M. Para um exemplo como este, uma classificação uniforme e coerente seria o pretendido. Outros exemplos de discordância de conceitos podem ser encontrados em (G. Wäscher, 2007).

3.2 A NOVA TIPOLOGIA

A nova tipologia desenvolvida por (G. Wäscher, 2007) baseia-se num esquema ramificado onde o problema começa classificado como um *Pure C&P Problem Type* e termina em *Refined Problem Type*. Para definição do problema, o esquema vai utilizando os parâmetros referidos em (Dyckhoff H. , 1990), permitindo assim explicar onde problemas com parâmetros incertos se separam dos problemas tipo. O tipo de problema com parâmetros incertos é designado como *Problem Variants*. Segundo (G. Wäscher, 2007), *Pure C&P Problem Type* são problemas em que a solução consiste em informações sobre o conjunto de padrões e o valor correspondente da função objetivo. Um problema do tipo *Pure C&P Problem Type* juntamente com os parâmetros de tipo de atribuição (maximização da saída ou minimização das entradas) e variedade de itens pequenos formam os chamados *Basic Problem Types*. Estes, por sua vez, juntamente com o parâmetro variedade de objetos grandes formam os chamados *Intermediate Problem Types*. Finalmente, juntando a dimensionalidade com a forma dos itens pequenos obtêm os tipos de problemas *Refined Problem Types*. Em todos estes parâmetros existem suposições acerca dos resultados possíveis. Caso algum problema utilize dados fora de comum, os autores consideram variações do problema visto não haver definição existente acerca dos mesmos. Isto torna o esquema mais global e aceitável pela comunidade científica. De seguida é apresentado o critério modificado, de acordo com a nova tipologia, para a definição dos tipos de problemas C&P.

Dimensionalidade: Distinguem-se como problemas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Dimensões acima ($n > 3$) são consideradas como variantes desta tipologia.

Tipo de atribuição: Tal como na tipologia de (Dyckhoff H. , 1990), o tipo de atribuição poderá ser a maximização das saídas (B) ou minimização das entradas (V). No caso de maximização de saídas, um conjunto de itens pequenos tem de ser alocado num dado conjunto de objetos grandes. Este conjunto de objetos grandes não é suficiente para alojar todos os itens pequenos e o objetivo deverá ser portanto tentar acomodar o máximo de itens pequenos. No caso de minimização de entradas, todos os itens pequenos deverão ser alocados nos objetos grandes, sendo a solução ótima aquela que utilize o menor número de objetos grandes.

Variedade de itens pequenos: Em relação à variedade de itens pequenos, conforme esquematizado na figura 8, foram considerados três casos: itens idênticos, variedade fracamente heterogénea e variedade fortemente heterogénea.

- ✓ **Itens idênticos** - todos os itens são do mesmo tamanho e forma. No caso de maximização da saída, pode-se considerar a procura dos itens infinita.
- ✓ **Variedade fracamente heterogénea** – os itens pequenos podem ser agrupadas por poucas classes diferentes (em relação ao número total de itens). Normalmente a procura deste tipo de itens é relativamente grande e pode, ou não, ser limitada por um limite superior de procura.
- ✓ **Variedade fortemente heterogénea** - o grupo de itens pequenos é constituído por muitas classes de itens normalmente de procura baixa. Neste caso os itens são muitas vezes considerados como individuais com procura igual a um.

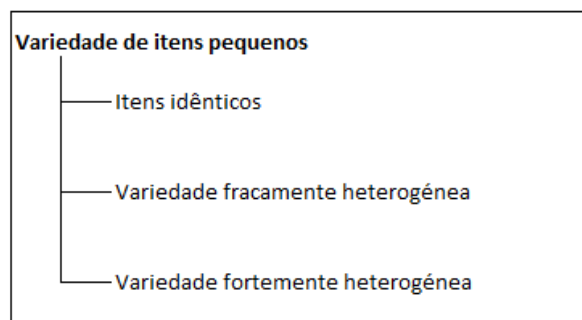


Figura 8 – Casos distinguidos no que respeita à variedade de pequenos itens (adaptado de (G. Wäscher, 2007))

Variedade dos objetos grandes: No que diz respeito à variedade de objetos, conforme esquematizado na figura 9, são distinguidos dois casos: Um objeto ou vários objetos.

- ✓ **Um objeto grande** - O conjunto de objetos é constituído por um único elemento. Este poderá ter as suas dimensões fixas ou poderá ter uma ou mais dimensões variáveis.
- ✓ **Vários objetos grandes** - Em relação a problemas estudados na literatura, não pareceu necessário aos autores distinguir entre dimensões fixas e dimensões variáveis. Apenas dimensões fixas foram consideradas. Em analogia com as categorias que foram introduzidas para a variedade dos itens pequenos, fazem a distinção entre grandes objetos idênticos, uma fraca e uma forte variedade heterogênea de objetos grandes. Desta forma obtemos uma extensão à tipologia de (Dyckhoff H. , 1990), que apenas considerava objetos grandes como idênticos (Tipo I) ou de formas diferentes (tipo D).

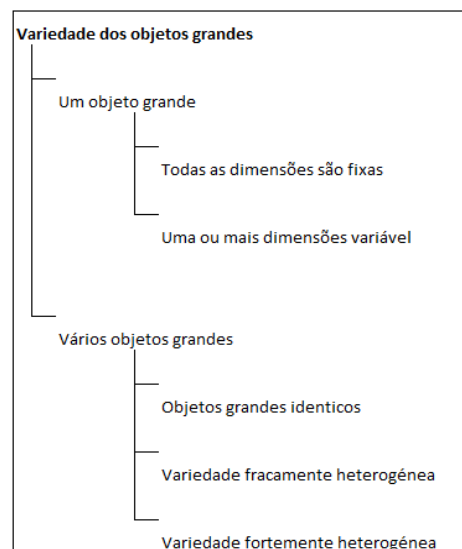


Figura 9 - Casos distinguidos no que respeita à variedade de objetos de grandes dimensões (adaptado de (G. Wäscher, 2007))

Forma dos itens pequenos: Segundo (G. Wäscher, 2007), no caso de problemas com duas e três dimensões, para a definição de problemas *Refined Problem Type*, existe a distinção entre itens pequenos regulares (com formas retangulares, circulares, cilíndricas, esféricas, etc.) e irregulares. De acordo com o que é normalmente considerado na literatura, assume-se que os itens pequenos sendo retangulares são dispostos ortogonalmente. Problemas que permitem disposição não ortogonal ou

misturas entre objetos regulares e não regulares são considerados novamente como variantes de problema.

3.2.1 TIPOS DE PROBLEMAS BÁSICOS C & P

As seis categorias básicas de problemas de C&P estão representadas na figura 10. É possível verificar a influência de cada critério na definição da tipologia bem como o relacionamento existentes entre as várias categorias.

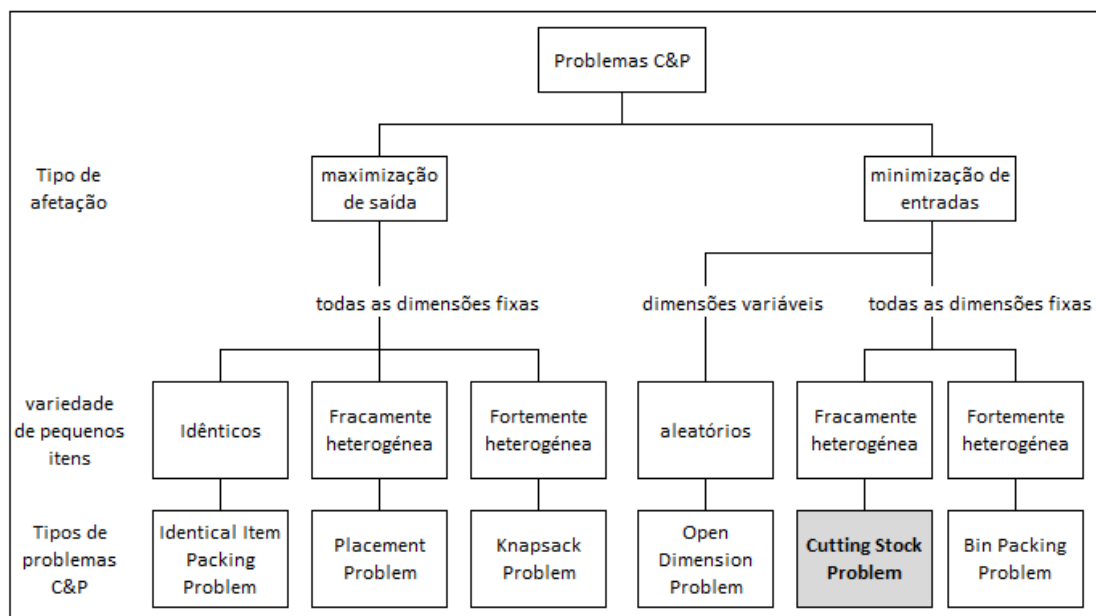


Figura 10 - Tipos de problemas básicos C&P (adaptado de (G. Wäscher, 2007))

Para cada categoria de problemas são também definidas, na nova tipologia, subcategorias com base nas características da variedade dos objetos grandes, nomeadamente se todos os objetos grandes são idênticos ou não e na quantidade de objetos grandes disponível. Um quadro com os tipos de problemas intermediários, maximização de saída e minimização de saída é apresentado nas figuras 11 e 12 respetivamente. De seguida, é abordado as categorias básicas para os seis tipos de problemas C&P e as respetivas subcategorias.

Identical Item Packing Problem: Os itens são todos idênticos e existe uma quantidade limitada de objetos grandes. Pretende-se maximizar o número de itens empacotados. Nesta categoria os problemas reduzem-se à determinação do melhor padrão de corte para cada um dos objetos grandes, i.e. o padrão que maximiza o número de itens cortados, não existindo os habituais problemas de seleção de itens ou objetos grandes, nem o problema de afetação de itens a objetos grandes. Não é necessário subdividir esta categoria de problemas em função da variedade de objetos grandes, dado que um problema com vários objetos grandes é decomposto em vários problemas independentes (um problema para cada um dos objetos grandes).

Placement Problem: A categoria problemas de afetação caracteriza-se pela existência de uma variedade de itens fracamente heterogénea e por um conjunto limitado de objetos grandes. Pretende-se maximizar o valor dos itens colocados ou minimizar o desperdício (espaço dos objetos grandes não ocupado pelos itens). Nesta categoria de problemas, dado o conjunto de objetos grandes ser limitado, ao contrário da categoria anterior, existe um problema de seleção: que itens posicionar? Considerando o critério da variedade dos objetos grandes, esta categoria subdivide-se nas seguintes:

- ✓ *Single Large Object Placement Problem*: Caracteriza-se pela existência de apenas um único objeto grande.
- ✓ *Multiple Identical Large Object Placement*: Existem vários objetos grandes, todos com as mesmas dimensões.
- ✓ *Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem*: Caracteriza-se também pela existência de vários objetos grandes, mas ao contrário da anterior, nem todos possuem as mesmas dimensões.

Knapsack Problem: É caracterizada por uma variedade de itens fortemente heterogénea e por um conjunto limitado de objetos grandes. Pretende-se maximizar o valor dos itens atribuídos aos objetos grandes. Tal como na categoria anterior, existe o

problema de seleção de itens, já que a quantidade de objetos grandes é limitada. O critério da variedade dos objetos grandes permite subdividir esta categoria nas seguintes:

- ✓ *Single Knapsack Problem*: Apenas existe uma mochila disponível.
- ✓ *Multiple Identical Knapsack Problem*: Existe várias mochilas iguais.
- ✓ *Multiple Heterogeneous Knapsack Problem*: extensão da subcategoria anterior a situações onde existem várias mochilas com características diferentes.

variedade de pequenos itens		características dos objetos grandes		
		Idênticos	Fracamente heterogénea	Fortemente heterogénea
todas as dimensões fixas	Um objeto grande	Identical Item Packing Problem IIPP	Single Large Object Placement Problem SLOPP	Single Knapsack Problem SKP
	Idênticos	X	Multiple Identical Large Object Placement MILOPP	Multiple Identical Knapsack Problem MIKP
	Heterogéneos		Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem MHLOPP	Multiple Heterogeneous Knapsack Problem MHKP

Figura 11 - Quadro com os tipos de problemas intermediários: maximização de saída (adaptado de (G. Wäscher, 2007))

Open Dimension Problem: A principal característica é a existência de uma ou mais dimensões variáveis. Habitualmente só é tratado o caso em que se considera apenas um único objeto grande. Problemas de dimensões variáveis só são possíveis com duas ou mais dimensões (com uma dimensão é considerado como uma variável). O objetivo nestes problemas é a colocação do conjunto de itens no interior do objeto grande, minimizando a(s) dimensão(ões) variável(eis), ou seja minimizando o comprimento, a área ou o volume do objeto grande utilizado. Nestes problemas o tipo de objetivo utilizado na afetação é o de minimização dos recursos utilizados, já que se considera

que a(s) dimensão(ões) variável(eis) do objeto grande pode(m) crescer o suficiente para conter todos os itens.

Cutting Stock Problem: Os problemas desta categoria caracterizam-se por apresentarem uma variedade de itens fracamente heterogénea e pela existência de um conjunto de objetos grandes no qual é possível posicionar todos os objetos pequenos. Pretende-se minimizar o número de objetos grandes utilizados ou, alternativamente, o valor (comprimento, área, volume ou qualquer outra função) total dos objetos grandes utilizados. Nesta categoria existe o problema de seleção dos objetos grandes a utilizar. As dimensões dos objetos grandes são todas fixas e, considerando-se a heterogeneidade destes objetos, esta categoria divide-se nas três seguintes subcategorias:

- ✓ *Single Stock Size Cutting Stock Problem*: Todos os objetos grandes têm a mesma dimensão.
- ✓ *Multiple Stock Size Cutting Stock Problem*: Caracteriza-se pela existência de uma variedade fracamente heterogénea de objetos grandes.
- ✓ *Residual Cutting Stock Problem*: Caracteriza-se por uma variedade de objetos grandes fortemente heterogénea. O nome de problema de *Residual Cutting Stock* vem de casos práticos de problemas desta subcategoria, onde partes não utilizadas de objetos grandes em operações de corte anteriores dão origem a novos objetos grandes que podem ser utilizados em futuras operações de corte.

Bin Packing Problem: Esta categoria de problemas tem como principais características a forte heterogeneidade da variedade de itens e a existência de objetos grandes em quantidades suficientes para que todos os itens possam ser empacotados no seu interior. Semelhante à categoria anterior, esta categoria pretende minimizar os recursos utilizados: o número de objetos grandes ou uma qualquer função de valor

desses objetos. Nesta categoria também existe o problema de seleção dos objetos grandes. Os objetos grandes têm todas as dimensões fixas e, considerando a heterogeneidade desta variedade, esta categoria subdivide-se nas seguintes subcategorias:

- ✓ *Single Bin Size Bin Packing Problem*: Caracteriza-se pela existência de uma variedade de objetos grandes apenas com uma dimensão em quantidade ilimitada.
- ✓ *Multiple Bin Size Bin Packing Problem*: A variedade de objetos grandes é fracamente heterogénea e cada tipo de objeto grande existe em quantidade ilimitada e apresenta uma determinada capacidade e um valor específico.
- ✓ *Residual Bin Packing Problem*: Caracteriza-se por uma variedade fortemente heterogénea de objetos grandes.

variedade de pequenos itens		características dos objetos grandes	
		fracamente heterogénea	fortemente heterogénea
todas as dimensões fixas	Idênticos	Single Stock Size Cutting Stock Problem SSSCSP	Single Bin Size Bin Packing Problem SBSBPP
	fracamente heterogénea	Multiple Stock Size Cutting Stock Problem MSSCSP	Multiple Bin Size Bin Packing Problem MBSBPP
	fortemente heterogénea	Residual Cutting Stock Problem MSSCSP	Residual Bin Packing Problem RBPP
um objeto grande de dimensões variáveis		Open Dimension Problem ODP	

Figura 12 - Quadro com os tipos de problemas intermediários: minimização de entrada (adaptado de (G. Wäscher, 2007))

3.2.2 ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

As bobines de aço são os objetos grandes que possuem uma largura específica e um comprimento indeterminado. Com uma procura conhecida, os itens pequenos são peças retangulares, conhecidos por arcos. O que se pretende é que todos os itens sejam cortados a partir dos objetos de modo a que o desperdício seja mínimo.

Segundo o critério tipo de atribuição, o problema enquadra-se em minimização de entradas, uma vez que se pretende que seja alocado todas as necessidades planeadas dos arcos em bobines, sendo uma solução ótima aquela que utilize a menor quantidade de bobines para satisfazer a procura de itens. No que diz respeito à variedade de itens pequenos, ou arcos, estes possuem larguras diferentes e com uma variedade fracamente heterogénea. Na combinação destes dois critérios, o problema é caracterizado como *Cutting Stock Problem (CSP)*.

Aplicando o critério variedade dos objetos grandes, em que são considerados vários objetos grandes, o problema é classificado como *Multiple Stock Size Cutting Stock Problem (MSSCSP)*. Então, de acordo com a tipologia proposta em (G. Wäscher, 2007), o problema em estudo é classificado como *one-dimensional Multiple Stock Size Cutting Stock Problem (1D-MSSCSP)*.

- ✓ Minimização de entradas

- ✓ Itens com uma variedade fracamente heterogénea

- ✓ Vários objetos grandes

- ✓ Unidimensionais

Neste problema é então necessário efetuar o corte de um conjunto de itens retangulares, cada um com uma procura conhecida, dispostos ortogonalmente num conjunto de objetos grandes.

3.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira formulação conhecida de CSP foi proposta por (Kantorovich L. V., 1960), com a primeira versão publicada em russo em 1939. Neste trabalho são propostos modelos matemáticos de programação linear para a organização e o planeamento da produção, onde é referenciado o problema de corte unidimensional. Neste período inicial, merecem também destaque os seguintes trabalhos sobre problemas de *Cutting Stock* unidimensionais (conhecidos também como *Trim Loss*): o trabalho de (Walter, 1954) sobre a impressão de jornais, os trabalhos de (Eisemann, 1957) e de (Metzger, 1958) sobre o problema genérico de minimização do desperdício e o trabalho de (Eilon, 1960) sobre o corte de barras de aço. Apesar da evidente aplicação prática de todos estes trabalhos pioneiros, apenas instâncias de pequena dimensão podiam ser resolvidas com sucesso. As razões para estas dificuldades residiam nas técnicas de resolução utilizadas na resolução dos modelos do problema de *Cutting Stock*, que não conseguiam lidar com o grande número de colunas da matriz das restrições. Note-se que existe uma coluna para cada padrão de corte diferente e claramente o número de padrões de corte cresce exponencialmente com o número de objetos diferentes. Por estes motivos, não surpreende a dificuldade em obter soluções exatas para problemas de *Cutting Stock* de dimensão elevada.

As dificuldades na resolução de problemas de *Cutting Stock* de média e grande dimensão só foram ultrapassadas graças aos trabalhos de (Gilmore P. C., 1961) e (Gilmore P. , 1963). Nestas publicações, os autores adaptam a técnica da geração atrasada de colunas, baseada na decomposição de Dantzig-Wolfe, ao problema de *Cutting Stock* unidimensional. Estes trabalhos não só alargaram novos horizontes a novos estudos, como se tornam a base de resolução de muitos problemas da atualidade. Posteriormente, os mesmos autores estendem a mesma técnica a problemas de duas e três dimensões, aplicando-a na resolução de problemas de *Cutting Stock* de corte de retângulos e de paralelepípedos (caixas) (Gilmore P. ,, 1965). Na resolução de problemas de *Cutting Stock* a duas e três dimensões por este método, os padrões de corte estão restritos apenas àqueles que se conseguem obter por cortes do tipo guilhotina.

(Dyckhoff H. , 1981) apresenta uma nova formulação para o problema de *Cutting Stock*, que se baseia na utilização de variáveis de decisão que correspondem a uma única operação de corte sobre um único objeto (*onecut model*). (Stadtler, 1988) introduz uma extensão a esta formulação que permite separar as restrições em dois tipos: uma com uma estrutura em rede pura e a outra composta por restrições de limites superiores generalizados. (Carvalho J. M., 2002) apresenta uma revisão em algumas formulações de programação linear para problemas de corte unidimensionais e para os problemas de *bin packing*, nomeadamente os modelos de Kantorovich, Gilmore e Gomory, *one cut models* da abordagem de Dyckhoff e Stadtler, modelos indexados à posição e um modelo derivado da literatura de roteamento de veículos. Apresenta uma outra formulação para o problema de *Cutting Stock* baseada na determinação do fluxo em arcos (*arc flow model*).

Os métodos de otimização exata visam identificar uma solução ótima. Estabelecem-se processos de investigar todas as soluções admissíveis ou de garantir que não há necessidade de investigar mais, pois as soluções não analisadas não originarão soluções melhores que as já encontradas. No entanto, dada a complexidade deste tipo de problemas, há instâncias que, pela sua dimensão, ocuparão demasiado tempo computacional para poderem ser resolvidas. Assim, os métodos exatos são, regra geral, apenas aplicados a instâncias de pequena ou média dimensão. O problema de *Cutting Stock*, nas suas diferentes variantes, é intrinsecamente um problema inteiro, i.e. pretende-se minimizar o número de objetos grandes utilizados. Por outro lado, são conhecidas as dificuldades que a resolução de problemas inteiros apresenta, em particular para instâncias de média e de grande dimensão. Devido a estas dificuldades, a grande maioria das abordagens a estes problemas começam por resolver a relaxação contínua do problema inteiro. Posteriormente, a solução fracionária obtida é “arredondada” através de regras heurísticas, mais ou menos elaboradas, como por exemplo pela resolução de problemas residuais. Os métodos heurísticos exploram o espaço de soluções do problema, produzindo assim soluções admissíveis de boa qualidade em tempos computacionais reduzidos. No entanto, podem não garantir que a solução encontrada seja ótima. (Johnston, 1986) apresentou um algoritmo para arredondamento de soluções fracionárias, que simultaneamente limita o número de padrões diferentes e elimina padrões pouco utilizados. (Gau, 1996)

apresentam um estudo sistemático de várias heurísticas propostas na literatura para problemas de *Cutting Stock* unidimensionais. Os autores utilizaram quatro mil instâncias (geradas aleatoriamente por intermédio de um gerador automático de instâncias) e reportam que duas das heurísticas se superiorizam às restantes, conseguindo resolver a totalidade das quatro mil instâncias com diferenças inferiores a uma unidade para o valor da função objetivo da solução ótima. Em (Carvalho J. M., 1998) é apresentada uma abordagem exata ao problema de *Cutting Stock* unidimensional baseada em geração de colunas e numa pesquisa *branch-and-bound*, apresentando soluções para instâncias de problemas com o máximo de trinta encomendas. Nos trabalhos anteriores, os objetos grandes têm todos o mesmo tamanho, situação que facilita a tarefa de tornar inteira as soluções fracionárias. O problema de *Cutting Stock* unidimensional com objetos grandes de dimensões diferentes é abordado por (Scheithauer, 2002), num trabalho que combina planos de corte com geração de colunas.

(Ozdemir, 2009) propõem uma abordagem em duas fases para a geração de padrões e determinação do plano de corte para 1D-CSP. Numa primeira fase é realizado o cálculo do número total de padrões que vai ser cortado e é gerado os padrões de corte. A segunda fase determina o plano de corte. A abordagem proposta utiliza dois modelos de programação linear inteira separados.

Por causa da natureza de problemas NP-Difícil de *Cutting Stock*, conforme já referido, encontrar uma solução ótima em tempo razoável é extremamente difícil e muitas vezes os pesquisadores viram-se para algoritmos heurísticos para tratar estes tipos de problemas muito complexos como também é o caso de (M. HMA Jahromi, 2012). Para resolver estes tipos de problemas, as meta-heurísticas *simulated annealing* (SA) e *tabu search* (TS) foram propostas e desenvolvidas. Para comparar a eficiência desses algoritmos, foram realizados testes, e os resultados associados em termos da função objetivo (i.e., *trim loss*) e tempo de computacional foram comparados. Os resultados apresentam uma melhor eficiência por parte da heurística *simulated annealing* em encontrar um plano de corte com menor perda, comparativamente a *tabu search*. Em termos de tempo computacional, os resultados da *tabu search* superam a meta-heurística *simulated annealing*.

Os problemas de corte na prática geralmente têm a sua própria especificidade que não permitem a aplicação direta dos modelos conhecidos e seus algoritmos. (M. M. Malik, 2013) referem que as dificuldades na solução de problemas de corte levam ao uso de métodos aproximados. Em muitos casos práticos, são necessárias modificações apropriadas ou até mesmo novos métodos têm de ser completamente desenvolvidos de modo a lidar com as exigências do mundo real.

(Gradisar, 2007) propõem uma abordagem ao CSP onde a “boa” solução está a ser procurada em consecutivos períodos de tempo. É ajustado a situações onde o *stock* remanescente, útil, pode regressar ao armazém para que possa ser utilizado mais tarde noutras ordens. (S. Koch, 2008) descrevem um problema semelhante para a indústria da madeira. (C. Cherri, 2009) também procuraram soluções de 1D-CSP em que o material não usado nos padrões de corte poderia ser utilizado posteriormente, se fosse suficientemente grande. Soluções com esta particularidade são muito difíceis de comparar, i.e., até que ponto uma solução com desperdício mínimo é o mais interessante quando esta pode ser utilizada mais tarde? Algumas características desejáveis de boas soluções são apresentadas e métodos heurísticos clássicos são modificados, de modo que padrões de corte com perdas indesejáveis (não grande o suficiente para ser usado, nem muito pequeno de ser considerado como perda aceitável) são redefinidos.

O tempo de preparação de uma máquina é também um fator relevante no processo de corte. (HAESSLER, 1975) terá sido o primeiro a tratar o problema de corte unidimensional considerando a minimização do número de objetos processados e o tempo de preparação de máquina (*setup*). (Gramani, 2006) estudaram o problema integrado do dimensionamento de lotes e corte de stock em processos industriais. O objetivo é minimizar a perda e o tempo de *setup*. Os autores consideram apenas um tipo de objeto disponível em *stock* para ser cortado, em quantidade ilimitada e consideram a limitação na capacidade da máquina de corte. O problema é resolvido heurísticamente, aproximado por um problema de caminho mínimo, inspirado no método de (Wagner & Whitin, 1958).

(Farley, 1988) terá sido talvez o primeiro autor a publicar um estudo sobre o problema de corte de *stock* em indústrias de roupa, associado ao problema de planeamento e programação da produção. Apesar de o problema ser essencialmente

um problema de corte bidimensional irregular, esta dificuldade foi contornada por definir vários padrões de corte em retângulos da largura do rolo de tecido, de diferentes comprimentos, nos quais foram usados para cortar os itens ao longo do comprimento do rolo (problema de corte unidimensional). O autor evitou trabalhar com o problema de corte ligado ao processo produtivo e o problema foi formulado como um problema de programação de produção num único período.

(Hendry & Fok, 1996) estudaram o problema de corte no planeamento de produção em indústrias de cobre. O processo de fundição básico do cobre consiste em derreter pedaços de cobre num forno, produzindo barras com diâmetros específicos, que são cortadas em itens menores de diâmetros e quantidades específicas. Os autores apresentam métodos de solução em duas fases, baseadas na separação dos problemas. Na primeira fase, supõem que é conhecido o número máximo de barras de qualquer diâmetro que pode ser produzido por período, tendo em conta a capacidade do forno, resolvendo num problema de corte unidimensional. É assim conhecido o número de barras de cada diâmetro que deve ser produzido em cada período. Na segunda fase, é feito um planeamento da produção para cada período.

(Respício & Captivo, 2002) abordam o problema de corte integrado com o planeamento da produção numa indústria de papel. A empresa produz diferentes tipos de papel, agrupados em famílias. As bobines mestre de diferentes famílias são produzidas para depois serem cortadas em bobines menores. Como a capacidade produtiva instalada é menor que a procura média, a empresa tinha problemas com atrasos na entrega dos seus produtos. O objetivo é encontrar um plano de produção que determine as quantidades que devem ser produzidas para cada família de modo a evitar longos atrasos de expedição. As autoras propõem um modelo de programação inteira, incorporando o problema de corte de *stock* unidimensional ao problema do planeamento. O modelo proposto é uma extensão da formulação de Gilmore & Gomory e considera a procura acumulada, restrições para a conservação do *stock* e restrições de capacidade.

Também (Poltroniere, Poldi, & Toledo, 2008) propõem um estudo com aplicações práticas na indústria do papel. As bobines são fabricadas na indústria com várias larguras que, posteriormente, são cortadas em bobines intermédias. Uma parte das bobines intermédias é embalada para atender uma procura específica e o restante

é cortado, produzindo diferentes tipos de itens finais, tais como modelos de carta, resmas, A4, etc. Pode haver *stock* de bobines intermédias. A disponibilidade de bobines iniciais no problema de corte é considerada como variável de decisão. Portanto, as decisões de planeamento consistem em escolher quais as bobines iniciais (definidas pelo seu comprimento e gramagem) e em que quantidades devem ser produzidas em cada período, de forma a atender a carteira de pedidos, evitar atrasos e *stock*, minimizando a perda de material durante o processo de corte. Para isso, (Poltroniere, Poldi, & Toledo, 2008) formulam um modelo de otimização inteira mista e desenvolvem métodos heurísticos de solução.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Admitindo que temos disponíveis objetos (bobines de aço) com um determinado comprimento LO_j ($j=1,2,3,\dots,m$), em quantidade suficiente para satisfazer toda a procura de itens (arcos). Temos também, um conjunto de itens de um determinado comprimento LI_i ($i=1,2,3,\dots,n$), que devem ser cortados para atender à procura. O problema do corte de *stock* consiste em produzir os itens com a procura definida, através do corte dos objetos disponíveis em *stock*, de modo a que a procura seja satisfeita e uma determinada função objetivo seja otimizada, isto é, a minimização do desperdício, a minimização do número de padrões de corte e a minimização do corte de itens para *stock*.

Para a formulação matemática do modelo do problema de corte, a seguinte notação é introduzida:

- LO_j : largura do objeto j ;
- LI_i : largura do item i ;
- $dmin_i$: número mínimo de itens com largura LI_i ;
- $dmax_i$: número máximo de itens com largura LI_i ;
- P_i : penalização atribuída ao item i ;
- F : número máximo de itens por padrão de corte

Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão apresentadas correspondem às grandezas que podem ser controladas pelo decisor e tentam ser definidas de tal maneira que permitam traduzir de forma adequada o critério de decisão e as condições ou restrições impostas por esta situação real. Ou seja, as variáveis de decisão correspondem às variáveis controláveis do problema, que poderão ser manipuladas por forma a garantir que o valor ótimo da função objetivo seja atingido.

- Y_j : é a variável binária que define se o objeto j com largura L_j será utilizado ou não:

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

- X_{ij} : é a variável de decisão que define o número de cortes com largura L_i , no objeto j

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

Restrições

Por vezes não basta definir apenas as variáveis de decisão, é também necessário esclarecer e aprofundar a sua natureza através da construção de restrições. As restrições, tal como o próprio nome indica, traduz, as características da situação real que se pretende modelizar.

- ✓ Restrição da procura

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \geq dmin_i \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \leq dmax_i \quad (4)$$

As equações (3) e (4) correspondem às restrições do número mínimo e máximo, respetivamente, de um determinado item que se pretende incluir no padrão de corte.

✓ Restrição do equipamento

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq F, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

A equação (5) diz respeito à capacidade da máquina. Um número máximo de itens por padrão de corte deve ser considerado. Quando o padrão de corte é constituído por um grande número de itens com larguras menores, uma maior quantidade de itens pode ser conciliada de modo a otimizar o corte, mas até um limite máximo por motivo da disponibilidade de ferramenta. Um outro fator está relacionado com a capacidade da máquina, isto é, a força que a mesma necessita no corte de objetos com maior espessura, é superior à força exercida no corte de objetos com menor espessura. Este equilíbrio pode ser compensado com a redução do número de itens em cada padrão de corte.

✓ Restrição de largura máxima da bobine

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq LO_j \cdot Y_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

A equação (6) representa a restrição da largura máxima da bobine

Função Objetivo

A função objetivo não é mais do que o critério de decisão propriamente dito. Neste trabalho são considerados três objetivos distintos e a função objetivo consiste em otimizar simultaneamente esses objetivos. Esses objetivos são tais que nenhum deles pode ser melhorado sem a degradação de, pelo menos, outro. Esta situação é fruto da conflitualidade que normalmente existe neste tipo de problemas. Assim, em

vez de uma única solução ótima obtém-se um conjunto de soluções compromisso entre os diferentes objetivos do problema. Matematicamente, cada objetivo do problema é formalizado como:

- ✓ Objetivo da minimização do número de padrões de corte:

$$y = \sum_{j=1}^m Y_j \quad (7)$$

- ✓ Objetivo da minimização do desperdício (apara):

$$A = \sum_{j=1}^m \left((LO_j \cdot Y_j) - \sum_{i=1}^n (LI_i \cdot X_{ij}) \right) \quad (8)$$

- ✓ Objetivo da minimização do corte de itens para inventário:

$$S = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_{ij} \quad (9)$$

O somatório dos objetivos formalizados em (7), (8) e (9) correspondem ao objetivos propostos neste trabalho. Aplicando um critério de ponderação aos objetivos, i.e., o peso que cada um representa na decisão final, o modelo de apoio à decisão do problema de corte deste trabalho pode ser visto como:

$$\text{Min } Z = W_1 \cdot y + W_2 \cdot A + W_3 \cdot S \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^3 W_k = 1$$

(11)

Sendo que o objetivo é minimizar o valor de Z.

O modelo de programação linear inteira para o problema apresentado é o seguinte:

$$\text{Min } Z = W_1 \cdot y + W_2 \cdot A + W_3 \cdot S$$

$$\sum_{k=1}^3 W_k = 1$$

$$y = \sum_{j=1}^m Y_j$$

$$A = \sum_{j=1}^m \left((LO_j \cdot Y_j) - \sum_{i=1}^n (LI_i \cdot X_{ij}) \right)$$

$$S = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \geq dmin_i$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \leq dmax_i$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq F, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq LO_j \cdot Y_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

Y_j Binário, $X_{ij} \geq 0$ e inteiro, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, m$

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA A CADA ITEM

5.2 FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

5.2.1 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE

5.2.2 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO DESPERDÍCIO

5.2.3 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO CORTE DE ITENS PARA STOCK

5.3 PONDERAÇÃO DOS OBJETIVOS

5.4 TESTES COMPUTACIONAIS COM EXEMPLOS REAIS

5.5 IMPACTO ANUAL

5 IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, numa primeira fase, será abordado as opções tomadas para a definição do modelo. Tentou-se aproximar o mais possível á realidade do corte de bobines de aço na empresa Ferpinta S.A., sendo esse um foco do trabalho. Inicia-se com uma análise de sensibilidade à importância atribuída a cada item, i.e., a penalização para cada item. Para tal é utilizado dados aleatórios gerados na plataforma Excel e é simulado os parâmetros de forma distinta. Uma justificação da necessidade do modelo utilizar uma função multiobjectivo é feita. Apesar de todos os objetivos apresentados no modelo retratarem a realidade do dia-a-dia, a importância que cada um representa não deve ser a mesma. Um estudo do mesmo é realizado. Definidas as opções, é testado o modelo com exemplos reais levantados na empresa. Por último é feita uma abordagem ao impacto anual com a utilização do modelo de apoio à decisão.

5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA A CADA ITEM

Existindo incerteza em relação a um parâmetro definido, será necessário efetuar sua respetiva análise de sensibilidade através de resoluções sucessivas do modelo considerando valores diferentes do parâmetro incerto. Se a análise de sensibilidade revelar que a solução não é sensível a variações do valor do parâmetro incerto, então é provável que a solução obtida seja a mais apropriada. Pelo contrário, se a solução for sensível a variações do valor do parâmetro incerto, pode não ser fácil identificar uma solução fiável. Naturalmente, a análise de sensibilidade torna-se mais complicada se os problemas forem de elevada dimensão e se se estiver na presença de vários parâmetros incertos. Segundo (Hill & Santos, 2015) “A análise de sensibilidade de um problema de programação linear passa pelo cálculo de um intervalo de valores dentro do qual um determinado parâmetro (definido originalmente) poderá variar, sem que

essa variação provoque uma alteração da base ótima. A esse intervalo dá-se o nome de intervalo de sensibilidade.” A análise de sensibilidade pretende assim determinar os limites de variação dos dados originais do problema. Esta questão é relevante pois, uma vez alterada a situação inicial, torna-se importante saber se esta nova situação veio originar uma nova solução ótima, e quão “drásticas” foram as alterações verificadas.

Na construção do padrão de corte, um dos objetivos é minimizar o corte de arco para *stock*, ou seja, diminuir o corte de itens que apesar de terem histórico de consumo, não tem utilização prevista a curto prazo (sem encomendas firmes). Para tal, na estrutura do modelo foi considerado três níveis de importância:

- ✓ Nível I – Itens que devem ser incluídos no padrão de corte. Numa perspetiva de gestão de armazém e minimização de inventário, só deveria ser utilizado itens com esta classificação.
- ✓ Nível II – Itens que podem ser incluídos no padrão de corte. Não têm necessidade de corte imediato mas tem um consumo próximo definido (planeado).
- ✓ Nível III – Itens que não necessitam de serem incluídos no padrão de corte. Só devem ser considerados, se forem necessários para otimizar o padrão de corte. Trata-se de itens com previsão de consumo, mas que não se sabe quando vai ser utilizado.

O Padrão de corte não tem de ser necessariamente construído com itens dos três níveis. Poderá ser construído apenas com itens do nível I, ou com o nível I e II ou nível I e III. A cada nível deve ser atribuído um valor (penalização) para que o modelo encontre a solução ótima. Para o Nível I, o valor atribuído deve ser o mais baixo possível pois pretende-se que seja sempre incluído no padrão de corte. Como tal, foi considerado uma penalização com valor 1. Apenas é atribuído uma penalização aos itens do nível I porque o modelo pode definir uma quantidade de itens superior à restrição da procura mínima. Para os níveis II e III, inicialmente foi atribuído uma penalização com valor 2 e 3 respetivamente, de modo a diferenciar de forma

proporcional a importância de cada nível. Nesta análise de sensibilidade, considerou-se P_i a penalização atribuída ao item i como sendo:

$$(P_i)^n \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6$$

O máximo de n , é o valor a partir do qual a solução final mantém-se inalterada. De seguida é realizado uma análise ao modelo para definir qual o valor ótimo de n . Para tal, foram utilizados dados fictícios, estando estes totalmente enquadrados com o tipo de problemas reais. Foram extraídos a partir de um gerador de dados aleatórios do Excel e simulou-se o conjunto de valores atribuídos ao valor de n (ver capítulo 8). Verificou-se que sempre que o valor de n era alterado, novos padrões de corte eram calculados. Uma vez ocorridas alterações, observou-se quais os valores que determinavam a solução ótima, no que diz respeito aos objetivos de produção. O conjunto de dados formado, que são utilizados em cada uma das fases com 10 instâncias, utilizou os seguintes parâmetros:

- LI_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).

Um número máximo de 5 padrões de corte para cada instância cobre por excesso a realidade na empresa. Sendo que o resultado típico é de um/dois padrões de corte, foi decidido, até por questões de tempo de resposta do modelo, limitar o número de padrões de corte a um número máximo de 5. Ao nível das penalizações, foi considerado para cada instância:

- Nível I para os 4 primeiros itens gerados;
- Nível II para os itens 5 a 8 gerados;
- Nível III para os dois últimos itens gerados.

Também aqui tentou-se uma vez mais a aproximação dos dados à realidade da empresa. O mesmo raciocínio foi utilizado na definição das restrições apresentadas:

- $F = 18$;
- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$.

A decisão final, quanto ao valor atribuído a cada de item, não pode estar apenas focalizada no objetivo redução do corte de arco para *stock*, mas também na redução do número de *setups* e a diminuição do desperdício de corte. O modelo deve encontrar um equilíbrio que satisfaça minimamente todos os objetivos. Com base na penalização definida com valores 1, 2 e 3 para os níveis I, II e III respetivamente, é atribuído valores a n e os resultados obtidos podem ser consultados na tabela 3.

Todos os resultados foram obtidos com um tempo de resposta inferior a 5 segundos. Pode-se concluir que a alteração aos valores atribuídos a cada item tem pouca ou nenhuma influência quanto ao número de padrões de corte gerado, com apenas uma alteração a registar. Existe um aumento de um padrão de corte na transição de $n=2$ para $n=3$. A quantidade não otimizada (mm) cresce juntamente com o valor de n , sendo que a partir de $n=4$, é encaminhado para soluções impraticáveis.

Foram analisados dados até um valor de $n=6$. A análise para $n > 6$ conduzia a resultados piores em termos de quantidade não otimizada (em mm) e resultados iguais a $n=6$ em termos do número de itens para inventário, i.e., nenhum item do nível II e III seria considerado. Apenas para $n=1$ o modelo determina padrões de corte com itens do nível III e para $n > 5$ nenhum item do nível II e III é considerado.

Um total de 142 padrões de corte foram calculados e numa perspetiva global dos resultados, considerou-se que $n=2$ é o que melhor traduz os objetivos do corte. Em termos do número de padrões de corte, $n=2$ apresenta o melhor resultado juntamente com $n=1$ com um resultado de 23 padrões de corte. Referente à quantidade não otimizada, para $n=2$, apenas 6 mm de desperdício é considerado como sendo muito

satisfatório. Melhor, só superado por $n=1$ que apresenta um resultado de 2 mm de desperdício mas, em termos da quantidade de itens para inventário, $n= 2$ exibe melhores resultados, com nenhum item incluído do nível III e com menos dois itens do nível II.

Tabela 3 - resultados obtidos por alteração do valor de n na análise de sensibilidade à importância atribuída a cada item

n=1					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	1	2
2	26	5	0	2	0
3	72	5	0	2	1
4	10	1	0	1	1
5	5	1	0	2	0
6	12	1	0	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	1
9	40	5	1	0	1
10	8	1	0	1	0
Soma:	23		2	11	6

n=2					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	4	0
2	26	5	0	2	0
3	72	5	2	1	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	1	0	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:	23		6	9	0

n=3					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	0	5	0
2	26	5	4	4	0
3	72	5	7	0	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	2	0	0	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:	24		14	9	0

n=4					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	4	0
2	26	5	9	1	0
3	72	5	7	0	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	2	0	0	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:	24		20	5	0

n=5					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	18	3	0
2	26	5	25	0	0
3	72	5	7	0	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	2	0	0	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:	24		53	3	0

n=6					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	114	0	0
2	26	5	25	0	0
3	72	5	7	0	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	2	0	0	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:	24		149	0	0

Comparando $n=2$ com $n=3$, podemos concluir que $n=3$ apresenta resultados iguais em termos da minimização de itens para inventário mas piores resultados nos restantes objetivos i.e., otimização dos objetos e minimização do número de padrões de corte.

Para uma melhor apreciação dos resultados, a figura 13 mostra um gráfico onde é possível visualizar a evolução de cada objetivo por alteração do valor de n .

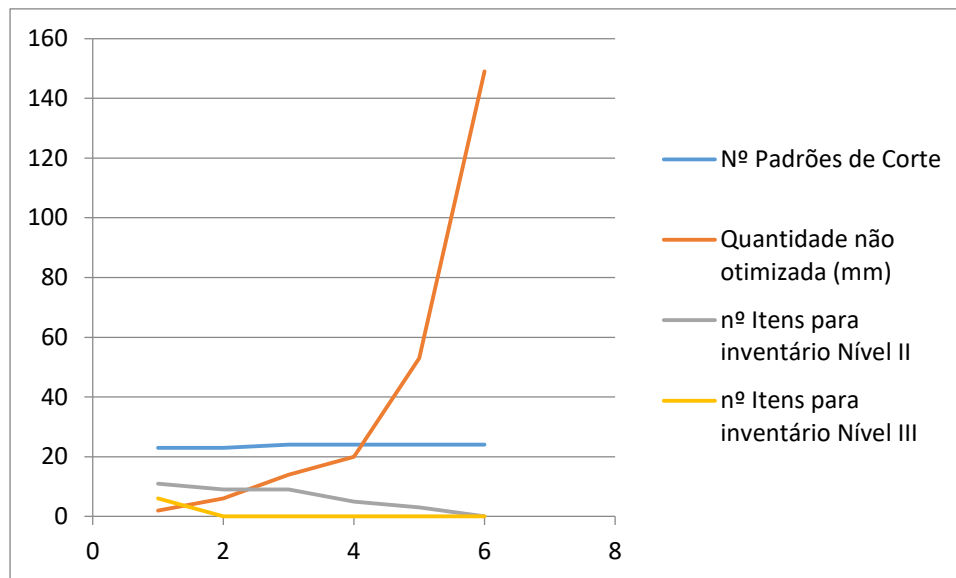


Figura 13 – Gráfico com a evolução dos objetivos por alteração do valor de n

5.2 FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

A programação linear dentro do contexto da Investigação Operacional (IO) tem sido amplamente divulgada e aplicada nas mais diversas áreas. No entanto, existem casos em que mais de um objetivo, muitas vezes conflitantes, podem ocorrer quando se tenta encontrar a melhor solução possível a um problema de otimização. Nestes casos a Programação Linear Multiobjetivo (PLMO) apresenta-se como forma de encontrar uma solução, que neste caso, dado que existem múltiplos objetivos, será um conjunto de soluções eficientes, chamadas de não dominadas para o problema, conforme descrito em (Angulo Meza, 2006).

Num problema com múltiplos objetivos não existe, em geral, uma solução admissível que otimiza simultaneamente todas as funções objetivo, pelo que a noção de solução ótima dá lugar à noção de solução eficiente. Uma solução eficiente

caracteriza-se por não existir uma outra solução admissível que melhore o valor de uma função objetivo sem piorar o valor de pelo menos uma outra. Existem vários métodos para determinar estas soluções não dominadas. Todos eles utilizam um processo de escalarização linear, que consiste na transformação do problema multiobjectivo em um problema de otimização de uma função escalar substituta (Noghin, 2015). A solução ótima é também uma solução não dominada do problema PLMO, incluindo parâmetros de informação das preferências do decisor.

Segundo (Grodzevich & Romanko, 2006), do ponto de vista matemático, cada solução eficiente é igualmente aceitável como a solução para o problema de otimização multiobjectivo. No entanto, por razões práticas, apenas uma solução deve ser escolhida no final. Escolher um ponto desejável para fora do conjunto de soluções eficiente envolve um decisor. O decisor é a pessoa que tem o discernimento sobre o problema e que é capaz de expressar as relações de preferência, que podem evoluir ao longo do processo, entre as diferentes soluções. No contexto deste capítulo pretende-se encontrar uma solução eficiente que satisfaça o decisor.

A função multiobjectivo deste trabalho surge da combinação de três objetivos diferentes, i.e., a minimização do desperdício, a minimização do número de padrões de corte e a minimização do corte de itens para inventário. O modelo de programação linear desenvolvido tenta traduzir uma parte simplificada e limitada da situação real, ou seja, tenta incluir apenas parte das variáveis que o decisor pode controlar. Assim sendo, tentou-se construir um modelo tão exaustivo quanto possível, que conseguisse traduzir da forma mais fidedigna a realidade que representa. A solução ótima que o modelo possa encontrar permitirá ao decisor, após a sua análise crítica do seu conteúdo, efetuar uma escolha. Qualquer objetivo que seja claramente definido tem por base uma situação envolvente que pode ter uma maior ou menor extensão. Sempre que o âmbito de atuação ou de decisão seja alterado, também o objetivo poderá ter que ser redefinido.

Com o intuito de corroborar que a utilização da função multiobjectivo deste trabalho representa uma grande vantagem comparativamente à utilização de um único objetivo foi testado o modelo com função multiobjectivo e posteriormente foi

utilizado um tipo de função de escalarização linear que consiste na otimização de uma das funções objetivo restringindo as outras (Clímaco, 2003).

Os dados utilizados foram obtidos novamente a partir da geração de dados aleatórios da plataforma Excel (ver capítulo 8). Aqui, uma vez mais, tentou-se aproximar os dados o mais possível à realidade da empresa. O conjunto de dados formado, que são utilizados em cada uma das fases com 10 instâncias, utilizou os seguintes parâmetros:

- L_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).
- P_i : Nível I para os 4 primeiros itens gerados (penalização = 1);
- P_i : Nível II para os itens 5 a 8 gerados (penalização = 4);
- P_i : Nível III para os dois últimos itens gerados (penalização = 9).

E foram consideradas as seguintes restrições:

- $F = 18$;
- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$.

A tabela 4 mostra os resultados obtidos através da abordagem de resolução do problema de corte de *stock* unidimensional com uma função multiobjectivo, utilizando diferentes larguras de objetos. Todos os resultados foram obtidos com um tempo de resposta inferior a 5 segundos.

Na análise aos resultados obtidos, destaca-se que em 23 padrões de corte, apenas 9 mm não foram otimizados. Não foi necessário otimizar padrões de corte com a utilização de itens do nível III. Para um total de 196 itens mínimos gerados para corte,

foram obtidos 268 itens, sendo que apenas 9 itens não necessitavam de ser conciliados (Nível II).

Tabela 4 – Resultados obtidos com função multiobjectivo

Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	4	0
2	26	5	0	2	0
3	72	5	2	1	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	2	0	0
6	12	1	1	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:		23	9	9	0

5.2.1 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE

Numa análise isolada, com o único objetivo de minimizar o número de padrões de corte, o conjunto de dados gerados (ver capítulo 8) utilizou em cada uma das 10 instâncias os seguintes parâmetros:

- L_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).

Foram consideradas as seguintes restrições:

- $F = 18$;

- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$:
- LO_j mínimo (mm): 990 (1x), 1240 (2x) e 1490 (2x).

Se não fosse considerado a restrição da largura mínima a otimizar por cada objeto, os resultados obtidos apresentavam soluções com desperdício totalmente disparatado, não permitindo assim efetuar uma análise crítica dos resultados. Não sendo um objetivo, foi considerado como sendo uma restrição. Mantendo o foco da aproximação à realidade da empresa, uma perda até um máximo 7 mm está enquadrada como sendo aceitável.

Pela análise aos resultados, apresentados na tabela 5, podemos constatar que, no que respeita ao objetivo de minimizar o número de padrões de corte, o mesmo foi otimizado em 23 padrões de corte. Valor igualmente alcançado com o modelo anterior (função multiobjectivo). Em termos de desperdício, os resultados obtidos estão muito longe de serem aceitáveis comparativamente com os resultados da tabela 4.

Tabela 5 – Resultados com o modelo a utilizar o objetivo único da minimização do número de padrões de corte

Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	8	4	0
2	26	5	10	6	4
3	72	5	9	6	7
4	10	1	1	0	0
5	5	1	6	0	0
6	12	1	5	0	1
7	5	1	5	0	0
8	9	1	0	0	1
9	40	5	18	3	1
10	8	1	7	0	0
Soma:		23	69	19	14

O número de itens para inventário, sendo já espectável por não ser um objetivo nesta análise, também aumentou. Um total de 33 itens sem necessidade primária de

consumo foi conciliado. Todos os resultados foram obtidos com um tempo de resposta inferior a 5 segundos.

5.2.2 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO DESPERDÍCIO

Numa análise isolada, com o único objetivo de minimizar o desperdício, o conjunto de dados gerados (ver capítulo 8) utilizou em cada uma das 10 instâncias os seguintes parâmetros:

- L_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).

Foram consideradas as seguintes restrições:

- $F = 18$;
- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$:

De acordo com a tabela 6, podemos constatar que no que respeita ao objetivo da minimização do desperdício, o mesmo é satisfeito totalmente ao apresentar soluções que otimizem completamente os objetos. Contudo, comparando com outros aspetos importantes, enquadrados com realidade do problema de corte, é verificado que em termos de padrões de corte, a solução apresentada está muito longe do que seria de esperar. Seria necessário efetuar 41 *setups*, o que corresponde aproximadamente duas vezes mais, comparativamente com os resultados da tabela 1.

Se cada *setup* corresponder (em média) a 60 minutos de preparação, esta solução corresponderia a um incremento de 18 horas de trabalho para três funcionários.

Tabela 6 - Resultados com o modelo a utilizar o objetivo único da minimização do desperdício

Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	4	0	23	2
2	26	5	0	11	4
3	72	5	0	8	7
4	10	5	0	45	1
5	5	1	0	0	4
6	12	5	0	16	5
7	5	5	0	11	14
8	9	3	0	7	0
9	40	5	0	5	1
10	8	3	0	7	0
Soma:		41	0	133	38

Um outro resultado negativo que se pode verificar na tabela 6, é a quantidade excessiva de itens com pouca, ou muito pouca importância. Para um total de 196 itens mínimos, é apresentada soluções com um total de 491 itens em 41 padrões de corte, dos quais 171 itens não têm necessidade primária de consumo e foram conciliados (133 itens classificados nível II e 38 itens classificados como Nível III).

Em termos de processamento dos dados, embora aceitável, notou-se pior desempenho mas ainda assim com um tempo de resposta inferior a 3 minutos para cada instância.

5.2.3 OBJETIVO ÚNICO: MINIMIZAÇÃO DO CORTE DE ITENS PARA STOCK

Numa análise isolada, com o único objetivo de minimizar o corte de itens para *stock*, o conjunto de dados gerados (ver capítulo 8) utilizou em cada uma das 10 instâncias os seguintes parâmetros:

- L_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).
- P_i : Nível I para os 4 primeiros itens gerados (penalização = 1);
- P_i : Nível II para os itens 5 a 8 gerados (penalização = 4);
- P_i : Nível III para os dois últimos itens gerados (penalização = 9).

Foram consideradas as seguintes restrições:

- $F = 18$;
- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$;
- LO_j mínimo (mm): 990 (1x), 1240 (2x) e 1490 (2x).

Aqui também é considerado a restrição da largura mínima a otimizar por cada objeto. Se assim não fosse, os resultados obtidos apresentavam soluções com desperdício totalmente desenquadrado. Não sendo um objetivo, foi considerado como sendo uma restrição. Mantendo o foco da aproximação à realidade da empresa, uma perda até um máximo 7 mm está enquadrada como sendo aceitável.

Os resultados, demonstrados na tabela 7, apresentam boas soluções no que respeita ao objetivo definido para a minimização do corte de itens para *stock*. Num mínimo de 196 itens gerados, foram apresentadas soluções para 24 padrões de corte com 256 itens, nos quais apenas 5 itens não são do nível I (classificados como nível II). Apresenta melhores resultados, comparativamente aos indicados na tabela 4 (9 itens do nível II e nenhum do nível III).

Em termos do número de padrões de corte, indica resultados próximos (com mais um *setup* na tabela 7).

Tabela 7 - Resultados com o modelo a utilizar o objetivo único da minimização do corte de itens para *stock*

Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	12	4	0
2	26	5	16	1	0
3	72	5	7	0	0
4	10	1	5	0	0
5	5	1	7	0	0
6	12	2	8	0	0
7	5	1	5	0	0
8	9	1	7	0	0
9	40	5	14	0	0
10	8	1	2	0	0
Soma:		24	83	5	0

Para o objetivo da otimização dos objetos, este objetivo isolado é o que apresenta piores resultados com um total de 83 mm. Como se afasta muito do objetivo de minimizar o desperdício, podemos concluir que este modelo isolado não satisfaz o pretendido para este trabalho. Podia ser melhorado alterando a restrição da largura mínima, considerado por exemplo uma perda até um máximo 6 mm por objeto (ou até menos). Mas este valor continuaria a não ser otimizado. O modelo vai continuar a procurar as melhores soluções que respeitem as restrições e não a melhor solução que optimize a largura dos objetos. Os resultados obtidos podiam melhorar em termos de desperdício, mas nunca seriam otimizados e certamente pioravam no que respeita aos outros objetivos.

Todos os resultados foram obtidos com um tempo de resposta inferior a 5 segundos

5.3 PONDERAÇÃO DOS OBJETIVOS

Todos os objetivos definidos para o modelo são importantes e adequados à realidade do corte e foi verificado que devem ser considerados em conjunto. Agora

falta definir qual o peso que cada um representa na decisão final. Pretende-se não só conseguir soluções ótimas para cada objetivo individualmente, mas também boas soluções que resultam de uma combinação ponderada dos três objetivos.

Considerou-se W_1 o valor atribuído (peso) ao objetivo da minimização do número de padrões de corte, W_2 para a minimização do desperdício e W_3 para a minimização do corte de itens para *stock* e a seguinte equação:

$$\sum_{k=1}^3 W_k = 1$$

Não deve ser considerado mais importante minimizar o número de padrões de corte quando o mesmo representa mais desperdício significativo no corte. Não podemos também considerar aceitável reduzir a quantidade de arco para *stock* quando o mesmo representa também mais desperdício considerável no corte. Por último, é preferível executar mais trocas de ferramenta se a mesma implicar o corte de menor quantidade de arco para *stock*. De acordo com estes princípios, foi atribuído um peso individual a cada um dos objetivos.

Numa primeira fase considerou-se $(W_1; W_2; W_3) = (1/3; 1/3; 1/3)$, ou seja, todos com o mesmo peso na solução final. Posteriormente comparou-se o modelo por alteração dos parâmetros para $(1/6; 3/6; 2/6)$ e $(1/11; 6/11; 4/11)$, aumentando o peso dos objetivos gradualmente, seguindo o raciocínio de importância referido anteriormente. Valores mais elevados são atribuídos aos objetivos considerados mais importantes e mais baixos aos objetivos menos importantes, uma vez que o objetivo é minimizar.

Para esta análise foi novamente utilizando dados fictícios extraídos a partir do gerador de dados aleatórios da plataforma Excel (ver capítulo 8). O conjunto de dados formado, que são utilizados em cada uma das fases com 10 instâncias, utilizou os seguintes parâmetros:

- L_i (mm): ALEATÓRIOENTRE (31;238);
- Número máximo de padrões de corte para cada instância: 5;
- LO_j (mm): 997 (1x), 1247 (2x) e 1497 (2x).

- P_i : Nível I para os 4 primeiros itens gerados (penalização = 1);
- P_i : Nível II para os itens 5 a 8 gerados (penalização = 4);
- P_i : Nível III para os dois últimos itens gerados (penalização = 9).

E foram consideradas as seguintes restrições:

- $F = 18$;
- $dmin_i$: varia em função da instância gerada aleatoriamente (Procura (ton): ALEATÓRIOENTRE (5;120));
- $dmax_i = 999$.

Na análise aos resultados obtidos, reportados na tabela 8, podemos verificar que não existe grande variação por alteração aos parâmetros $(W_1; W_2; W_3)$. Todas as soluções calculadas (69 padrões de corte) apresentam soluções com muito boa qualidade. A única melhoria registada está na transição de $(W_1; W_2; W_3) = (1/3; 1/3; 1/3)$ para $(W_1; W_2; W_3) = (1/6; 3/6; 2/6)$ em que, para a mesma quantidade de padrões de corte (23), destaca-se uma melhoria em termos de desperdício (menos 2 mm de perda) e menos um item do nível II (com um total de 9).

Os resultados exibidos para $(W_1; W_2; W_3) = (1/11; 6/11; 4/11)$, são exatamente iguais aos resultados de $(W_1; W_2; W_3) = (1/6; 3/6; 2/6)$ em que até os mesmos padrões de corte são iguais.

Como base nesta análise será considerado a função objetivo com os parâmetros $(W_1; W_2; W_3) = (1/6; 3/6; 2/6)$. Todos os resultados foram obtidos com um tempo de resposta inferior a 5 segundos.

Tabela 8 – Resultados obtidos por alteração dos parâmetros ($W_1;W_2;W_3$) para função multiobjectivo

(W1;W2;W3) = (1/3;1/3;1/3)					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	0	5	0
2	26	5	0	2	0
3	72	5	2	1	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	2	0	0
6	12	1	1	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:		23	8	10	0

(W1;W2;W3) = (1/6;3/6;2/6)					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	4	0
2	26	5	0	2	0
3	72	5	2	1	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	1	0	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:		23	6	9	0

(W1;W2;W3) = (1/11;6/11;4/11)					
Instâncias aleatórias	nº itens mínimo	nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para stock	
				Nível II	Nível III
1	9	2	1	4	0
2	26	5	0	2	0
3	72	5	2	1	0
4	10	1	1	0	0
5	5	1	0	0	0
6	12	1	0	2	0
7	5	1	0	0	0
8	9	1	0	0	0
9	40	5	1	0	0
10	8	1	1	0	0
Soma:		23	6	9	0

5.4 TESTES COMPUTACIONAIS COM EXEMPLOS REAIS

Na empresa, todos os dias são realizadas dezenas de fichas de corte sem o apoio de um modelo que ajude a decidir. Toda a informação relevante do problema está disponível, mas o padrão de corte é definido por tentativa erro com base na experiência do planeador. O decisor avança sempre com soluções satisfatórias, que até poderão ser as melhores, mas nunca terá a certeza se existirão melhores soluções.

Os seguintes exemplos retratam apenas algumas situações reais que ocorreram, e foram registados os seus resultados. Testou-se os mesmos problemas com a aplicação do modelo de apoio à decisão proposto e obteve-se resultados muito mais

competitivos quer em termos de tempo de resolução quer em termos de qualidade da solução.

A tabela 9 apresenta uma lista de pedidos que devem ser conciliados em objetos com largura única disponível de 1500 mm. O *stock* de objetos disponível é limitado mas suficiente para satisfazer toda a sua procura. Para este tipo de matéria-prima deve ser considerado uma largura máxima a otimizar de 1494 mm (LO_j) para que seja viável o corte.

Neste exemplo não será possível a conciliação de itens para utilização futura (arco para *stock*). Trata-se de um caso específico de uma matéria-prima que não é utilizada para a produção de *stock* de outros produtos/itens. Assim sendo é atribuído uma penalização igual para todos os itens, com valor de 1.

Tabela 9 – Lista de pedidos, sem possibilidade de conciliação com itens para *stock* (exemplo real Ferpinta S.A.)

Arco (mm)	Necessidades (ton)	Penalização
98	20	1
100	75	1
110	20	1
120	10	1
122	40	1
143	20	1
180	25	1

Um máximo de 18 itens por padrão de corte é considerado como restrição (F). A quantidade mínima de cada tipo de itens é calculada com base numa quantidade fixa de 10.000 kg de cada bobine, conforme exposto anteriormente no capítulo descrição do problema.

Na figura 14 é possível verificar a solução apresentada pelo decisor sem o recurso a um modelo de apoio à decisão. Na figura 15 a solução apresentada pelo modelo.

Numa primeira análise, ressalta o número de padrões de cortes definido pelo decisor para resolver o problema. Correspondem a mais quatro trocas de ferramenta comparativamente à abordagem proposta pelo modelo.

disponíveis em armazém tem largura única 1250 mm ($LO_j = 1248$ mm) e, uma mais uma vez o *stock* em armazém é limitado mas suficiente para satisfazer toda a procura.

Tabela 10 - Lista de pedidos para diferentes tipos de matéria-prima, com possibilidade de conciliação com itens para *stock* (exemplo real Ferpinta S.A.)

Penalização	1,5 Pol		1,5 Gal		2,0 Pol		2,0 Gal	
	Arco (mm)	Necessidades (ton)	Arco (mm)	Necessidades (ton)	Arco (mm)	Necessidades (ton)	Arco (mm)	Necessidades (ton)
1	68	92	98	93	67	22	155	20
1	156	24	156	20	155	20	197	25
1	166	16	166	50	197	142	277	7
1	198	68	198	9	277	57	312	11
4	78		68		60		117	
4	118		78		137		157	
4	138		108		177		187	
4	158		158		297		297	
9	58		118		97		92	
9	93		138		237		124	

Aqui, uma vez mais, foi considerado a restrição de máximo 18 itens por padrão de corte (F). A tabela 11 apresenta um resumo comparativo com as soluções obtidas quer pelo modelo quer pelo planeador. As fichas de corte podem ser consultadas no anexo 8.1.

Tabela 11 – Resumo comparativo com somatório dos valores obtidos para os principais objetivos de corte (com e sem o auxílio do modelo de apoio à decisão)

Sem o modelo				
Tipo de MP	Nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para inventário	
			Nível II	Nível III
1,5 Pol	2	12	3	0
1,5 Gal	2	10	4	0
2,0 Pol	4	24	4	0
2,0 Gal	3	28	3	2
Total:	11	74	14	2

Com o modelo				
Tipo de MP	Nº Padrões de Corte	Quantidade não otimizada (mm)	nº Itens para inventário	
			Nível II	Nível III
1,5 Pol	2	0	1	0
1,5 Gal	2	2	5	0
2,0 Pol	2	5	1	0
2,0 Gal	3	3	3	0
Total:	9	10	10	0

É possível verificar que os resultados apresentam melhores decisões de corte em termos de qualidade de solução com a utilização do modelo de apoio à decisão. Apesar de ser significativo a redução do número de trocas de ferramenta e a minimização do corte de itens para inventário, o maior impacto está na diferença de 64 mm de quantidade não otimizada. Esta diferença no corte para satisfazer a procura da tabela 10 corresponde a 3.410 kg para uma quantidade de 818.000 kg de objetos cortados (907.000 kg sem o apoio do modelo). Esta diferença representa um ganho de 0,376%.

Importa ainda referir que o tempo de resposta do modelo foi inferior a 1 minuto. Um planeador experiente sem o modelo necessitaria de aproximadamente 15/20 minutos para desafios com este grau de dificuldade.

5.5 IMPACTO ANUAL

A implementação e utilização do modelo de apoio à decisão podem implicar ganhos significativos na empresa. Alguns desses ganhos, tais como a motivação do decisor ou a redução de defeitos a montante do processo, serão difíceis de quantificar.

Com base numa pequena amostragem de dados recolhidos e testados, com o modelo de apoio à decisão, é estimado uma possível eliminação de 0,3% de desperdício no corte, sendo este o foco principal do trabalho, a otimização do corte de bobines de aço para fabrico de tubo. Se a empresa tem uma capacidade produtiva a rondar as 350.000 toneladas por ano, 0,3% corresponde a uma eliminação de desperdício a rondar as 1050 toneladas por ano.

Admitindo que o produto final é vendido, de um modo grosseiro, com um preço médio de 700 €/ton e, o preço da sucata está valorizada em 90 € / tons a diferença estimada é de 610 €/ton. Se multiplicamos este valor pelas toneladas de desperdício que podem ser evitadas, chega-se a um valor estimado de 640.500 €/ano.

Este valor é apenas uma estimativa, uma análise mais rigorosa deveria ser feita para obter um resultado mais fiável. Teria que ser analisado uma amostragem mais elevada de dados e comparar com o modelo. As variações do preço do aço também deveriam ser consideradas bem como a heterogeneidade dos preços de venda de

tubos, que variam em função do tipo de matéria-prima ou tipo de aplicação final (pode conduzir a um preço diferente). Ao preço de venda do tubo deve ser desconsiderado os custos de transformação. Como este estudo minucioso foge do âmbito do trabalho, apenas é considerado um valor estimado, que é exetável ser próximo da realidade.

O ganho anual não se resume apenas no objetivo da eliminação do desperdício. Como o avanço do trabalho, rapidamente percebeu-se que este objetivo deveria ser complementado com outros tais como a redução do corte de arco para *stock* e a minimização do número de trocas de ferramenta.

O ganho com a redução no número de trocas de ferramenta será igualmente difícil de quantificar uma vez que existe um conjunto de fatores que podem determinar o número de padrões de corte, tais como a gestão do arco em armazém, encomendas extraprograma, diferentes larguras disponíveis para corte, *lead time* com chegada da matéria-prima, avarias dos equipamentos, entre outros. Numa abordagem geral, como base em dados recolhidos por amostragem, estima-se que, atualmente, em cada 80 ton de objetos cortados corresponda a uma troca de ferramenta. Com a aplicação do modelo estima-se que cada *setup* corresponda a 90 toneladas de objetos cortados. Para uma capacidade produtiva anual das 350.000 ton implica uma redução de 486 *setups* por ano.

Se consideramos que cada troca de ferramenta é executada por 3 funcionários e que tem uma duração média de 60 minutos, 486 *setups* equivalem a 486 horas x 3 funcionários. Se cada funcionário auferir um vencimento (médio) de 800 € / mês, estima-se uma poupança anual de 7.290 €.

$$486 \text{ Horas} / 160 \text{ horas de laboração por mês} = 3,0375 \text{ meses de trabalho}$$

$$3,0375 \text{ Meses de trabalho} \times 800 \text{ €} \times 3 \text{ funcionários} = 7.290 \text{ €} / \text{ano}$$

Aqui também poderia ser considerado o tempo improdutivo, i.e., enquanto decorre a operação de troca de ferramenta e máquina não produz. O excesso de tempo improdutivo pode levar a necessidade de laboração em turnos extra (como por exemplo Sábado ou 3ª turno), menor disponibilidade para manutenção, etc..

Custos de posse, custos com problemas de qualidade, custos com tempos para a definição do padrão de corte, tempos de espera, custos de transporte ou de movimentações extras, trabalhos extra, custos da não disponibilidade de matéria-prima, a não utilização da matéria-prima de uma forma racional ou os custos de energia poderiam também aqui serem considerados. De um modo grosseiro estima-se que a implementação do modelo poderá levar a uma poupança anual próxima dos 650.000 €.

CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma abordagem para resolver os problemas de corte de bobines de aço, enquadrado com a realidade da empresa Ferpinta S.A.. O modelo apresentado tinha como objetivo minimizar simultaneamente, o número de padrões de corte, minimizar o desperdício e minimizar o corte de arco para *stock*.

Testes computacionais foram realizados e permitiram concluir que os resultados obtidos, com a aplicação do modelo de apoio à decisão proposto, alcança soluções muito mais competitivas quer em termos de tempo de resolução quer em termos de qualidade da solução.

Para obter melhores resultados num determinado objetivo, por vezes é necessário sacrificar outro. A cada objetivo foi atribuído uma importância, mas tendo em conta que o corte longitudinal deve ter a capacidade de se adaptar às necessidades do planeamento do tubo, por vezes é necessário alterar a importância atribuída a cada objetivo. Sempre que a solução não é satisfatória para o decisor, este pode simular novos resultados por alteração dos parâmetros ou restrições impostas, ou seja, ter a capacidade de adaptar às necessidades do dia-a-dia. Tudo isto pode ser feito em tempo real com a utilização do modelo proposto.

O modelo já foi várias vezes utilizado na empresa e alcançou sempre bons resultados. Será claramente uma mais-valia para todas as empresas de corte de bobines de aço que procuram minimizar o seu desperdício no corte, sem deixar de parte outros objetivos importantes, podendo assim as empresas tornarem-se mais competitivas, se dessa forma aumentarem a sua margem.

Embora a matriz utilizada pelo modelo esteja enquadrada com a realidade da empresa (com um máximo de 5 padrões de corte), como trabalho futuro propõem-se que seja testado o modelo para um número superior, permitindo assim tornar o modelo mais abrangente.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

7 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Angulo Meza, L. S. (2006). *Estudos Conjuntos de Análise Envoltória de Dados (DEA) e Programação Linear Multiobjetivo (PLMO): Uma Revisão Bibliográfica*. Relatório de Pesquisa em Engenharia de Produção v.6, n.5.
- C. Cherri, M. N. (2009). The one-dimensional cutting stock problem with usable leftover – A heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 196, pp. 897-908.
- Carvalho, J. M. (1998). Exact solution of cutting stock problems using column generation and branch-and-bound. *International Transactions in Operational Research*, 5(1):35–44.
- Carvalho, J. M. (2002). LP models for bin packing and cutting stock problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 141, 253-273.
- Clímaco, J. C. (2003). Programação Linear Multiobjectivo - do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objectivo. *Imprensa da Universidade de Coimbra*.
- CORRÊA e GIANESI, I. H. (1996.). Just in Time, MRP-II e OPT – um enfoque estratégico. São Paulo: Atlas.
- Dyckhoff, H. (1981). A new linear-programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research*, 29(6):1092–1104.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 44, 145-159.
- Eilon, S. (1960). Optimizing the shearing of steel bars. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2(2):129–142.
- Eisemann, K. (1957). The trim problem. *Management Science*, 3(3):279–284.
- Farley, A. (1988). Mathematical programming models for cutting-stock problems in the clothing industry. *The Journal of the Operational Research Society*, 39, 41-53.
- G. Wäscher, H. H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 83:1109–1130.
- Gau, G. W. (1996). Heuristics for the integer one-dimensional cutting stockproblem: A computational study. *OR Spektrum*, 18(3):131–144.
- Gilmore, P. . (1965). Multistage cutting stock problems of two and more dimensions. *Operations Research*, 13(1), 94–120.
- Gilmore, P. (1963). A linear programming approach to the cutting stock problem - part II. *Operations Research*, 11(6), 863–888.
- Gilmore, P. C. (1961). A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations research*, 9(6), 849–859.
- Gradisar, P. T. (2007). One-dimensional cutting stock optimization in consecutive time periods. *European Journal of Operational Research*, vol. 179, pp. 291-301.
- Gramani, M. &. (2006). The combined cutting stock and lot-sizing problem in industrial processes. *European Journal of Operational Research*, 174, 509-521.

- Grodzevich, O., & Romanko, O. (2006). *Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization*. Proceedings of the Fields–MITACS Industrial Problems Workshop.
- HAESSLER, R. (1975). Controlling cutting pattern changes in one-dimensional trim problems. *Operations Research*, v. 23, p. 483-493.
- Hendry, L., & Fok, K. &. (1996). A cutting stock and scheduling problem in the copper industry. *Journal of the Operational Research Society*, 47, 38-47.
- Hill, M. M., & Santos, M. M. (2015). *Investigação Operacional - Vol. 1 - Programação Linear*. Lisboa: Edições Sílabo.
- Imai, M. (1997). *Gemba Kaizen: A Commonsense, Low-Cost Approach to Management*. McGraw-Hill.
- Johnston, R. E. (1986). Rounding algorithm for cutting stock problems. *Operations Research Societies*, 3(2):166–171.
- Kantorovich, K. V. (1939). Mathematical methods in the organisation and planning of production. *Publication House of the Leningrad State University, Leningrad*.
- Kantorovich, L. V. (1960). Mathematical-methods of organizing and planning production. *Management Science*, 6(4):366–422.
- M. HMA Jahromi, R. T.-M. (2012). Solving an one-dimensional cutting stock problem by simulated annealing and tabu search. *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 8, no. 24, doi:10.1186/2251-712X-8-24.
- M. M. Malik, J. H. (2013). Variants of the cutting stock problem and the solution methods. *Int. Journal of Economics and Finance Studies*, vol 5, no. 2, pp. 45-54.
- Metzger, R. (1958). Stock slitting (chapter 8). In *Elementary Mathematical Programming*. Wiley, New York.
- Moretti, A. S. (2008). Nonlinear cutting stock problem model to minimize the number of different patterns and objects. *Computational and Applied Mathematics*, 27, 61-78.
- Noghin, V. D. (2015). *Scientific and Technical Information Processing*, Vol. 42, No. 6, pp. 463–469.
- Ozdemir, T. A. (2009). An integrated approach to the onedimensional cutting stock problem in coronary stent manufacturing. *European Journal of Operational Research*, vol. 196, 737-743.
- Poltroniere, S., Poldi, K., & Toledo, F. &. (2008). Coupling Cutting Stock and Lot Sizing Problems in the Paper Industry. *Annals of Operations Research*, 157, 91-104.
- Ramos, C. M. (2015). A engenharia como factor determinante no crescimento económico e social. *Expansão*, 9.
- Respício, A., & Captivo, M. &. (2002). A DSS for Production Planning and Scheduling in the Paper Industry. *International Conference On Decision Making and Decision Support in the Internet Age*, (pp. 298-308). University College Cork, Cork, Ireland.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*. Madrid, Espanha: Alianza Editorial S.A.

- S. Koch, S. K. (2008). Linear Programming for a Cutting Problem in the Wood Processing Industry – A Case Study. *FEMM Working Paper no. 14*.
- Scheithauer, G. B. (2002). A cutting plane algorithm for the onedimensional cutting stock problem with multiple stock lengths. *European Journal of Operational Research*, 141(2):274–294.
- Stadtler, H. (1988). Comparison of 2 optimization procedures for 1-dimensional and 1.5-dimensional cutting stock problems. *OR Spektrum*, 10(2):97–111.
- Walter, A. P. (1954). The trim problem: an application of linear programming to the manufacture of newsprint paper. *In Annual Econometric Meeting. Montreal*.
- Womack, J. and D. Jones, D. (2005). *Lean solutions*. Free Press.

ANEXOS

8.1 FICHAS DE CORTE DO EXEMPLO REAL APRESENTADO EM 5.4

8 ANEXOS

Dados gerados aleatoriamente na plataforma Excel

Instância 1			Instância 2			Instância 3		
Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)
232	30	1	158	62	7	86	5	1
235	93	3	211	110	10	214	103	8
231	54	2	224	98	8	39	94	41
124	46	3	149	8	1	37	46	21
130			34			105		
32			220			187		
145			167			58		
125			151			114		
171			117			63		
115			104			148		
Instância 4			Instância 5			Instância 6		
Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)
34	60	6	66	67	2	42	69	7
204	97	2	167	86	1	135	60	2
186	81	2	76	45	1	145	33	1
122	35	1	186	106	1	187	60	1
185			151			157		
43			200			203		
56			130			173		
181			38			168		
128			67			171		
141			73			138		

Instância 7			Instância 8			Instância 9		
Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)	Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)
104	68	1	181	101	2	163	92	10
99	74	1	201	65	1	89	103	20
73	98	2	39	43	3	226	118	9
124	97	1	80	69	3	206	12	1
145			54			165		
205			236			195		
232			75			90		
144			58			115		
214			38			196		
61			77			153		
Instância 10								
Arco (mm)	Necessidades (tons)	Necessidades (arcos)						
68	65	3						
221	117	1						
171	63	1						
73	68	3						
142								
119								
159								
95								
82								
219								

1.5 galv

Com o modelo

Padrão de corte 1		
119,00		Tons
10	98	93,30
1	198	18,85
1	68	6,47

1246 mm

Padrão de corte 2		
95,00		Tons
2	156	23,71
4	166	50,46
4	68	20,67

1248 mm

Padrão de corte 3		
		Tons

0 mm

1.5 galv

Sem o modelo

Padrão de corte 1		
100,00		Tons
2	156	24,96
4	166	53,12
1	198	15,84
1	68	5,44

1242 mm

Padrão de corte 2		
120,00		Tons
10	98	94,08
2	78	14,98
1	108	10,37

1244 mm

Padrão de corte 3		
		Tons

0 mm

2 POL

Com o modelo

Padrão de corte 1		
140,00		Tons
3	67	22,51
3	197	66,19
1	277	31,02
1	177	19,82

1246 mm

Padrão de corte 2		
140,00		Tons
1	67	7,50
2	155	34,72
3	197	66,19
1	277	31,02

1245 mm

Padrão de corte 3		
		Tons

0 mm

Padrão de corte 4		
		Tons

0 mm

2 POL

Sem o modelo

Padrão de corte 1		
68,00		Tons
6	197	64,30
1	60	3,26

1242 mm

Padrão de corte 2		
42,00		Tons
10	67	22,51
2	197	13,24
1	177	5,95

1241 mm

Padrão de corte 3		
160,00		Tons
1	155	19,84
4	197	100,86
1	297	38,02

1240 mm

Padrão de corte 4		
68,00		Tons
4	277	60,28
1	137	7,45

1245 mm

