

SARAH EL ACHKAR DA SILVA

**Otimização no processo de corte unidimensional de
barras de aço**

São Paulo

2008

SARAH EL ACHKAR DA SILVA

**Otimização no processo de corte unidimensional de
barras de aço**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Diploma de Engenharia
de Produção.

Orientadora: Prof^a Dr^a Débora Pretti Ronconi

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Sarah El Achkar da

Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço / S.E.A. da Silva. -- São Paulo, 2008.

101 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Pesquisa Operacional 2.Corte 3.Aço I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

À minha família e aos meus amigos pelo
apoio e carinho sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e a minha irmã Karla, pelo amor incondicional, pela compreensão e pelo esforço para que meus sonhos se realizassem.

Agradeço também a todos familiares, primos, tios e avós, que mesmo distantes, sempre me apoiaram e torceram por mim. À minha vizinha e *designer* Renata.

Gostaria de agradecer o carinho especial dos amigos mais presentes. Às amigas de todos os momentos: Andréia e Beatriz. Aos amigos do IME: Adalberto e Iuri. Àqueles que sempre tiveram do meu lado em trabalhos, churrascos e viagens, inclusive do outro lado do oceano: George, Narê, Rafael, Silvia e Vinícius. À turma da Produção, pela união, conversas e emails. A todos que foram minha família durante o ano de 2006; em especial, ao meu *mitbewohner* Carlos, pelo companheirismo e carinho.

Não poderia deixar de agradecer a todos que contribuíram na minha vida profissional em todos os estágios: Klaus e Markus na Opel, Cris, Kátia, D.Regina na H.Stern, Eduardo e Ivo na AçoX, Mirabelli e Hilton na ZBS.

Agradeço ao professor Rotondaro, meu orientador de iniciação científica. E aos professores Santoro e Mesquita pela atenção.

E finalmente, agradeço a minha professora orientadora deste trabalho de formatura, Débora, pela confiança, incentivo e aprendizado.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido em uma empresa que vende barras de aço que são cortadas de acordo com as dimensões solicitadas pelo cliente. Após o corte, o comprimento das barras de aços diminui e, dependendo desta redução de tamanho, a sobra da barra poderá ser usada no futuro (retalho) ou não poderá ser usada mais (perda). O volume dessas perdas é expressivo e representa um custo alto para a empresa. Para minimizar o desperdício de material resultante da falta de planejamento do processo de corte unidimensional, modelos de otimização que vão ao encontro com a realidade da empresa serão analisados. Os modelos podem ser aplicados a outras empresas, que cortam outros tipos de materiais, como papel, madeira ou vidro.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Corte. Aço.

ABSTRACT

This work was developed in a company which sells steel bars that are cut according to the size that is requested by customers. After cutting the steel bars, the length of the remainder bar decreases and, depending on this size decrease, the remainder bar can be used in the future (shred) or it cannot be used anymore (trim loss). The volume of this loss is expressive and represents a high cost to the company. In order to minimize the loss of material due to a lack of planning of the unidimensional cutting process, models of optimization, which according to the reality of the company, will be analysed. These models can be applied to other industries, whose cut other sort of materials, such as paper, wood or glass.

Keywords: Operational Research. Cut. Steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - PERFIL DAS BARRAS.....	20
FIGURA 2.2 - DIMENSÕES DA SEÇÃO DE CORTE DE UMA BARRA.	20
FIGURA 2.3 - AÇO PÓS CORTE.	21
FIGURA 2.4 - GALPÃO DE MÁQUINAS PARA AÇOS LEVES DA EMPRESA AÇOX.	22
FIGURA 2.5 - ESTOQUE DE UM AÇO DE PERFIL RETANGULAR.	23
FIGURA 2.6 - ESTOQUE DE AÇOS DE PERFIL REDONDO.	23
FIGURA 2.7 - BARRA DE AÇO FRESADO E BARRA DE AÇO SENDO USINADA COMO ANEL.	24
FIGURA 2.8 - FLUXO DA PRODUÇÃO DO AÇO.....	26
FIGURA 3.1 - EXEMPLO DE CORTE UNIDIMENSIONAL.	28
FIGURA 3.2 - EXEMPLO DE CORTE BIDIMENSIONAL.....	28
FIGURA 3.3 - EXEMPLO DE CORTE TRIDIMENSIONAL.....	29
FIGURA 3.4 - OBJETOS DE ESTOQUE DE UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO.	31
FIGURA 3.5 - ITENS DEMANDADOS DE UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO.	31
FIGURA 3.6 - SOLUÇÕES DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO.	32
FIGURA 5.1 - INTERFACE DO MODELO.....	54
FIGURA 7.1 - PROCESSO COM ALTERAÇÃO DEVIDO À IMPLANTAÇÃO DO MODELO.	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - APLICAÇÃO DO AÇO.....	17
TABELA 2.2 - SISTEMA DE CODIFICAÇÃO SAE/AISI.....	18
TABELA 3.1 - TIPOLOGIA DE DYCKHOFF.....	29
TABELA 6.1 - CENÁRIO A – AÇO VND DE DIÂMETRO 25,4: FO, RETALHOS E OBJETOS.	60
TABELA 6.2 - CENÁRIO A – AÇO D6 DE DIÂMETRO 31,75: FO, RETALHOS E OBJETOS.....	61
TABELA 6.3 - CENÁRIO A – AÇO 8620 DE DIÂMETRO 25,4: FO, RETALHOS E OBJETOS.....	63
TABELA 6.4 - TOTAL DE OCORRÊNCIAS POR NÚMERO DE RETALHO PRODUZIDO NO CENÁRIO A.	64
TABELA 6.5 - TOTAL DE OCORRÊNCIAS POR NÚMERO DE OBJETOS UTILIZADOS NO CENÁRIO A.	65
TABELA 6.6 - TEMPO (EM SEGUNDOS) DE EXECUÇÃO DO MODELO PARA O CENÁRIO A.....	66
TABELA 6.7 - CENÁRIO B – AÇO VND DE DIÂMETRO 25,4: FO, RETALHOS E OBJETOS.	68
TABELA 6.8 - CENÁRIO B – AÇO D6 DE DIÂMETRO 31,75: FO, RETALHOS E OBJETOS.	70
TABELA 6.9 - CENÁRIO B – AÇO 8620 DE DIÂMETRO 25,4: FO, RETALHOS E OBJETOS.....	71
TABELA 6.10 - TEMPO (EM SEGUNDOS) DE EXECUÇÃO DO MODELO PARA O CENÁRIO B.	73
TABELA 6.11 - DADOS REAIS – AÇO VND DE DIÂMETRO 25,4: PERDA.	75
TABELA 6.12 - DADOS REAIS – AÇO D6 DE DIÂMETRO 31,75: PERDA.....	76
TABELA 6.13 - DADOS REAIS – AÇO 8620 DE DIÂMETRO 25,4: PERDA.....	77
TABELA 6.14 - REDUÇÃO DA PERDA COM O MODELO.....	78
TABELA 6.15 - RESULTADOS PARA OS 5 AÇOS PRINCIPAIS PARA A SEMANA 15.....	81
TABELA A.1 - ESTOQUE INICIAL DO AÇO VND DE DIÂMETRO 25,4.	97
TABELA A.2 - VENDAS DO AÇO VND DE DIÂMETRO 25,4.....	98
TABELA A.3 - ESTOQUE INICIAL DO AÇO D6 DE DIÂMETRO 31,75.	99
TABELA A.4 - VENDAS DO AÇO D6 DE DIÂMETRO 31,75.	99
TABELA A.5 - ESTOQUE INICIAL DO AÇO 8620 DE DIÂMETRO 25,4.	100
TABELA A.6 - VENDAS DO AÇO 8620 DE DIÂMETRO 25,4.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
B	Boro
Cont	Continuação
Cr	Cromo
CSP	<i>Cutting Stock Problem</i>
Eq	Equação
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FO	Função Objetivo
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Números naturais
Ni	Níquel
NP	<i>Non-deterministic Polynomial-time</i>
PIM	Programação Inteira Mista
OF	Ordem de Fabricação
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Sem	Semana
Si	Silício
UB	<i>Upper Bound</i>
V	Vanádio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS	15
2.1	ZBS CONSULTING	15
2.2	EMPRESA DE AÇO.....	16
2.2.1	<i>Produtos</i>	17
2.2.2	<i>Clientes</i>	21
2.2.3	<i>Oficina</i>	22
2.2.4	<i>Serviços extras</i>	24
2.2.5	<i>Fornecedores</i>	24
2.2.6	<i>A produção e o mercado de aço</i>	25
3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	27
3.1	OBJETIVO DO TRABALHO	27
3.2	PROBLEMA DE CORTE	28
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	33
4.1	PROBLEMA DA MOCHILA	33
4.2	MODELO DE KANTOROVICH	35
4.3	MODELO DE GILMORE E GOMORY	36
4.4	MODELO DE GRADISAR	38
4.5	MODELO DE GRADISAR ADAPTADO POR ABUABARA E MORABITO	44
5	MODELO DO PROBLEMA.....	49
5.1	ESCOLHA DO MODELO	49
5.2	MODELAGEM	50
5.3	SELEÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DE OTIMIZAÇÃO	52
5.4	IMPLEMENTAÇÃO	53

6	RESULTADOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES.....	55
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
6.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	56
6.3	ANÁLISE DO PERFIL DE VENDAS.....	57
6.4	CENÁRIOS.....	58
6.4.1	<i>Cenário A</i>	59
6.4.2	<i>Cenário B</i>	67
6.5	COMPARAÇÃO DO MODELO COM OS DADOS REAIS	73
6.6	EXPANSÃO.....	81
7	CONCLUSÃO.....	87
7.1	SÍNTESE	87
7.2	DESTAQUES E CRÍTICAS	88
7.3	DESDOBRAMENTOS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	95
	ANEXO A.....	97
	DADOS DE ENTRADAS DOS AÇOS SELECIONADOS PARA O MODELO	97

1 INTRODUÇÃO

As empresas, independentemente de seu porte, pequeno ou grande, vêm sofrendo pressões para se manterem no mercado com uma boa lucratividade e altas taxas de crescimento. Estas pressões são provenientes de todos os lados: de clientes que buscam serviços e produtos de qualidade com preço baixo e rápida entrega; de empresas que oferecem serviços ou produtos semelhantes; de empresas que oferecem serviços ou produtos substitutos; de novas empresas; de empresas de maior porte; de empresas de menor porte que aos poucos ganham força; dos fornecedores que também defendem seus interesses. Como saída para contornar este tipo de situação, as empresas buscam uma redução de custos e/ou a otimização de alguns de seus processos.

Um processo muito comum nas empresas, seja esta produtora de tecidos, madeira, aço, vidro ou qualquer outro material, é o processo de corte. Como os itens cortados não são exatamente da mesma medida que o objeto de estoque inteiro existirá uma sobra. Esta sobra pode ser um retalho (pedaço que pode ser reaproveitado futuramente) ou uma sucata (pedaço que não é suficiente para atender a dimensão de nenhum item demandado).

O problema no processo de corte se intensifica quando o volume de sucata, a perda, é significativo para a empresa. A maioria das empresas não tem uma demanda pré-definida e constante para que um planejamento seguro e exato seja feito. Assim, as sobras (retalhos e/ou sucatas) tendem a ser cada vez mais expressivas.

Apesar do problema de corte ser antigo, a implementação de soluções sofisticadas nem sempre são adotadas no dia-a-dia das empresas. É mais cômodo assumir as perdas e confiar na experiência do profissional do que fazer um estudo e aprofundar os métodos de pesquisa operacional. A implantação de algum modelo exige tempo e capacitação para adequação do problema teórico às condições reais da empresa, assim como investimentos em *software* e treinamentos, que muitas vezes impactam nas atividades operacionais.

Segundo Cherri (2006), um número crescente de pesquisadores tem investido em pesquisas de CSP (*Cutting Stock Problem*) nas últimas quatro décadas, gerando avanços

significativos em diversas áreas. A motivação dessas pesquisas pode ser explicada pela aparente simplicidade e grande aplicabilidade prática.

Este trabalho de formatura será desenvolvido na empresa distribuidora de aços especiais AçoX com objetivo de aplicar na prática a melhoria no processo de corte, aumentando a eficiência operacional e a redução dos custos. Esta pequena empresa compra diversos tipos de aço de uma grande usina e revende aos seus clientes de acordo com as especificações desejadas. As barras de aço, normalmente de perfil redondo ou retangular, são cortadas em máquinas e, em seguida, podem passar por algum acabamento pós corte. Depois de finalizados, os pedidos são entregues ou retirados na própria empresa pelo cliente.

Para minimizar as perdas dos cortes de aço da empresa AçoX serão aplicados neste trabalho métodos de otimização da pesquisa operacional. Primeiramente será feito um levantamento dos modelos matemáticos compatíveis com o problema encontrado na realidade da empresa AçoX. Posteriormente, será feita uma comparação dos resultados de um modelo escolhido com informações de dados já realizados pela empresa.

O trabalho está estruturado em sete capítulos. O primeiro capítulo é esta introdução sobre o trabalho. O capítulo dois contém uma breve descrição das empresas envolvidas. No terceiro capítulo é feita a definição do problema. No quarto, uma revisão da literatura desenvolvendo alguns modelos conhecidos do problema de corte é apresentada. A partir do quinto capítulo, serão utilizados os dados da empresa para a aplicação do modelo escolhido. Posteriormente, no capítulo seis, apresenta-se os resultados computacionais e análises com sugestões de melhorias. E por fim, no capítulo sete, conclui-se o trabalho.

2 DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS

Neste capítulo, serão apresentadas as empresas envolvidas no desenvolvimento do trabalho. Primeiramente será feita uma breve descrição sobre a empresa de consultoria, na qual o estágio supervisionado da autora foi realizado. Apesar de ser uma empresa de consultoria, sua maior atuação é como uma prestadora de serviços, pois seus projetos, além de terem uma duração de longo prazo, também incluem a implementação e manutenção da solução. Em seguida, será feita a descrição sobre a empresa AçoX, onde de fato o trabalho será desenvolvido e aplicado.

2.1 *ZBS Consulting*

A ZBS é uma pequena empresa de consultoria, fundada em 1999 por Hilton de Brito Filho. Sua idéia não era competir com as grandes empresas de consultoria, e sim, preencher as lacunas deixadas por elas na área de planejamento estratégico.

O objetivo da ZBS é ajudar seus clientes a melhorarem a eficiência operacional, utilizando soluções, que disponibilizem informações e análises de resultados para a tomada de decisão de planejamento de vendas, compras, abastecimento e estoques em toda a sua cadeia produtiva.

Atualmente a empresa está envolvida em dois grandes projetos, além de outros pequenos projetos. O primeiro é com uma grande operadora de telefonia celular. E o segundo, com uma empresa que comercializa aço.

Na empresa de telefonia, a ZBS desenvolveu um projeto de planejamento colaborativo entre os dois maiores fornecedores, a própria empresa de telefonia e as principais redes de varejo. Uma ferramenta foi criada para auxiliar no planejamento de demanda e no abastecimento de todas as lojas das redes nacionais e algumas regionais. Além disso, a ZBS disponibiliza via web os principais dados e indicadores de desempenho da área de planejamento e vendas.

Na empresa de aço, a ZBS começou a desenvolver um projeto semelhante ao da empresa de telefonia, entretanto, a fase de diagnóstico ainda está em andamento. Será desenvolvido um aplicativo para controlar a evolução das vendas, o nível do estoque, os clientes inativos e as futuras compras. O planejamento estruturado auxiliará na correção de lacunas existentes em toda a empresa. Inicialmente serão desenvolvidos planos de melhoria de curto e médio prazo para a empresa na área de gestão do estoque, marketing e gestão de processos. Este trabalho contribuirá para um plano de ação na gestão de processos, pois reduzirá a perda do corte e minimizará o número de retalhos. Outros planos de melhoria serão desenvolvidos ao longo do projeto entre a ZBS e a AçoX.

Com o auxílio do planejamento e o suporte da ferramenta, é possível melhorar a eficiência operacional da empresa, fortalecendo seus pontos fracos, proporcionando assim, um aumento na participação da categoria, no giro de estoque, no nível de serviço e, principalmente, nos lucros da empresa. O objetivo principal do projeto é fazer uma redução no estoque juntamente com o aumento das vendas.

2.2 Empresa de aço

A empresa AçoX foi criada em 1982 com capital fechado e seu principal negócio é vender o aço cortado de acordo com a solicitação do cliente. Dependendo do pedido, o aço passa por algum processo de usinagem, como por exemplo, fresamento ou torneamento, os quais definem as formas finais e a qualidade superficial do aço. Além de aço, alguns produtos secundários, tais como colas e plástico, também são vendidos.

A AçoX possui aproximadamente 50 funcionários: auxiliares administrativos, faxineiras, operários, vendedores, administradores. Todos trabalham em um único turno de oito horas cinco dias por semana.

Situada em São Paulo, a empresa funciona em um grande galpão que é separado em três partes: uma para armazenagem dos aços, outras duas com as máquinas de corte. No andar superior desse galpão, trabalham os vendedores, auxiliares administrativos e administradores.

Apesar de pequena, a AçoX é considerada uma das empresas mais significativas do segmento, uma vez que este mercado é pulverizado, possuindo inúmeras pequenas empresas.

Por exigência de um dos sócios da empresa, o nome da empresa e alguns de seus números serão alterados para a publicação deste trabalho.

2.2.1 Produtos

Os aços são ligas metálicas de ferro, carbono e outros componentes. A porcentagem de carbono varia entre 0,005% e 2,0%. Atualmente existem mais de 2.500 tipos de aço em todo mundo de diferentes composições químicas e tratamentos térmicos. A AçoX vende em torno de 75 tipos de aço.

O aço está presente desde o dia-a-dia doméstico até em grandes obras de infra-estruturas de energia ou construção civil. Ele pode ser o material principal do produto ou pode ser apenas um componente, juntamente com outros tipos de materiais. Na Tabela 2.1 seguem algumas aplicações do uso do aço.

Tabela 2.1 - Aplicação do aço.

Aplicação	Exemplos
Utilidade doméstica	Eletrodomésticos: panelas, tesouras, talhes, bandejas e outros.
Veículos	Autopeças, carros, ônibus e outros.
Construção civil	Fundações, concreto protendido, estruturas metálicas e outros.
Embalagens e recipientes	Latas de alimentos, tubos compressores, tampas de garrafas e outros.
Infra-estrutura	Torres de eletricidade, gasoduto, plataformas de petróleo e outros.
Ferramentas para a agricultura	Silos, arados e outros
Bens de capital	Fornos, tratores e outras máquinas.

Adaptado de Instituto Brasileiro de Siderurgia (2008).

Os aços são classificados pelos seguintes critérios: quantidade de carbono, composição química, constituição micro estrutural e aplicação.

A nomenclatura dos aços é uma identificação específica que permite a classificação dos aços através de uma combinação adequada de letras e números. Segundo o sistema de codificação

SAE/AISI (Diferro, 2008), a identificação do aço é feita por quatro dígitos diferentes (*ABXX*), sendo que os dois primeiros dígitos (*AB*) indicam os elementos de liga e os dois últimos dígitos (*XX*) indicam a quantidade em peso de carbono em centésimos de por cento. A Tabela 2.2 contém os principais componentes do aço definidos pelo *AB*. Essa não é a única classificação existente, porém as demais classificações não serão aqui detalhadas.

Tabela 2.2 - Sistema de codificação SAE/AISI.

Designação o SAE	Designação o AISI	Principal componente do aço
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5 % de Ni e 1,55 Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços Níquel cromo com molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços Níquel Cromo Molibdênio com 1,05%de Ni, 0,45% de Cr e 0,20 de Mo
48XX	48XX	Aços Níquel Molibdênio com 3,5 % de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de V
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
92XX	92XX	Aço silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços silício manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni, 0,80 de Cr e 0,25% de Mo

Fonte: Diferro (2008).

Desta forma, de acordo com a nomenclatura acima descrita, o aço 1045 é um aço carbono comum, pois os dois primeiros dígitos formam o número 10, contendo 0,45% em peso de carbono, pois os dois últimos dígitos formam 45.

Além da nomenclatura do aço, existe outra classificação mais abrangente que agrupa os aços. Algumas delas são:

- Aço carbono: não possui uma quantidade mínima especificada ou exigida de cromo, cobalto, nióbio, molibdênio, níquel, titânio, tungstênio, vanádio ou zircônio, ou de qualquer outro elemento que seja adicionado ao aço para a obtenção de um efeito desejado como elementos de liga. Para ser um aço carbono, a quantidade mínima especificada de cobre não deve exceder 0,4%, a quantidade máxima especificada de manganês deve ser 1,65%, a quantidade máxima especificada de silício deve ser 0,6%, a quantidade máxima especificada de cobre deve ser 0,6% e a quantidade máxima especificada de carbono deve ser 1%. (ASM, 1990)
- Aço ferramenta: são usados para fazer ferramentas utilizadas em matrizes, moldes, ferramentas de corte intermitente e contínuo, ferramentas de conformação de chapas, corte a frio e outros. Estes aços contêm uma quantidade relativamente grande de tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo, os quais conferem ao aço alta dureza, alta resistência ao desgaste e alta resistência a deformação, mesmo em aplicações em que estes aços sejam submetidos a altas temperaturas. (ASM, 1990)
- Aço ligado: contêm manganês, silício ou cobre em condições maiores do que aquelas listadas para aços carbono ou que possuem faixas especificadas ou quantidades mínimas especificadas para um ou mais elementos de liga. No sistema de nomenclatura SAE/AISI, o principal elemento de liga em um aço é indicado pelos dois primeiros dígitos da nomenclatura. A quantidade de elementos de liga varia de 1 a 50% em peso e estes são adicionados para que as propriedades dos aços como, por exemplo, resistência mecânica e resistência a corrosão, sejam melhoradas. (ASM, 1990)

O aço pode ser conformado em diferentes formatos, porém a AçoX trabalha apenas com barras de aço. As barras podem ter diferentes formatos da seção transversal. Os mais usuais são redondos e retangulares, mas também existe perfil quadrado, sextavado, anelar, viga I, viga U e perfil T, como pode ser visto na Figura 2.1.

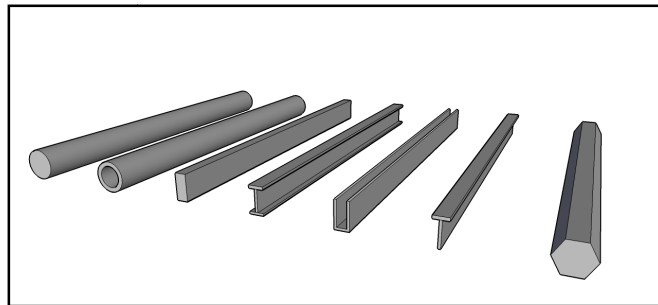


Figura 2.1 - Perfil das barras.

A dimensão da seção de corte é o diâmetro no caso de barras redondas e, a largura e a altura, no caso de barras retangulares, como podem ser observados na Figura 2.2.

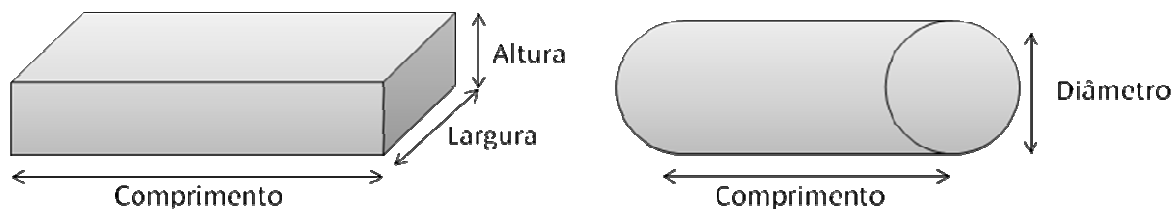


Figura 2.2 - Dimensões da seção de corte de uma barra.

No sistema computacional da empresa as dimensões são registradas como bitola 1 e bitola 2. No caso de barras redondas, a bitola 2 é nula, considerando apenas o valor do diâmetro na bitola 1. Para os outros tipos de perfil, são definidas também uma ou duas dimensões, dependendo da sua forma. Por exemplo, uma barra anelar tem como dimensão o diâmetro interno e o externo.

Para definir o produto desejado, o cliente precisa especificar qual o tipo de aço, o perfil da seção transversal e a dimensão da seção transversal (uma ou duas dimensões). A partir disso, ele quantifica o número de peças e o comprimento das mesmas. Caso deseje algum serviço complementar, outros parâmetros são solicitados. A Figura 2.3 retrata alguns produtos acabados.



Figura 2.3 - Aço pós corte.

2.2.2 Clientes

A AçoX possui uma carteira de 500 clientes ativos de três principais setores, automobilístico, construção civil e empresas que fabricam ferramentas e máquinas.

Os clientes ainda não têm a opção de fazer a compra pela internet, apenas por telefone ou presencialmente com a equipe de vendedores. O limite mínimo de compra por cliente é atualmente o valor de quatrocentos reais.

Foi realizado um estudo na empresa que comprovou que os clientes apresentam uma alta frequência de compra. Entre os clientes que totalizaram 40% do faturamento em 2007 (51 maiores clientes), a periodicidade média de compra é de 8,6, ou seja, a cada 8,6 dias corridos eles realizam uma compra na AçoX. Esse número justifica o grande número de pedidos por semana e viabiliza a aplicação do estudo na empresa. Uma vez que não faria sentido buscar uma otimização do processo de corte se a demanda fosse escassa por tipo de produto (tipo de aço, perfil, dimensões da seção transversal de corte).

O cliente faz seu pedido de compra para os vendedores. As especificações desejadas pelo cliente, tais como tipo de aço, perfil, dimensão da seção transversal, comprimento, quantidade de peças, condição de pagamento, modo de entrega, data de retirada, são registradas pelos vendedores no sistema de informação da empresa. Este sistema atualmente é uma base de dados

estruturada na linguagem *Clipper*, mas a implementação de um ERP já começou a ser realizada na empresa.

2.2.3 Oficina

A empresa possui dois grupos de máquinas, as que cortam aços pequenos e mais leves (15 máquinas em funcionamento), e as que cortam aços grandes e pesados (9 máquinas em funcionamento). A Figura 2.4 ilustra algumas máquinas de corte de aços pequenos. Entre as máquinas, no chão, estão as sobras que não voltam para o estoque, mas podem ser reaproveitados em outros pedidos. Estas sobras são denominadas retalhos do processo de corte e também são registradas no sistema de informação.



Figura 2.4 - Galpão de máquinas para aços leves da empresa AçoX.

Os vendedores passam uma cópia impressa do pedido de cada cliente para a oficina. O chefe da oficina recebe as ordens de compra e as distribui de acordo com o tipo de máquina que deverá ser utilizada, podendo ser do grupo das máquinas pequenas ou das grandes.

Após a seleção da máquina, o chefe da oficina seleciona a matéria-prima (objeto do estoque a ser utilizado). Dependendo da quantidade e do tamanho requisitado, ele tem a opção de

utilizar algum retalho de outro pedido. Caso contrário, ele seleciona o material do estoque de produtos brutos (objetos inteiros).

Fotos do estoque são ilustradas na Figura 2.5 e na Figura 2.6. As cores na extremidade das barras indicam o tipo e origem do aço.

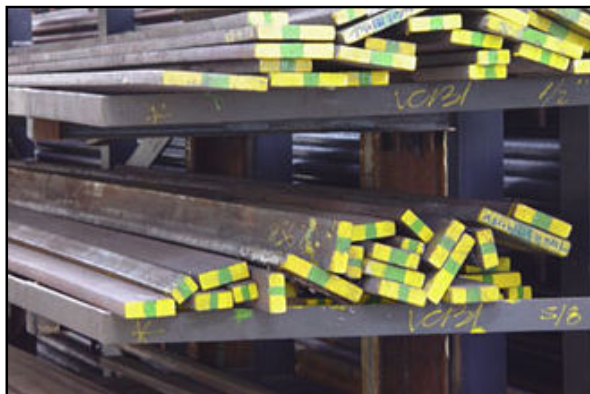


Figura 2.5 - Estoque de um aço de perfil retangular.



Figura 2.6 - Estoque de aços de perfil redondo.

Definido o tipo de aço e o item a ser cortado, os operários da oficina fazem a preparação da máquina para o corte. Depois que todo o pedido do cliente está pronto, o certificado de garantia e nota fiscal são emitidos pelo vendedor que realizou a compra. O cliente tem a opção de receber ou retirar a mercadoria. Para a entrega, a AçoX dispõe de três caminhões.

2.2.4 Serviços extras

Além do corte, a AçoX oferece também outros serviços, entre eles, usinagem de anéis, tratamento térmico ou fresamento.

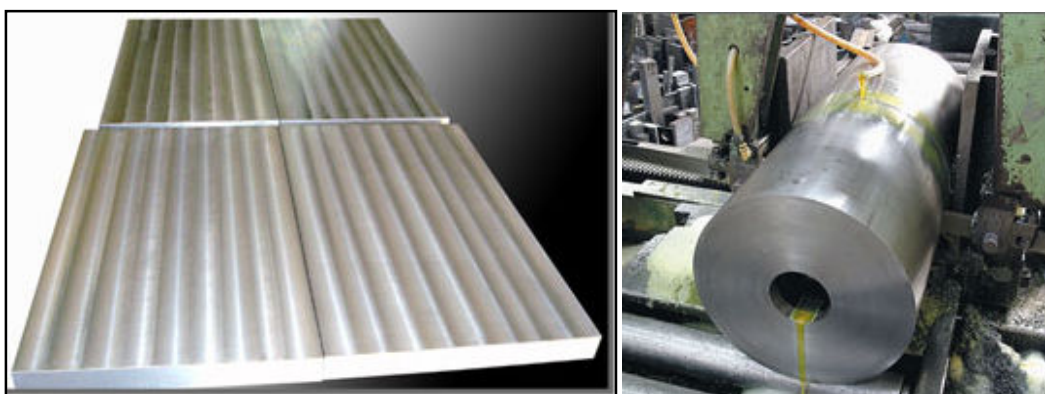


Figura 2.7 - Barra de aço fresado e barra de aço sendo usinada como anel.

Todos esses serviços são realizados após o corte em empresas terceirizadas. Os caminhões de entrega também servem para transportar o aço que receberá algum desses serviços.

2.2.5 Fornecedores

O principal fornecedor de aço ferramenta para a AçoX é Villares Metal e de aço para construção mecânica é Aço Villares. Ambas pertencem ao grupo Aço Villares Sidenor.

A AçoX também compra aço carbono da empresa Aço Minas e um pequeno volume de outros tipos de aço do grupo Gerdau. Outros materiais de suporte para seus clientes são comprados de pequenos fornecedores.

A Villares Sidenor tem um alto poder de barganha sobre a AçoX, mas garante confiabilidade na qualidade do produto e no prazo de entrega. O tempo de entrega do fornecedor é de um mês para os aços ligado e três meses para os demais.

Todos os aços saem do fornecedor Villares com um código de controle da qualidade, um número se mantém até chegar ao cliente. Mesmo quando o cliente compra um aço proveniente de um retalho ele recebe o certificado de garantia com o código do fornecedor.

Todo final de ano, normalmente em novembro, a AçoX entrega para a Villares Sidenor uma programação de compra para o ano seguinte de seus principais tipos de aço. Alguns pedidos de compra podem ser cancelados, antecipados ou adiados, entretanto a negociação depende exclusivamente do fornecedor. Com isso, as perspectivas do mercado tornam-se importantes para o planejamento e programação da empresa.

Para tentar garantir um bom nível de serviço satisfazendo a demanda do cliente, a empresa AçoX mantém uma grande variedade e volume de estoque.

2.2.6 A produção e o mercado de aço

O aço é produzido em grandes siderúrgicas. O fluxo da produção simplificado em oito etapas é mostrado na Figura 2.8.

Depois de produzido nas grandes siderúrgicas, o aço é vendido para as pequenas e médias empresas revendedoras, como a AçoX. Estas cortam, fazem algum acabamento, e por fim, o aço chega aos clientes. Muitos clientes são pequenas empresas que fornecem para grandes empresas. Quando as grandes empresas precisam comprar aço, normalmente adquirem diretamente das siderúrgicas.

Segundo o IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2008), o mercado de aço no Brasil está passando por um período de crescimento. As vendas internas de produtos acabados e semi-acabados de aço atingiram em 2007 um aumento superior a 18% em relação ao ano anterior e a perspectiva é que este mercado continue em expansão devido ao desenvolvimento crescente do setor automotivo e de construção civil. As empresas siderúrgicas mostraram-se dimensionadas para atender essa elevação da demanda interna.



Adaptado de INFOMET (2008).

Figura 2.8 - Fluxo da produção do aço.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo será apresentado o objetivo deste trabalho e a definição do problema a ser abordado e solucionado na empresa AçoX. Este capítulo é de fundamental importância, pois é a partir dele que todo o trabalho será desenvolvido.

3.1 *Objetivo do trabalho*

A empresa AçoX apresentada no capítulo 2 (seção 2.2) não possui um método objetivo para fazer a escolha do item de estoque a ser utilizado para o corte. São os chefes da oficina quem escolhem e autorizam o objeto do estoque a ser retirado e trabalhado. Eles têm completa autonomia na escolha, e se utilizam da própria experiência para fazer tal escolha.

O objetivo deste trabalho é aplicar um método de programação e otimização para o corte das barras de aço inteiras e/ou retalhos em peças menores de acordo com as especificações dos clientes, visando minimizar assim as perdas resultantes do processo de corte.

A AçoX registrou no início de 2008 uma perda total de 40,5 toneladas de aço referente a todo o ano anterior. Considerando o preço médio de compra do aço (R\$ 8,00 por quilograma), a perda da empresa em 2007 foi superior a 320 mil reais.

As vantagens para a empresa são: cálculos são feitos computacionalmente em pouco tempo, desperdício de material minimizado, redução nos custos de estoque devido a melhor gestão e aproveitamento das barras disponíveis, aumento de competitividade, uma vez que os concorrentes também são pequenas empresas sem grandes estruturas.

3.2 Problema de corte

O problema de corte, em inglês conhecido como *cutting stock problem* (CSP), é comum em empresas que cortam tecido, vidro, madeira, aço, papel ou qualquer outro material. Uma peça de tamanho maior, disponível no estoque, será cortada em peças menores. A peça do estoque será chamada por objeto e as peças menores que representam a demanda por item demandado ou apenas item.

A abordagem do CSP é diferente dependendo da dimensionalidade do problema. O CSP pode ser unidimensional, ou seja, o corte será feito em apenas uma direção. O parâmetro de corte é apenas o comprimento, pois a seção transversal é pré-determinada e fixa. Um exemplo de corte unidimensional é o corte de barras, como no exemplo da Figura 3.1.

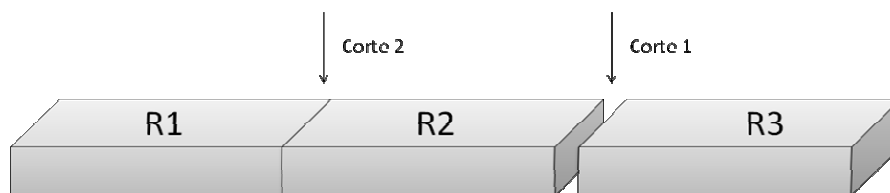


Figura 3.1 - Exemplo de corte unidimensional.

Quando o CSP é bidimensional, uma área retangular é subdividida em larguras e alturas diferentes. Um exemplo é o corte de tecido ou placas de vidro. A Figura 3.2 é um exemplo de uma placa cortada em seis regiões de diferentes tamanhos. As setas simbolizam o sentido e seqüência do corte.

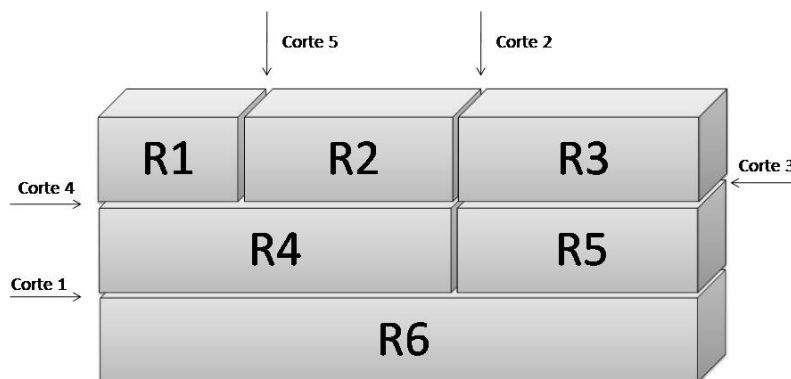


Figura 3.2 - Exemplo de corte bidimensional.

O CSP bidimensional pode ser tratado inicialmente como unidimensional, se o primeiro corte a ser feito considera apenas o comprimento. Posteriormente, serão feitos os cortes internos, altura e largura.

No CSP tridimensional todas as dimensões, comprimento, altura e largura, são levadas em consideração. Um problema típico tridimensional é o carregamento de um contêiner com caixas de diferentes tamanhos, como pode ser visto na Figura 3.3.

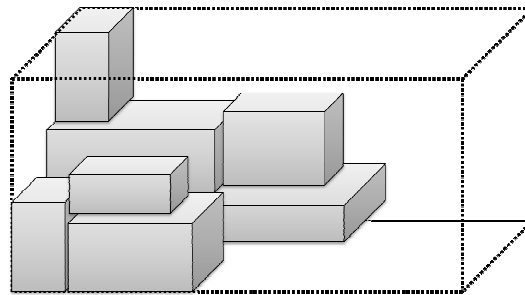


Figura 3.3 - Exemplo de corte tridimensional.

Uma classificação do CSP muito conhecida foi proposta por Dyckhoff em 1990. Ele separou os problemas de corte e carregamento em quatro critérios: dimensionalidade, tipo de alocação, sortimento dos objetos e dos itens (Dyckhoff, 1990).

Tabela 3.1 - Tipologia de Dyckhoff.

Critério	Classificações
1. Dimensionalidade	(1) unidimensional
	(2) bidimensional
	(3) tridimensional
	(n) n -dimensional com $n > 3$
2. Tipo de alocação	(B) todos os objetos e uma parte dos itens
	(V) uma parte dos objetos e todos os itens
3. Sortimento dos objetos	(O) um objeto
	(I) objetos idênticos
	(D) objetos diferentes
4. Sortimento dos itens	(F) poucos itens de tamanhos diferentes
	(M) muitos itens de muitos tamanhos diferentes
	(R) muitos itens com relativamente poucos tamanhos diferentes
	(C) tamanhos iguais

Fonte: (Dyckhoff, 1990).

Por exemplo, a determinação de como será cortado grandes pedaços de mesma medida de tecido em vários pedaços menores de diferentes alturas e larguras é um problema de corte bidimensional, em que será alocado uma parte dos objetos e todos os itens (ou seja, toda a demanda será atendida por uma parte dos objetos de estoque), com objetos idênticos no estoque e muitos itens de muitos tamanhos diferentes demandados é classificado pela quádrupla: 2/V/I/M. Apesar da limitação por outros critérios, a tipologia de Dyckhoff apresenta de imediato as principais características de um CSP.

Em um CSP dificilmente a alocação das peças menores coincide inteiramente com os objetos do estoque. Decorrente desde fato, surgem as sobras, material do objeto de estoque com dimensões que não permitem sua reutilização. A questão principal do CSP é como alocar os diferentes itens demandados para que o volume da sobra não seja grande.

Uma consideração importante a ser feita no problema é se haverá diferente classificação para a sobra: retalho e perda. Defini-se perda o pedaço que não tem medida suficiente para se tornar um item demandado futuramente; e retalho, o pedaço que poderá ser reaproveitado futuramente. É necessário estabelecer um tamanho mínimo limitante entre o que será perda ou o que será retalho.

Para melhor visualização do problema de corte unidimensional, segue abaixo um exemplo simplificado citado por Cherri (2006).

No estoque, representado na Figura 3.4, existem três barras (L_1 , L_2 , L_3), uma de 12 metros de comprimento e duas de 15 metros. A demanda, representada na Figura 3.5, é composta por três barras de 4 metros (l_1) e duas barras de 5 metros (l_2). Serão considerados retalho os tamanhos restantes iguais ou superiores ao menor tamanho de um item demandado. No caso, qualquer sobra maior ou igual a 4 metros é um retalho. O que tiver medida inferior será considerado como perda.

Pela classificação de Dyckhoff, esse exemplo é 1/V/D/F, ou seja, problema de corte unidimensional com alocação de uma parte dos objetos e todos os itens, objetos de estoque diversificados e demanda de poucos itens de diferentes tamanhos.

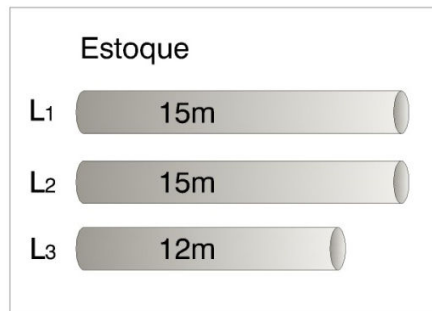


Figura 3.4 - Objetos de estoque de um exemplo de aplicação.

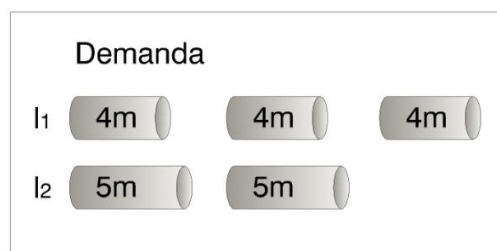


Figura 3.5 - Itens demandados de um exemplo de aplicação.

Dentre as várias soluções possíveis, serão apresentadas apenas três (mostradas na Figura 3.6):

- Solução 1: corte de um item demandado de 4 metros e um de 5 metros na barra de estoque de 12 metros, resultando em uma perda de 3 metros. Corte de outro item de 5 metros e dois de 4 metros na barra de estoque de 15 metros, resultando em uma perda de 2 metros. A outra barra do estoque não será utilizada.
- Solução 2: corte de 3 itens demandados de 4 metros na barra de estoque de 12 metros. Corte de dois itens demandados de 5 metros em uma barra de 15 metros, resultando em um retalho de 5 metros. A outra barra do estoque não será utilizada.
- Solução 3: corte de 3 itens demandados de 4 metros na barra de estoque de 12 metros. Corte de um item demandado de 5 metros em cada uma das barras de 15 metros, resultando em um retalho de 10 metros em cada.



Figura 3.6 - Soluções do exemplo de aplicação.

A solução 1 é considerada indesejável, pois apresentou uma perda total de 5 metros, equivalente a 18,5% de todo o material utilizado. A solução 3 é aceitável, pois não teve perda, mas utilizou todas as barras do estoque. A solução 2 é ideal, pois, além de não ter perda, utilizou um menor número de objetos, preservando assim uma barra inteira do estoque.

No exemplo de aplicação apresentado foi fácil visualizar as possíveis soluções e assim, escolher pela melhor. Entretanto, a realidade das empresas acaba sendo mais complexa com maior número de pedidos demandados e também maior variedade do estoque. Para solucionar problemas mais complexos com diversas variáveis existem diversos modelos matemáticos. No capítulo a seguir serão apresentados alguns desses modelos.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica. Primeiramente será apresentado o problema de mochila, um problema de formulação similar ao problema de corte. Posteriormente serão apresentados as formulações do problema de corte unidimensional: modelo de Kantorovich (Kantorovich 1939 apud Arenales *et al.*, 2007), de Gilmore e Gomory (Gilmore; Gomory, 1961, 1963 apud Arenales *et al.*, 2007) e de Gradisar (Gradisar *et al.*, 1997). Por fim, será apresentada a adaptação do modelo de Gradisar feita por Abuabara e Morabito (2007).

4.1 *Problema da Mochila*

O problema da mochila consiste na decisão de quais objetos que serão colocados em uma mochila. Poderá haver limitação de peso e/ou volume. O problema poderá envolver uma ou mais mochilas. Esse problema é associado a situações de carregamento de contêineres ou caminhões.

O problema de empacotamento em mochilas, conhecido como *bin packing*, é uma variação do problema da mochila. Neste caso, o número de mochilas não é informado e o problema se resume em determinar e minimizar o número total de mochilas a serem utilizadas para carregar os objetos desejados.

As formulações do problema de corte unidimensional e de empacotamento em mochilas são similares, pois ambas otimizam a alocação de itens menores em um item maior, seja de um objeto dentro de uma mochila ou um pedaço de aço em uma barra.

Segue abaixo uma formulação do problema de empacotamento em mochila mostrada em Arenales *et al.* (2007), na qual é considerado o uso de múltiplas mochilas idênticas.

Índices:

$i = 1, \dots, n$ mochila
 $j = 1, \dots, n$ objeto a ser carregado

Parâmetros:

b capacidade da mochila
 w_j peso do objeto $j, j = 1, \dots, n$
 n número máximo de mochilas e número de objetos a serem carregados

Variáveis:

x_{ij} variável binária igual a 1 se o objeto j for carregado na mochila i , e zero caso contrário
 y_i variável binária igual a 1 se a mochila i for usada, e zero caso contrário

Função Objetivo:

- $FO = \min \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$

A função objetivo minimiza o número de mochilas a serem usadas.

Restrições:

- $\sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij} \leq b_i \cdot y_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$

- $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$

O primeiro conjunto de restrições impõe que a capacidade máxima da mochila deve ser respeitada. O segundo conjunto certifica que se um item já está em uma mochila, ele não pode estar em outra.

Domínio das variáveis:

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall ij; y_i \in \{0,1\}, \forall i$$

O problema da mochila, inclusive no caso de múltiplas mochilas, é classificado como NP-difícil (Ozden, 1988). Por semelhança entre o problema da mochila e o problema de corte unidimensional, pode-se dizer que o CSP unidimensional também é NP-difícil. Apesar de ser NP-difícil, dependendo do número de variáveis, o problema pode ser resolvido através de métodos exatos. Caso contrário, é recomendado o uso de heurísticas, algoritmos que encontram uma solução próxima da ótima em um tempo menor de execução.

4.2 Modelo de Kantorovich

A primeira formulação do problema de corte é atribuída a Kantorovich (Kantorovich 1939 apud Arenales *et al.*, 2007) e não apresenta nenhuma sofisticação. Respeita-se o atendimento da demanda e o comprimento máximo das barras de estoque, minimizando o número de barras utilizadas. Descreve-se a seguir a formulação matemática de Kantorovich mostrada em Arenales *et al* (2007).

Índices:

- $i = 1, \dots, n$ barras inteiras
 $j = 1, \dots, m$ itens a serem cortados

Parâmetros:

- L comprimento único das n barras inteiras disponíveis em estoque
 l_j comprimento do item j a ser cortado
 d_j quantidade demandada do item j

Variáveis:

- y_i variável binária igual a 1 se barra i for usada, e zero caso contrário
 x_{ij} número de vezes que o item j será cortado na barra i

Função Objetivo:

- $FO = \min \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$

A função objetivo minimiza o número de barras usadas. Conseqüentemente, as sobras também estarão sendo minimizadas.

Restrições:

- $\sum_{j=1}^m l_j \cdot x_{ij} \leq L \cdot y_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$
- $\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq d_j \quad j = 1, \dots, m \quad (6)$

O primeiro conjunto de restrições garante que as barras têm comprimento máximo (definido pela variável L). O segundo conjunto garante que toda demanda deve ser atendida.

Domínio das variáveis:

$$x_{ij} \in \mathbb{N}, \forall ij; y_i \in \{0,1\}, \forall i$$

Algumas suposições terão que ser satisfeitas. Entre elas: o estoque (representado pelas n barras) deve ser suficiente para atender a demanda; a ordem de execução do corte não tem importância, ou seja, nenhum item demandado tem prioridade sobre os demais e não existirá distinção entre perda e retalho.

4.3 Modelo de Gilmore e Gomory

Uma alternativa de modelagem para o problema de corte unidimensional, muito citada em artigos da literatura, foi proposta por Gilmore e Gomory (Gilmore; Gomory, 1961, 1963 apud Arenales *et al.*, 2007). A formulação é descrita em seguida.

Índices:

$i = 1, \dots, m$ comprimento no padrão de corte

$j = 1, \dots, n$ padrão de corte (solução inteira que satisfaz o tamanho máximo da barra)

Parâmetros:

$a_j = (a_{1j}, \dots, a_{mj})$ padrão de corte, onde a_{ij} é o número de barras do comprimento i no padrão j

b vetor de demanda

n número de todos os possíveis padrões de corte

Variáveis:

x_j total de barras cortadas no padrão j

Função Objetivo:

$$\bullet \quad FO = \min \sum_{j=1}^n x_j \quad (7)$$

A função objetivo é a minimização das barras cortadas.

Restrições:

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j = b_i \quad (8)$$

O único conjunto de restrições é o atendimento de toda a demanda.

Domínio das variáveis:

$$x_j \in \mathbb{N}, \forall j$$

A dificuldade desta formulação é encontrar todos os possíveis padrões de corte. Dependendo da dimensão do problema real, essa formulação torna-se inviável.

4.4 Modelo de Gradisar

Gradisar *et al.* (1997) modelaram um problema de corte de tecido. Rolos de tecido deveriam ser cortados unidimensionalmente em tamanhos menores para serem repassados às costureiras. Elas então, seriam responsáveis por cortes bidimensionais e pela montagem das peças de roupas. Toda a demanda deveria ser atendida e as sobras poderiam ser armazenadas para futuras utilizações.

O modelo proposto por Gradisar *et al.* (1997) é muito similar aos demais apresentados, porém, faz uma consideração até então não ponderada: nem tudo é perda. A sobra pode ser classificada em perda ou retalho. O retalho pode ser utilizado futuramente por outro pedido, a perda não.

A formulação proposta para a otimização do corte de tecido por Gradisar *et al.* (1997) é dada a seguir.

Índices:

$i = 1, \dots, m$ tipo de item demandado

$j = 1, \dots, n$ objetos do estoque

Parâmetros:

b_i número de peças demandadas de que são determinadas pelo comprimento i

d_j comprimento do rolo j

m número de rolos

M número máximo de comprimentos cortados por rolo

n número de pedidos de comprimentos diferentes

s_i comprimento dos pedidos i

UB do inglês, *upper bound*, número que limita o que será perda

Y limite de comprimentos cortados por rolo

Variáveis:

- Δ_i valor da falta do estoque para satisfazer a demanda, caso exista necessidade
- δ_j valor da sobra do objeto j
- t_j valor da perda do objeto j
- x_{ij} número de peças do pedido de comprimento i que será cortado do rolo j
- y_{ij} variável binária que indica se o pedido de comprimento i será cortado na barra j (igual a um) ou não (igual a zero)
- z_j variável binária que indica se o objeto j será utilizado (igual a um) ou não (igual a zero)

Função Objetivo:

- $FO_1 = \min \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (9)$

- $FO_2 = \min \sum_{j=1}^m t_j \quad (10)$

Se o estoque não for suficiente para atender os itens pedidos, a variável Δ_i representará essa falta. A função objetivo 1 tem o papel de minimizar a soma de todos os deltas para que a maior parte dos pedidos sejam atendidos.

A variável t_j representa o comprimento da perda caso ela exista, ou seja, caso o objeto de estoque seja utilizado e o restante do objeto seja menor do que N , parâmetro limitante entre perda e retalho. Caso o objeto do estoque não seja utilizado ou, se for utilizado, seu comprimento restante for maior do que N , t_j será nula, o que quer dizer, o corte do objeto j não implicará em perda. A FO_2 é a minimização da soma da perda t_j .

Restrições:

- $\sum_{i=1}^n s_i \cdot x_{ij} + \delta_j = d_j \quad \forall j \quad (11)$

- $\sum_{j=1}^m x_{ij} = b_i - \Delta_i \quad \forall i \quad (12)$

$$\bullet \quad \sum_{i=1}^n y_{ij} \leq Y \leq M \quad \forall j \quad (13)$$

$$\bullet \quad z_j = \begin{cases} 0, & \text{se } x_{ij} = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \forall i \quad (14)$$

$$\bullet \quad y_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } x_{ij} = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

$$\bullet \quad t_j = \begin{cases} \delta_j, & \text{se } z_j = 1 \wedge \delta_j \leq UB \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

O primeiro conjunto de restrições eq. (11) garante que o comprimento dos rolos do estoque não seja ultrapassado, ou seja, a soma dos pedidos cortados juntamente com a perda deve ser o comprimento total do rolo. O segundo conjunto, eq. (12), garante a totalidade da demanda, mesmo com a eventual falta representada pela variável delta. A eq. (13) limita o valor máximo de diferentes comprimentos de pedidos cortados por rolo. Através da eq. (14), a variável binária z_j indicará se o rolo j é usado no plano de corte. Através da eq. (15), variável binária y_{ij} indicará se o pedido de comprimento i é cortado do rolo j . A variável t_j indicará o comprimento da perda do rolo j , através da eq. (16).

Domínio das variáveis:

$$x_{ij} \in \mathbb{N}, \forall ij; \delta_j \in \mathbb{N}, \forall j; t_j \in \mathbb{N}, \forall j; \Delta_i \in \mathbb{N}, \forall i; y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j; z_j \in \{0,1\}, \forall j$$

Nem toda a formulação proposta por Gradisar *et al.* (1997) é descrita em termos de funções lineares. A seguir será apresentada a formulação e a transformação para funções lineares quando necessário. As transformações foram sugeridas e explicadas em Abuabara (2006) baseadas nos conceitos propostos por Williams (2005).

Índices:

$i = 1, \dots, m$ tipo de item demandado

$j = 1, \dots, n$ objetos do estoque

Parâmetros:

b_j	comprimento dos objetos do estoque
d_i	demanda do item i
l_i	comprimento desejado do item i
M	parâmetro auxiliar
N	comprimento mínimo para ser considerado como retalho
R	número máximo de retalhos
ε	parâmetro auxiliar

Variáveis:

z_j	variável binária que indica se o objeto j será utilizado (igual a um) ou não (igual a zero)
δ_j	valor da perda do objeto j
t_j	valor da sobra do objeto j
u_j	variável binária que indica se o objeto j tem retalho (igual a um) ou não (igual a zero)
w_j	variável binária que indica se o resto será uma perda (igual a um, pois $\delta_j < N$) ou um retalho (igual a zero, caso contrário)
y_j	variável binária que indica se o resto será uma perda (igual a zero, pois $\delta_j < N$) ou um retalho (igual a um, caso contrário)
Δ_i	valor da falta do estoque para satisfazer a demanda, caso exista necessidade
x_{ij}	quantidade do item i alocado no objeto j

Função Objetivo:

- $FO_1 = \min \sum_{j=1}^n t_j \quad (17)$

- $FO_2 = \min \sum_{i=1}^m \Delta_i \quad (18)$

A função objetivo pode ser definida pela combinação de dois membros. O primeiro minimiza a perda total do processo de corte através da variável t_j . O segundo minimiza a falta de objetos do estoque.

A variável Δ_i pode ser desconsiderada se o estoque for suficientemente grande para atender a demanda. Portanto, a FO_2 também poderá ser desconsiderada.

Restrições:

$$\bullet \quad \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} + \delta_j = b_j \quad \forall j \quad (19)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} + \Delta_i = d_i \quad \forall i \quad (20)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = d_i \quad \forall i \quad (21)$$

$$\bullet \quad z_j = \begin{cases} 1, & \text{se } \sum_{i=1}^m x_{ij} > 0 \\ 0, & \text{se } \sum_{i=1}^m x_{ij} = 0 \end{cases} \quad \forall j \quad (22)$$

$$\bullet \quad z_i \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad \forall j \quad (23)$$

$$\bullet \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq M \cdot z_j \quad \forall j \quad (24)$$

$$\bullet \quad t_j = \begin{cases} \delta_j, & \text{se } z_j = 1 \text{ e } \delta_j < N \\ 0, & \text{se } z_j = 0 \text{ ou } \delta_j \geq N \end{cases} \quad \forall j \quad (25)$$

$$\bullet \quad w_j = \begin{cases} 1, & \text{se } \delta_j < N \\ 0, & \text{se } \delta_j \geq N \end{cases} \quad \forall j \quad (26)$$

$$\bullet \quad t_j - M \cdot w_j \leq 0 \quad \forall j \quad (27)$$

$$\bullet \quad t_j - M \cdot z_j \leq 0 \quad \forall j \quad (28)$$

$$\bullet \quad -\delta_j + t_j \leq 0 \quad \forall j \quad (29)$$

$$\bullet \quad \delta_j - t_j + M \cdot w_j + M \cdot z_j \leq 2 \cdot M \quad \forall j \quad (30)$$

$$\bullet \quad u_j = \begin{cases} 1, & \text{se } z_j = 1 \text{ e } \delta_j \geq N \\ 0, & \text{se } z_j = 0 \text{ ou } \delta_j < N \end{cases} \quad \forall j \quad (31)$$

$$\bullet \quad (\delta_j - N) \geq -M \cdot w_j + \varepsilon \quad \forall j \quad (32)$$

- $(\delta_j - N) \leq M(1 - w_j) \quad \forall j \quad (33)$

- $(\delta_j - N) \leq M \cdot y_j \quad \forall j \quad (34)$

- $(\delta_j - N) \geq M(y_j - 1) + \varepsilon \quad \forall j \quad (35)$

- $-z_j + u_j \leq 0 \quad \forall j \quad (36)$

- $-y_j + u_j \leq 0 \quad \forall j \quad (37)$

- $z_j + y_j - u_j \leq 1 \quad \forall j \quad (38)$

- $\sum_{j=1}^n u_j \leq R \quad (39)$

O primeiro conjunto de restrições, eq. (19), garante que o comprimento dos objetos do estoque será respeitado. O segundo conjunto, eq. (20), é a garantia que toda a demanda será atendida. Caso não haja estoque suficiente, a variável Δ_i representará o comprimento não atendido. Para problemas com n suficientemente grande, Δ_i sempre será igual a zero, e assim, o conjunto de eq. (20) será substituído pela eq. (21).

Através da eq. (22) será definida a variável binária que indicará se o objeto j do estoque será utilizado. A transformação da eq. (22) em função linear é feita pelas eq. (23) e eq. (24), onde M é um número suficientemente grande, como por exemplo, $\max_j \{b_j\} - \min_i \{l_i\}$.

A perda no objeto j é dada pelo conjunto de eq. (25). Sua transformação em equações lineares é dada pelos quatro conjuntos de eq. (27), (28), (29) e (30), com auxílio da variável M já utilizada anteriormente, e também da variável auxiliar w_j , definida na eq. (26).

Se $\delta_j < N$ (e por consequência, $w_j = 1$) e $z_j = 1$, t_j deverá assumir o valor da perda. Pela eq. (30), se $w_j = 1$ e $z_j = 1$, tem-se $\delta_j \leq t_j$. Com a eq. (29), tem-se que $t_j \leq \delta_j$. O único valor que valida essas duas desigualdades é $t_j = \delta_j$.

Se $\delta_j \geq N$, então w_j será igual a zero. Considerando $w_j = 0$, t_j também será igual a zero dado pela redução da eq. (27), $t_j \leq 0$, porém, t_j não pode assumir valores negativos.

Pela eq. (28), se $z_j = 0$, então $t_j \leq 0$. Portanto, t_j será igual a zero, pois pelo seu domínio, t_j não pode ser um número negativo.

O conjunto dado pela eq.(31) define a variável binária que indicará se a sobra no objeto j é um retalho ou não. Para transformar esse conjunto em equações lineares, serão utilizadas as eq. (32), (33), (34), (35), (36), (37) e (38). O limite do número de retalhos produzidos é dado pelo último conjunto de restrições, eq. (39).

Assim, o modelo de Gradisar *et al.* (1997) será reescrito pelo conjunto das seguintes restrições: eq. (19), (21), (23), (24), (27), (28), (29), (30), (32), (33), (34), (35), (36), (37), (38) e (39).

Domínio das variáveis:

$$\Delta_i \in \mathbb{N}, \forall i; \quad \delta_j \in \mathbb{N}, \forall j; \quad t_j \in \mathbb{N}, \forall j; \quad u_j \in \{0,1\}, \forall j; \quad x_{ij} \in \mathbb{N}, \forall ij; \quad w_j \in \{0,1\}, \forall j; \quad y_j \in \{0,1\}, \forall j; \\ z_j \in \{0,1\}, \forall j$$

Devido ao alto tempo de execução computacional, Gradisar *et al.* (1997, 1999a, 1999b, 2002) também desenvolveram heurísticas para facilitar a aplicação dos problemas reais que envolvem um grande número de variáveis. Entretanto, a aplicação de heurísticas pode ser desnecessária se o tempo computacional de execução do modelo exato for pequeno.

Como o problema de corte de tecido pode ser estendido ao problema de corte de barras de aço, assim como qualquer outro problema de corte unidimensional, sua formulação poderá ser aplicada em qualquer empresa que se encaixe a esse problema.

4.5 Modelo de Gradisar adaptado por Abuabara e Morabito

Abuabara e Morabito (2007) apresentaram uma adaptação ao modelo de Gradisar (Gradisar *et al.*,1997). O princípio do modelo é o mesmo, mas o número de equações de restrições é menor.

A justificativa para usar um menor número de restrições é o ganho obtido no desempenho de execução do modelo. Além disso, a modelagem será um pouco simplificada.

Serão mantidas apenas as equações (14), (19), (21) e (39) da transformação linear do modelo de Gradisar (Gradisar *et al.*, 1997). Serão acrescentadas mais duas outras equações para substituir as restrições eliminadas. Segue a abaixo a formulação matemática do modelo de Gradisar adaptado por Abuabara e Morabito (2007).

Índices:

$i = 1, \dots, m$ tipo de item demandado
 $j = 1, \dots, n$ objetos do estoque

Parâmetros:

b_j comprimento dos objetos do estoque
 d_i demanda do item i
 l_i comprimento desejado do item i
 M parâmetro auxiliar
 N comprimento mínimo para ser considerado como retalho
 R número máximo de retalhos

Variáveis:

z_j variável binária que indica se o objeto j será utilizado (igual a um) ou não (igual a zero)
 δ_j valor da perda do objeto j
 t_j valor da sobra do objeto j
 u_j variável binária que indica se o objeto j tem retalho (igual a um) ou não (igual a zero)
 x_{ij} quantidade do item i alocado no objeto j

Função Objetivo:

- $FO_1 = \min \sum_{j=1}^n t_j \quad (40)$

A função objetivo é a minimização da perda.

Restrições:

$$\bullet \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} + \delta_j = b_j \quad \forall j \quad (41)$$

$$\bullet \sum_{j=1}^n x_{ij} = d_i \quad \forall i \quad (42)$$

$$\bullet \sum_{j=1}^n u_j \leq R \quad (43)$$

$$\bullet N \cdot u_j \leq b_j \cdot z_j - \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} \quad \forall j \quad (44)$$

$$\bullet b_j \cdot z_j - \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} \leq t_j + u_j \cdot M \quad \forall j \quad (45)$$

O primeiro conjunto de restrições, eq. (41) garante o comprimento dos objetos do estoque. A garantia que toda a demanda será atendida é dado pelo conjunto de eq. (42). O número de retalhos produzidos é limitado na eq. (43). O conjunto de restrições da sobra é dado pelas eq. (44) e (45). As simplificações referentes a esses dois conjuntos foram detalhadas em Abuabara (2006) e serão explicadas a seguir.

Se $\delta_j < N$, ou seja, não existe retalho, então $u_j = 0$. Se $\delta_j \geq N$, u_j pode ser igual a zero ou um. Então pode-se assumir $\delta_j \geq N \cdot u_j$ para $\forall j$ (46).

Escrevendo $\delta_j \leq t_j + u_j \cdot M$ (47), tem-se que, para $u_j = 0$, $\delta_j \leq t_j$, mas como a função objetivo minimiza t_j , então será válida a igualdade $\delta_j = t_j$. No caso para $u_j = 1$, t_j será igual a zero, pois será minimizado pela função objetivo e então, $\delta_j \leq M$.

A variável δ_j pode ser redefinida baseada na eq. (41), acrescentando a variável binária z_j :

$\delta_j = \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} - b_j \cdot z_j$. Substituindo na eq. (47) tem-se a eq. (45) e na eq. (46) tem-se a eq. (44).

Domínio das variáveis:

$$\delta_j \in \mathbb{N}, \forall j; t_j \in \mathbb{N}, \forall j; u_j \in \{0,1\}, \forall j; x_{ij} \in \mathbb{N}, \forall ij; z_j \in \{0,1\}, \forall j$$

Em Abuabara (2006) e Abuabara e Morabito (2006), um termo a mais foi inserido na função objetivo para minimizar o comprimento das barras utilizadas. Com isso, as barras de menor comprimento têm prioridade no corte. O objetivo é usar os retalhos no corte.

Esse termo foi definido por $FO_2 = \frac{\sum_{j=1}^n b_j \cdot z_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$ e sempre estará entre zero e um, pois z_j é

uma variável binária e o máximo valor assumido pelo numerador da fração é igual ao denominador. Como o termo principal da função objetivo (minimizar a perda t_j) é um número inteiro, o termo FO_2 não influenciará no valor total da perda.

5 MODELO DO PROBLEMA

Neste capítulo será feita a escolha do modelo a ser aplicado na empresa AçoX. A modelagem matemática referente ao modelo escolhido será apresentada. Será feita a seleção do *software* a ser sugerido para a aplicação na empresa AçoX. E por fim, será apresentada a interface no modelo e os testes de validação da implementação.

5.1 Escolha do modelo

Na empresa AçoX, o estudo do problema de corte será restringido ao CSP unidimensional, ou seja, apenas na determinação do comprimento das barras cortadas. Não serão considerados cortes internos (caso bidimensional), pois o estoque possui uma grande variedade de barras com diâmetros ou larguras e alturas diferentes. Se a empresa diminuir a variedade dos tamanhos da seção transversal nas compras futuras e adotar mais cortes internos, será possível aplicar o CSP bidimensional.

O Modelo de Gradisar para o CSP (Gradisar *et al.*, 1997) será o escolhido para a aplicação na empresa AçoX, pois já é de prática da empresa considerar retalhos e perdas como sobra resultando do processo de corte. Os demais modelos não levam em consideração essa diferença.

Para facilitar a modelagem matemática, será utilizada a adaptação do Modelo de Gradisar sugerida em Abuabara e Morabito (2007). Essa adaptação reduz o número de restrições do modelo, como foi mostrado anteriormente.

Um quesito importante que o modelo de Gradisar não levou em consideração nem a adaptação sugerida por Abuabara e Morabito (2007) é a minimização do número de barras do estoque utilizada. Em Abuabara (2006) foi feita a adição de um termo na função objetivo para minimizar o comprimento das barras utilizadas para que os retalhos formados fossem utilizados com prioridade, pois seu comprimento é menor que as barras inteiras.

Para a empresa Açox, é mais importante que o número de barras utilizadas seja minimizado ao invés da soma dos comprimentos das barras envolvidas no corte, como foi feito em Abuabara (2006). Quanto maior a quantidade de barras utilizadas, maior o tempo de execução e maior o esforço para a movimentação do material.

Para fazer a consideração da minimização do número de barras utilizadas, o função objetivo sofrerá uma alteração. Renomeando a função objetivo inicial por $FO_1 = \sum_{j=1}^n t_j$, a função objetivo será mudada para $FO = FO_1 + FO_2$, onde será sugerido que FO_2 seja a soma dos objetos

de estoque utilizados dividido pelo número total de objetos disponíveis. Ou seja, $FO_2 = \frac{\sum_{j=1}^n z_j}{n}$.

A minimização da perda não deixa de ser o conceito mais importante do modelo. Como o valor assumido por FO_1 (soma da perda t_j) é um número inteiro maior ou igual a zero e o valor de FO_2 sempre será menor do que um, a adição do novo termo não influenciará na minimização do termo principal FO_1 e apenas terá relevância quando FO_1 já tiver definida.

5.2 Modelagem

A modelagem matemática baseada no modelo de Gradisar adaptado por Arenales e Morabito (2007) apresentado na seção 4.5 acrescida da alteração da função objetivo é mostrada a seguir:

Índices:

- | | |
|-------------------|------------------------|
| $i = 1, \dots, m$ | tipo de item demandado |
| $j = 1, \dots, n$ | objetos do estoque |

Parâmetros:

b_j	comprimento dos objetos do estoque
d_i	demanda do item i
l_i	comprimento desejado do item i
M	variável auxiliar
N	comprimento mínimo para ser considerado como retalho
R	número máximo de retalhos

Variáveis:

δ_j	valor da perda do objeto j
t_j	valor da sobra do objeto j
u_j	variável binária que indica se o objeto j tem retalho (igual a um) ou não (igual a zero)
x_{ij}	quantidade do item i alocado no objeto j
z_j	variável binária que indica se o objeto j será utilizado (igual a um) ou não (igual a zero)

Função objetivo:

$$\bullet \quad FO = \min \sum_{j=1}^n (t_j + \frac{z_j}{n}) \quad (48)$$

A função objetivo minimiza a perda e o número de objetos usados.

Restrições:

$$\bullet \quad \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} + \delta_j = b_j \quad \forall j \quad (49)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = d_i \quad \forall i \quad (50)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n u_j \leq R \quad (51)$$

$$\bullet \quad N \cdot u_j \leq b_j \cdot z_j - \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} \quad \forall j \quad (52)$$

$$\bullet \quad b_j \cdot z_j - \sum_{i=1}^m l_i \cdot x_{ij} \leq t_j + u_j \cdot M \quad \forall j \quad (53)$$

O primeiro conjunto de restrições, eq. (49) garante o comprimento dos objetos do estoque. A garantia que toda a demanda será atendida é dado pelo conjunto de eq. (50). O número de retalhos produzidos é limitado na eq. (51). O conjunto de restrições da sobra é dado pelas eq. (52) e (53).

Domínio das variáveis:

$$\delta_j \in \mathbb{N}, \forall j; t_j \in \mathbb{N}, \forall j; u_j \in \{0,1\}, \forall j; x_{ij} \in \mathbb{N}, \forall ij; z_j \in \{0,1\}, \forall j$$

5.3 Seleção do Software de otimização

Para a aplicação do modelo é preciso o auxílio de um *software* específico, como por exemplo: CPLEX, *What's Best*, Lingo, Lindo ou XPRESS.

Foi escolhido o *software What's Best 9.0*. Sua interface é comum ao Excel, programa já familiarizado pelos vendedores da empresa. O preço do pacote mais completo com variáveis ilimitadas é de US\$8.995. Existem outras versões com restrições de variáveis e parâmetros disponíveis a partir de US\$495. (Lindo System Inc., 2008)

Pela dimensão do problema aplicado à empresa Açox, o pacote de US\$2.995 é suficiente, pois permite a utilização de 16.000 constantes, 32.000 variáveis e 3.200 variáveis inteiras. Apesar da empresa ser pequena, este valor não é significativo, uma vez que o programa, devidamente aplicado, proporcionará um retorno financeiro com a minimização das perdas. Supondo uma redução na perda em 25% em relação à perda registrada em 2007, em um mês o preço do programa é recuperado.

5.4 Implementação

O modelo foi implementado no Excel usando o programa *What's Best*. Para testar se a modelagem matemática foi aplicada corretamente, os seguintes quesitos foram testados:

- Toda a demanda deve ser atendida.
- Os objetos do estoque e os itens demandados devem ter medidas inteiras, no caso, em milímetros.
- A diferença entre o estoque inicial e o final deve ser igual à soma da demanda com as perdas, caso houver.
- Qualquer item demandado deve ter comprimento menor ou igual a pelo menos um objeto do estoque.
- Se a demanda é maior que o estoque disponível, a solução deve ser infactível.

Segue na Figura 5.1 a interface da modelagem no Excel para o exemplo do problema de corte citado na seção 3.2.

Os parâmetros definidos para a resolução do problema foram: $N = 4$ (menor comprimento demandado), $R = 1$ (número máximo de retalho a ser produzido) e $M = 11$ (máximo comprimento da barra do estoque subtraído do comprimento do menor item demandado). O estoque é composto por três barras (uma de 12 metros e duas de 15 metros) e a demanda é composta por 3 barras de 4 metros e 2 barras de 5 metros.

O conjunto de restrições foram agrupados em quatro grupos:

- Comprimento do estoque: definido pelo conjunto de eq. (49)
- Demanda atendida: definido pelo conjunto de eq. (50)
- Sobra: definido pelos conjuntos de eq. (52) e (53)
- Max retalho: definido pelo conjunto de eq. (51)

Figura 5.1 - Interface do modelo.

Programa de Otimização do Corte de Aço - Empresa AçoX

Aço: exemplo de aplicação

Parâmetros:

N	4
R	1
M	11

Item i	Comprimento Demanda l_i	Demanda d_i
$i = 1$	4	3
$i = 2$	5	2

Objeto j	Comprimento Estoque b_j
$j = 1$	12
$j = 2$	15
$j = 3$	15

Restrições:

Comprimento do estoque				
$j = 1$	12	=		12
$j = 2$	15	=		15
$j = 3$	15	=		15

Sobra					
$j = 1$	0	=<=	0	=<=	0
$j = 2$	0	=<=	0	=<=	0
$j = 3$	4	<=	5	<=	11

Demanda atendida				
$i = 1$	3	=		3
$i = 2$	2	=		2
$i = 3$	0	=		0

Max Retalhos		
1	=<=	1

Variáveis:

	Perda		Retalho	Objeto
Objeto j	δ_j	t_j	u_j	z_j
$j = 1$	0	0	0	1
$j = 2$	15	0	0	0
$j = 3$	5	0	1	1

Alocado			
x_{ij}	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	3	0	0
$i = 2$	0	0	2

Função Objetivo:

$FO =$	0,67
--------	------

6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES

Este capítulo tem início com as considerações gerais e a definição dos parâmetros para a aplicação do modelo do problema de corte unidimensional para a empresa AçoX. Será apresentada uma análise do perfil de vendas para embasar a escolha dos aços a serem aplicados no modelo. Posteriormente, serão analisados os resultados computacionais em dois cenários e apresentada uma comparação do modelo com os dados reais para os aços escolhidos. Para finalizar as análises, será feita a expansão do modelo em apenas um período para as dimensões relevantes dos tipos de aço que representam 75% do volume em vendas na empresa AçoX.

6.1 *Considerações iniciais*

Seria possível laminar uma barra redonda de diâmetro maior para obter uma menor devido a não disponibilidade no estoque ou à escolha do chefe de corte. No desenvolvimento deste trabalho, a opção de redução de bitola não será considerada, pois, a própria empresa não adota essa prática, mesmo porque, como já foi dito, a empresa possui estoque suficiente e bastante variado.

As primeiras análises serão feitas para apenas alguns tipos de aço. A seleção dos aços será feita baseada nas vendas de 2006 e 2007. Os tipos de aços com perfil redondo que mais foram vendidos em volume serão os escolhidos para a aplicação do modelo. No entanto, o modelo não terá restrição para a inclusão de algum outro tipo de aço, perfil ou outras dimensões da seção de corte.

A sequência de execução das ordens de pedidos não terá importância, ou seja, nenhum item demandado terá prioridade de produção. Para isso, as ordens de pedidos serão agrupadas no período de uma semana. Assim como o sequenciamento dos pedidos, o tempo da execução do corte também não terá relevância.

Um quesito importante na resolução do problema de corte unidimensional é o tempo computacional gasto para encontrar a solução. Quanto maior o número de variáveis e restrições, mais demorado tende a ser a obtenção da solução ótima. Será estipulado o tempo máximo de quinze minutos.

6.2 Definição dos parâmetros

Com o modelo a ser aplicado já definido no capítulo 5, é preciso escolher os parâmetros da formulação matemática que melhor se aplica à realidade da empresa. Os parâmetros a serem definidos são: b_j (comprimento dos objetos do estoque), d_i (demanda do item i), l_i (comprimento desejado do item i), M (variável auxiliar), N (comprimento mínimo para ser considerado como retalho) e R (número máximo de retalhos).

Todo final de ano a empresa AçoX realiza um inventário de todo seu estoque. As análises deste trabalho tiveram início na primeira semana de 2008, portanto, o estoque inicial será baseado em dados reais do inventário. Para as análises das semanas seguintes, será feita a reconstituição do estoque com as informações resultantes do modelo e as informações das compras (novas entradas no estoque). A demanda, quantidade e comprimento, será baseada nas vendas do período dos seis primeiros meses de 2008, agrupados por semana. A unidade do comprimento do estoque e da demanda será em milímetros.

O parâmetro M será definido pela diferença entre o maior comprimento do estoque e o menor comprimento de um item demandado. Os parâmetros N e R serão variados nas análises.

A escolha dos aços a serem aplicados no modelo serão definidos na seção 6.3 após uma análise simplificada do perfil das vendas.

6.3 Análise do perfil de vendas

Antes da escolha dos aços do modelo, será feita uma pequena análise do perfil de vendas da AçoX. Os principais produtos vendidos pela AçoX são aços ferramenta, aços ligados e aço carbono. Segue no Gráfico 6.1 a participação em volume nas vendas desses grupos de aço em 2006 e 2007.

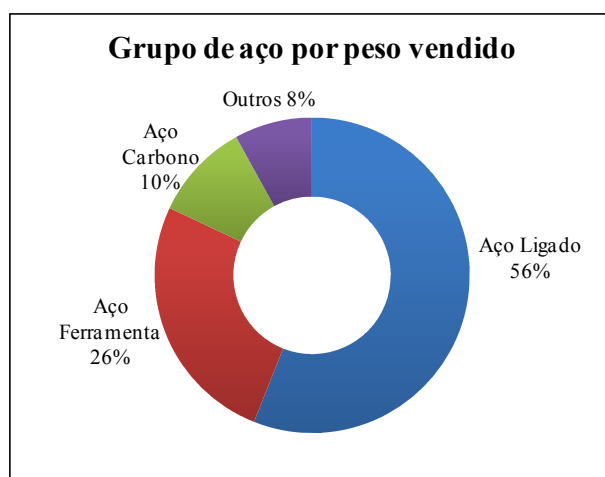


Gráfico 6.1 - Participação em volume dos grupos de aço.

Os principais tipos de aço vendidos pela AçoX em 2006 e 2007 foram: 1020, VL40, 5160, B40, D6, VF800, 1045, VC150, VC52, APC, VH13, VWM2, VMO, 304, 4320, VN50, APW, H13IM, VP20, O1, 316, VM40, VB20, VD2, VK5, VCO, S1. Neste período, cinco tipos de aço corresponderam a 75% dos itens vendidos, como pode ser visto no Gráfico 6.2.

Os valores em toneladas do Gráfico 6.2 foram alterados conforme a exigência da empresa. Os cinco principais aços vendidos pela AçoX e considerados para próximas análises neste trabalho são: 4140, 8620, D6, 1045, VND.

Fazendo a mesma análise considerando o faturamento em Reais das vendas no lugar do peso vendido, tem-se que os principais aços são os mesmos; apesar de cada aço ter um preço de venda diferente.

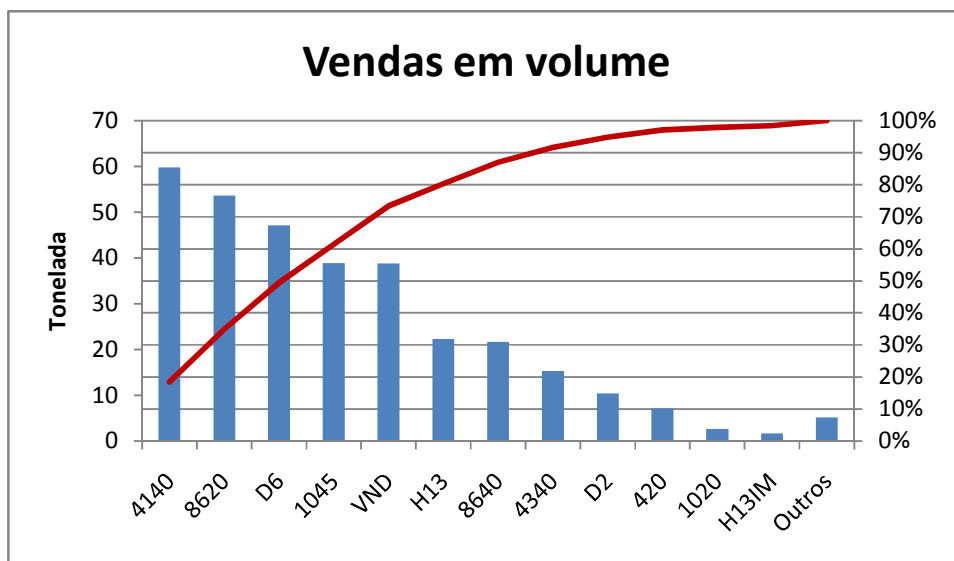


Gráfico 6.2 - Vendas, em toneladas, da AçoX em 2006 e 2007.

Em relação ao perfil da seção transversal, o faturamento das vendas dos aços retangulares gira em torno de 57%, enquanto que dos redondos 41%. As demais vendas são referentes à sucata e produtos secundários. Mês a mês, essas porcentagens sofrem pequenas variações, mas não são significativas.

6.4 Cenários

As análises iniciais serão feitas para três itens do estoque escolhidos aleatoriamente entre os cinco tipos de aço mais vendidos pela empresa. Os aços escolhidos foram: aço VND de diâmetro 25,4 mm, aço D6 de diâmetro 31,75 mm e aço 8620 de diâmetro de 25,4 milímetros.

Para esses aços serão criados dois cenários para verificar o comportamento do modelo frente a variação dos parâmetros N (comprimento mínimo que o retalho pode assumir para não ser considerado como uma perda) ou R (número máximo de retalhos produzidos). Em cada cenário, o parâmetro a ser analisado assumirá quatro valores diferentes para cada uma das 27 semanas. Define-se ocorrência cada simulação de cada parâmetro diferente em cada semana. Para cada cenário serão analisados 108 ocorrências para cada um dos aços escolhidos.

6.4.1 Cenário A

No cenário A, o valor de N , comprimento mínimo que o retalho pode assumir para não ser considerado como uma perda, será definido pelo menor comprimento de um item da semana considerada. O valor de R , número máximo de retalhos produzidos, será igual a 1, 2, 3 ou 4.

Os primeiros resultados a serem apresentados são: a função objetivo, o número de retalhos produzidos e o número de objetos do estoque utilizados. Relembrando a formulação matemática, tem-se que FO_1 e FO_2 compõem a FO . O valor de FO_1 é sempre maior do que um e representa o valor da perda em milímetros. O valor de FO_2 é sempre menor do que um e representa a porcentagem do número de barras utilizadas sobre o total de barras disponíveis. Portanto, o número inteiro da FO será a perda e as casas decimais serão a porcentagem de barras utilizadas. O número de retalhos produzidos é limitado pelo parâmetro R , mas nem sempre atinge o valor máximo. O número de objetos do estoque é a quantidade de barras que foram utilizadas.

Cada ocorrência do modelo para o cenário A dos aços VND de diâmetro 25,4 mm, D6 de diâmetro 31,75 mm e 8620 de diâmetro 25,4 mm nas primeiras 27 semanas de 2008 são mostradas a seguir.

Os resultados da função objetivo, do número de retalhos produzidos e do total de barras utilizadas (número de objetos) para o aço VND de diâmetro 25,4 são mostrados na Tabela 6.1.

Para esse aço, o valor total da perda (número inteiro da FO) diminui conforme o valor de R aumenta. A redução da perda total de $R = 1$ para $R = 2$ é de 37%, de $R = 2$ para $R = 3$ é de 48% e de $R = 3$ para $R = 4$ é de 28%. Esse fato já era esperado, pois, todos os itens demandados precisam ser atendidos e quando os objetos com o número limite de retalho não são suficientes, são utilizados outros objetos do estoque em que haja perda.

Tabela 6.1 - Cenário A – Aço VND de diâmetro 25,4: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4
1	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	1	1	1	1
3	357,41	17,38	0,38	0,38	1	2	3	4	13	12	12	12
4	978,17	14,17	0,17	0,17	1	2	3	3	4	4	4	4
5	57,06	0,06	0,06	0,06	1	2	3	4	4	4	4	4
6	49,02	5,03	0,03	0,02	1	2	3	3	3	3	3	3
7	1.199,06	1.399,06	93,06	99,06	1	2	3	4	7	7	7	7
8	431,06	231,06	144,06	57,06	1	2	3	4	7	7	7	7
9	0,02	0,02	0,02	0,02	1	2	2	2	2	2	2	2
10	800,04	360,04	350,04	30,04	1	2	3	4	5	5	5	5
11	24,03	24,03	24,03	24,03	1	1	1	1	4	4	4	4
12	285,06	100,06	0,06	0,06	1	2	3	3	7	7	7	7
13	100,03	100,03	100,03	100,03	1	1	1	1	3	3	3	3
14	1.035,09	635,09	438,09	501,09	1	2	3	4	10	10	10	10
15	0,04	0,03	0,04	0,03	1	2	3	3	5	4	4	4
16	34,04	17,04	0,04	0,03	1	2	3	4	4	4	4	4
17	50,02	50,02	50,02	50,02	1	1	1	1	2	2	2	2
18	50,03	10,03	0,03	0,03	1	2	3	3	3	3	3	3
19	28,04	6,04	0,04	0,03	1	2	3	4	4	4	4	4
20	540,06	290,06	200,06	58,08	1	2	3	4	7	7	7	9
21	112,06	17,05	9,05	75,05	1	2	3	4	7	6	6	6
22	119,09	324,09	124,08	50,08	1	2	3	4	11	12	10	11
23	443,05	469,05	362,06	200,06	1	2	3	4	6	7	7	7
24	0,02	0,02	0,02	0,02	1	2	2	2	3	3	3	3
25	450,04	450,04	450,04	450,04	1	1	1	1	5	5	5	5
26	0,01	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0,01	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
Total	7.142,61	4.519,56	2.345,56	1.695,56	27	46	63	75	130	129	127	130

O número de retalhos produzidos (dado pela variável u_j) nem sempre é igual ao máximo valor, parâmetro R . Em oito ocorrências, um retalho foi suficiente, mesmo quando o limite era 2, 3 ou 4.

O número de objetos utilizados foi o mesmo na maioria dos casos, o que não significa que foram utilizados os mesmos objetos. O estoque inicial da semana 01 é o estoque real da empresa em 01/01/2008. Para as semanas seguintes, o estoque é reconstituído a partir dos resultados do modelo.

O valor da perda acumulada em milímetros ao longo das 27 semanas é apresentado no Gráfico 6.3.

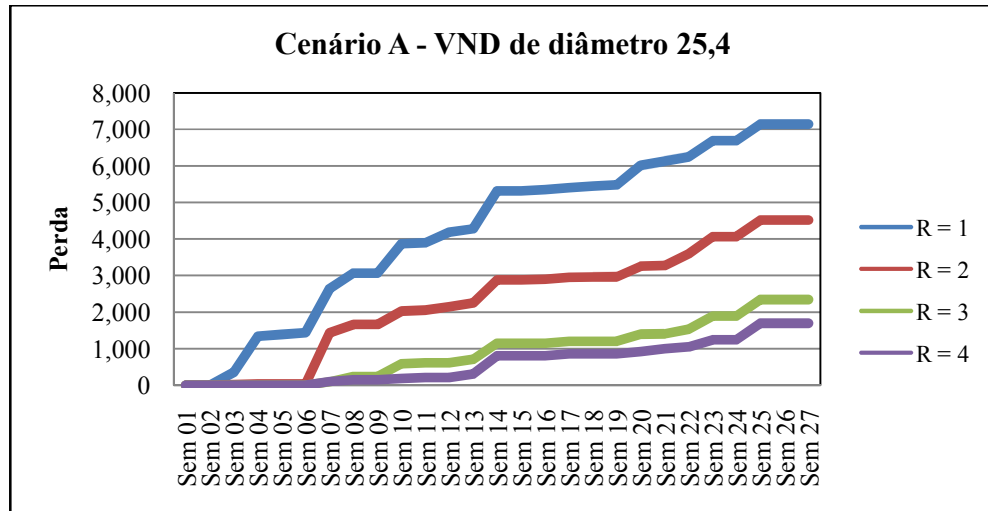


Gráfico 6.3 - Cenário A – perda acumulada, em milímetros, do aço VND de diâmetro 25,4.

Os resultados do cenário A para o aço D6 de diâmetro 31,75 mm seguem na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Cenário A – Aço D6 de diâmetro 31,75: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4
1	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1	1
2	5,09	0,09	0,09	0,09	1	2	3	4	6	6	6	6
3	0,08	0,08	0,08	0,08	1	1	3	3	5	5	5	5
4	0,04	0,04	0,03	0,03	1	1	1	1	2	2	2	2
5	0,04	0,04	0,03	0,03	1	1	1	1	2	2	2	2
6	0,13	0,13	0,12	0,12	1	1	3	4	7	7	7	7
7	0,10	0,10	0,09	0,09	1	1	3	4	5	5	5	5
8	0,13	0,13	0,12	0,11	1	1	3	1	6	6	6	6
9	5,04	0,04	0,04	0,04	1	2	2	3	3	3	3	3
10	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
11	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	2	1	3	3	3	3
12	0,06	0,06	0,05	0,05	1	2	3	1	4	4	4	4
13	0,03	0,03	0,03	0,03	1	2	2	2	2	2	2	2
14	0,02	0,02	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0,05	0,05	0,04	0,04	1	2	2	1	3	3	3	3
16	0,05	0,05	0,04	0,04	1	0	1	1	3	3	3	3
17	0,08	0,08	0,07	0,07	1	1	1	1	5	5	5	5
18	0,03	0,03	0,03	0,03	1	2	3	3	3	3	3	3
19	0,06	0,06	0,05	0,06	1	2	3	2	6	6	6	6
20	100,06	0,05	0,05	0,05	1	2	3	4	5	5	5	5
21	0,02	0,02	0,02	0,02	1	2	2	2	2	2	2	2
22	0,02	0,02	0,02	0,02	1	2	1	1	2	2	2	2
23	0,04	0,03	0,03	0,03	1	2	1	3	3	3	3	3
24	0,04	0,03	0,03	0,03	1	2	1	2	3	3	3	3
25	0,02	0,02	0,02	0,02	1	2	2	2	2	2	2	2
26	0,01	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
27	7,06	0,06	0,06	0,06	1	2	1	1	5	5	6	6
Total	118,40	1,37	1,24	1,23	27	40	51	52	93	93	94	94

Pode-se observar no Gráfico 6.4, valor acumulado da perda em milímetros ao longo das 27 semanas, que apenas para $R = 1$, tiveram ocorrências em que o valor da FO do aço D6 foi superior a um, ou seja, houve registro de perda. Para R maior ou igual a 2, todas as ocorrências não tiveram perda.

O número de retalhos, dado pela soma da variável u_j não atingiu o máximo na maioria das ocorrências. Para R igual a 4, apenas 4 ocorrências utilizaram o valor máximo de R .

O número de objetos foi o mesmo para todos os valores de R em todas as ocorrências até a semana 26. Na última semana analisada, semana 27, para R igual a 3 e 4 foi utilizado um objeto a mais que para R igual a 1 e 2.

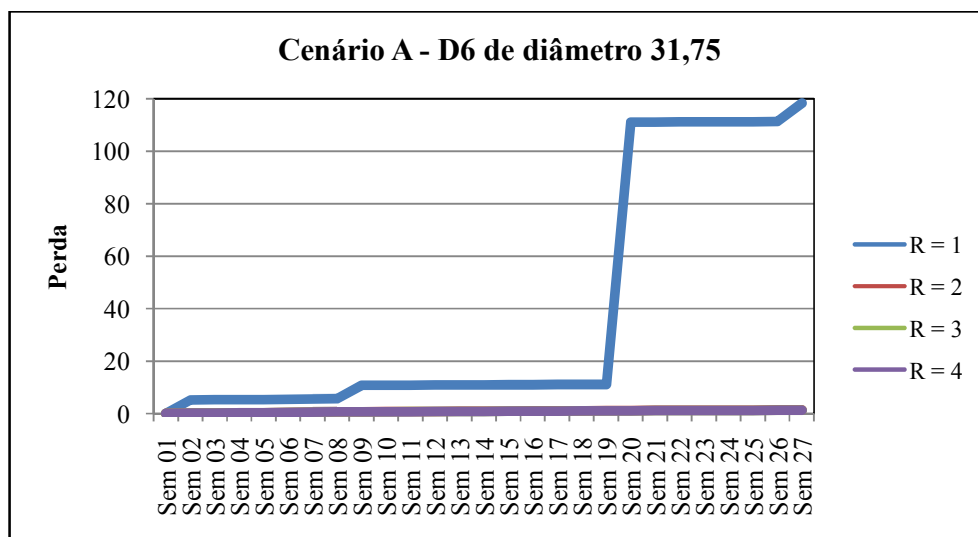


Gráfico 6.4 - Cenário A – perda acumulada, em milímetros, do aço D6 de diâmetro 31,75.

No Gráfico 6.4 as curvas para R igual a 2 e 3 foram sobrepostas pela curva de R igual a 4, pois seus valores são bem próximos e a escala do gráfico não é suficiente a visualização de todas as curvas.

A Tabela 6.3 mostra os resultados da função objetivo, o número de retalhos produzidos e o número de objetos utilizados pelo modelo para o aço 8620 de diâmetro 25,4 milímetros no cenário A.

A função objetivo assumiu um valor alto (acima de 1.000) em duas semanas, 01 e 21. Isso pode ser justificado pelo fato do parâmetro N ser variável em função dos comprimentos dos itens

desejados em cada semana. Na semana 01, o valor de N foi de 1.500 e na semana 21 foi de 3.000. Foi considerado perda qualquer comprimento abaixo do valor de N , o que na verdade não representa a realidade da empresa se o valor de N for muito alto.

O número de retalhos utilizados foi menor do que o esperado, em nenhuma ocorrência formou-se 4 retalhos, mesmo permitido pelo parâmetro R . O número de objetos utilizados foi similar entre as variações de R . Em cinco semanas houve alguma variação. A variação para uma mesma semana chegou a ser maior do que um objeto, o que não aconteceu para os aços já analisados VND e D6.

Tabela 6.3 - Cenário A – Aço 8620 de diâmetro 25,4: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4
1	1.000,25	1.000,25	0,38	0,38	1	1	3	3	2	2	3	3
2	4,38	0,50	0,50	0,50	1	2	3	3	3	4	4	4
3	65,30	65,33	0,30	0,30	1	2	3	3	3	3	3	3
4	0,11	0,11	0,10	0,10	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,06	0,06	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0,06	0,06	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0,11	0,11	0,11	0,11	1	1	1	1	2	2	2	2
8	0,06	0,06	0,06	0,06	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0,06	0,06	0,06	0,06	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0,09	0,09	0,09	0,09	1	1	1	1	2	2	2	2
11	0,10	0,10	0,09	0,09	1	2	2	2	2	2	2	2
12	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0,10	0,10	0,09	0,09	1	2	2	2	2	2	2	2
17	0,11	0,10	0,09	0,09	1	1	2	1	2	2	2	2
18	0,06	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
19	0,06	0,05	0,09	0,05	1	1	2	1	1	1	2	1
20	0,05	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1.422,09	1.195,08	1.169,08	1.245,08	0	0	0	0	2	2	2	2
22	0,05	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0,05	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
24	5,18	0,17	16,23	0,12	1	2	3	2	4	4	6	3
25	3,10	0,09	0,08	0,08	1	2	2	2	2	2	2	2
26	9,19	11,23	67,27	12,29	1	2	2	2	4	5	7	7
27	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
Total	2.510,81	2.273,93	1.255,08	1.259,97	26	33	40	37	45	47	53	49

A perda acumulada em milímetros ao longo das 27 semanas é apresentada no Gráfico 6.5. As curvas $R = 1$ e $R = 2$ se sobrepõem até a semana 20, o mesmo acontece para $R = 3$ e para $R = 4$.

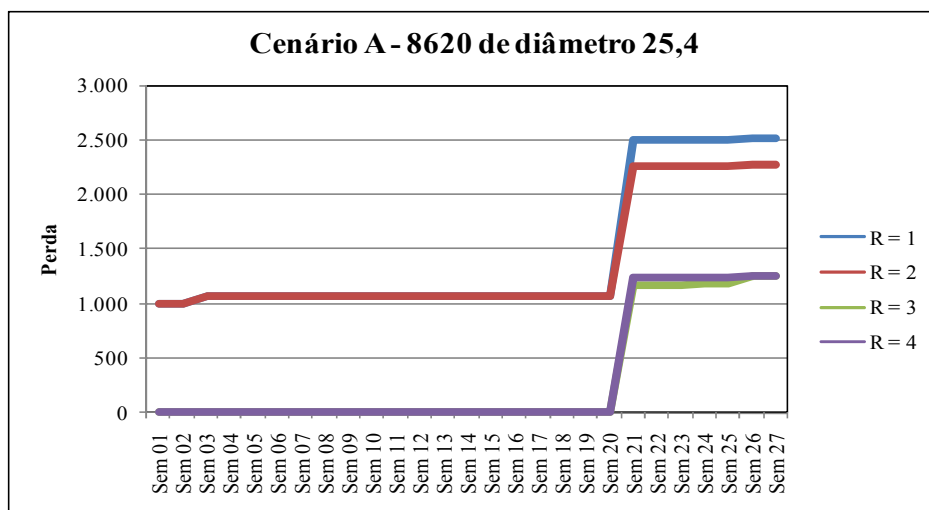


Gráfico 6.5 - Cenário A – perda acumulada, em milímetros, do aço 8620 de diâmetro 25,4.

Concluída a primeira análise dos resultados, será realizada a seguir uma comparação do número total de retalhos produzidos, de objetos utilizados e do tempo de execução do modelo para os três aços.

O número de retalhos produzidos (definido pela soma da variável u_j para $j = 1$ até n) nem sempre é igual ao valor máximo limitado pelo parâmetro R . O modelo utiliza o melhor número de retalhos para satisfazer a FO. Na Tabela 6.4 é mostrado o número máximo de ocorrências possíveis para cada valor máximo de R e nas demais colunas, o número de ocorrências nas quais a soma da variável u_j para $j = 1$ até n é igual a 0, 1, 2, 3 ou 4.

Para exemplificar o total do número máximo de ocorrências por total de retalho, tem-se que o número de retalhos definidos pela variável u_j só poderá ser igual a 3 em 54 ocorrências (27 quando $R = 3$ e 27 quando $R = 4$). Para $R = 1$ ou $R = 2$, nenhuma ocorrência poderá ter a soma da variável u_j igual ou maior a 3 devido conjunto de restrições do modelo.

Tabela 6.4 - Total de ocorrências por número de retalho produzido no cenário A.

Retalho	Máximo	VND - diâmetro 25,4	D6 - diâmetro 31,75	8620 - diâmetro 25,4
0	108	0	1	4
1	108	51	65	79
2	81	23	25	18
3	54	22	13	7
4	27	12	4	0
Total		108	108	108

Em nenhuma ocorrência do aço VND, o número de retalho foi nulo. A maioria concentrou-se na produção de um retalho (51 ocorrências de 108), mas um número considerável de 12 dentre 27 possíveis, produziram 4 retalhos. Em comparação com o aço D6, foi três vezes maior a utilização de 4 retalhos. E o aço 8620 não teve nenhuma ocorrência com 4 retalhos.

Há apenas uma ocorrência em que o número de retalhos foi nulo para o aço D6, e 65 ocorrências nas quais o número de retalho obtido foi um. Para o aço 8620, um número ainda maior de ocorrências (79 de 108) resultou em apenas 1 retalho.

Em média, no cenário A, 62% das ocorrências dos três aços considerados teve solução ótima com apenas a produção de um retalho. Apesar dessa porcentagem não ser um número alto, para as análises do cenário B e da expansão será considerado o parâmetro R igual a 1. Este valor está alinhado com a perspectiva da empresa AçoX, para a qual a produção de apenas um retalho é a situação mais adequada, mesmo implicando em um maior valor de perda, pois é difícil a armazenagem e controle dos retalhos.

Em relação ao número de objetos utilizados, quanto menor o número, mais rápido será o processo de preparação das máquinas e movimentação das barras. Na Tabela 6.5 é apresentado o total de ocorrências pelo número de objetos utilizados para cada aço.

Tabela 6.5 - Total de ocorrências por número de objetos utilizados no cenário A.

Número de Objetos	VND - diâmetro 25,4	D6 - diâmetro 31,75	8620 - diâmetro 25,4
1	16	12	59
2	8	24	31
3	16	32	8
4	23	4	6
5	9	18	1
6	4	14	1
7	19	4	2
8	0	0	0
9	1	0	0
10	5	0	0
11	2	0	0
12	4	0	0
13	1	0	0
Total	108	108	108

Para os aços D6 e 8620, o máximo de objetos utilizados por ocorrência são 7 barras. E para o aço VND é de 13 objetos. Esses números dependem da quantidade de itens solicitada.

Quanto maior o número de pedidos e o comprimento dos pedidos, maior será a necessidade de utilizar os objetos do estoque. Como o termo da função objetivo FO_2 minimiza o número de objetos utilizados, os valores apresentados acima já são os menores possíveis.

O tempo de execução, em segundos, para o cenário A segue na Tabela 6.6. O asterisco (*) ao lado do número significa que o modelo foi interrompido antes de encontrar a solução ótima. O tempo máximo de execução foi estabelecido em quinze minutos.

Tabela 6.6 - Tempo (em segundos) de execução do modelo para o cenário A.

Semana	VND - diâmetro 25,4				D6 - diâmetro 31,75				8620 - diâmetro 25,4			
	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4	R = 1	R = 2	R = 3	R = 4
01	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0
02	1	1	1	1	632	10	4	4	498	4	3	5
03	900*	900*	34	2	1	2	2	1	1	3	1	0
04	5	399	1	1	2	1	9	3	0	0	0	0
05	900*	28	2	12	2	1	1	3	0	0	0	0
06	900*	900*	12	13	29	40	11	11	0	0	0	0
07	900*	42	900*	900*	29	34	31	7	0	0	0	0
08	900*	900*	900*	900*	32	19	2	2	0	0	0	0
09	10	2	1	1	900*	19	22	4	0	0	0	0
10	900*	900*	900*	900*	1	1	22	3	0	1	1	1
11	283	900*	900*	900*	1	12	5	4	1	1	1	1
12	900*	900*	10	5	18	31	2	2	0	0	0	0
13	18	46	53	41	8	3	2	2	0	0	0	0
14	900*	900*	900*	900*	2	1	3	1	0	1	0	0
15	900*	3	4	4	15	1	2	22	2	0	0	1
16	900*	900*	7	2	1	1	1	1	1	1	0	0
17	4	7	6	6	1	1	1	3	0	0	0	0
18	900*	900*	8	2	4	11	1	2	0	0	0	0
19	900*	900*	7	13	9	2	4	3	0	0	1	0
20	204	900*	900*	900*	900*	1	1	3	0	0	0	0
21	900*	900*	900*	68	6	4	3	2	0	0	0	0
22	900*	900*	900*	900*	2	1	2	2	1	1	1	1
23	900*	900*	900*	900*	3	1	2	19	0	0	0	0
24	8	2	1	14	3	1	1	3	167	13	269	2
25	35	24	27	7	8	1	1	1	1	0	0	0
26	1	1	1	1	1	1	3	1	145	30	74	60
27	1	1	1	1	11	1	1	1	0	0	0	0
Total	14.070	13.156	8.276	7.394	2.622	202	140	112	817	55	351	71

O modelo para o aço VND de diâmetro 25,4 foi interrompido quando alcançou o tempo de 15 minutos 46 vezes, ou seja, em 42,6% das ocorrências. A solução apresentada pode não ser a ótima para esses casos. Porém, para avaliar a qualidade da solução obtida, todas essas ocorrências foram executadas novamente no modelo sem tempo limite máximo. O tempo médio

de execução foi de 2 horas e 20 minutos. A solução ótima encontrada depois da execução sem limite de tempo foi a mesma da solução interrompida em 93,5% dos casos. No restante, a variação entre a solução ótima e a solução interrompida variou 64%.

O modelo para o aço D6 de diâmetro 31,75 foi interrompido quando alcançou o tempo de 15 minutos apenas em dois casos (semana 9 e 20 para $R = 1$). Exceto na semana 02 de $R = 1$, as demais ocorrências não ultrapassaram o tempo de execução de 60 segundos. Como o número de interrupções foi baixo, as ocorrências interrompidas não foram executadas posteriormente sem limite de tempo.

O modelo para o aço 8620 de diâmetro 25,4 não foi interrompido nenhuma vez. O tempo de execução foi menor do que três segundos na maioria dos casos deste aço.

6.4.2 Cenário B

No cenário B, o valor de N , comprimento mínimo que o retalho pode assumir para não ser considerado como uma perda, será igual a 50, 100, 200 ou 500. O valor de R , número máximo de retalhos produzidos, será fixo e igual a 1.

Assim como no cenário A, os primeiros resultados a serem apresentados são: a função objetivo, o número de retalhos produzidos e o número de objetos do estoque utilizados. Relembrando a formulação matemática, o número inteiro da FO será a perda e as casas decimais serão a porcentagem de barras utilizadas. O número de retalhos produzidos é limitado pelo parâmetro R , mas nem sempre atinge o valor máximo. O número de objetos do estoque é a quantidade de barras que foram utilizadas.

Cada ocorrência simulada no modelo para o cenário B dos aços VND de diâmetro 25,4 mm, D6 de diâmetro 31,75 mm e 8620 de diâmetro 25,4 mm nas primeiras 27 semanas de 2008 são mostradas respectivamente na Tabela 6.7, Tabela 6.8 e Tabela 6.9.

Tabela 6.7 - Cenário B – Aço VND de diâmetro 25,4: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500
1	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	1	1	1	1
3	357,41	357,41	0,38	357,41	1	1	1	1	13	13	12	13
4	978,17	978,17	978,19	978,17	1	1	1	1	4	4	4	4
5	57,06	57,06	57,06	57,06	1	1	1	1	4	4	4	4
6	49,03	49,02	49,03	49,02	1	1	1	1	3	3	3	3
7	1.199,06	1.499,06	999,06	799,06	1	1	1	1	7	7	7	7
8	431,06	431,06	431,06	431,06	1	1	1	1	7	7	7	7
9	0,02	0,02	1,02	1,02	1	1	1	1	2	2	2	2
10	1.010,04	845,05	825,04	750,04	1	1	1	1	5	6	5	5
11	24,03	24,03	24,03	24,03	1	1	1	1	4	4	4	4
12	285,06	300,06	285,06	285,06	1	1	1	1	7	7	7	7
13	70,04	100,03	100,03	100,03	1	1	1	1	5	3	3	3
14	1.860,09	1.271,09	1.435,09	935,09	1	1	1	1	10	11	10	10
15	9,04	9,04	9,04	9,03	1	1	1	1	4	4	4	4
16	34,04	34,04	34,04	34,04	1	1	1	1	4	4	4	4
17	30,02	50,02	50,02	50,02	1	1	1	1	2	2	2	2
18	50,03	890,03	50,03	50,03	1	1	1	1	3	3	3	3
19	72,04	28,04	28,04	42,04	1	1	1	1	4	4	4	4
20	540,06	540,06	540,06	790,06	1	1	1	0	7	7	7	7
21	72,06	111,06	124,06	57,05	1	1	1	1	6	7	7	6
22	404,08	204,08	267,09	238,09	1	1	1	1	10	10	11	12
23	443,05	443,05	443,05	498,06	1	1	1	1	6	6	6	7
24	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	3	3	3	3
25	236,04	450,04	450,04	77,04	1	1	1	1	5	5	5	5
26	0,01	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0,01	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	2	2	2
Total	8.211,61	8.671,61	7.180,61	6.612,60	27	27	27	26	129	131	129	131

O valor da função objetivo tende a ser menor para as ocorrências com maior valor do parâmetro N . Isso acontece porque o limite entre o que é perda ou retalho é maior. Por exemplo, se a sobra de uma barra é 150 milímetros, a sobra será considerada como perda se $N = 50$ ou $N = 100$ e será considerada como retalho se $N = 200$ ou $N = 500$.

Como o estoque foi reconstituído semana a semana para cada valor diferente de N , nem sempre o estoque da mesma semana é igual para os diferentes valores de N . E com isso, o valor da FO pode ser maior para menores valores de N , contradizendo a expectativa, pois o estoque não é exatamente o mesmo.

A perda para o aço VND de diâmetro 25,4 no cenário B foi alta, mesmo para o valor de N igual a 50. A diferença entre N igual a 50 e 500 é de 19,5%.

O número de retalhos foi limitado por $R = 1$, mas a soma da variável u_j poderia ser igual a zero, o que aconteceu em apenas uma ocorrência das 108 possíveis. O número de objetos utilizados para cada semana não foi diferente na maioria dos casos.

Segue no Gráfico 6.6 a perda acumulada em milímetros para o aço VND de diâmetro 25,4 mm.

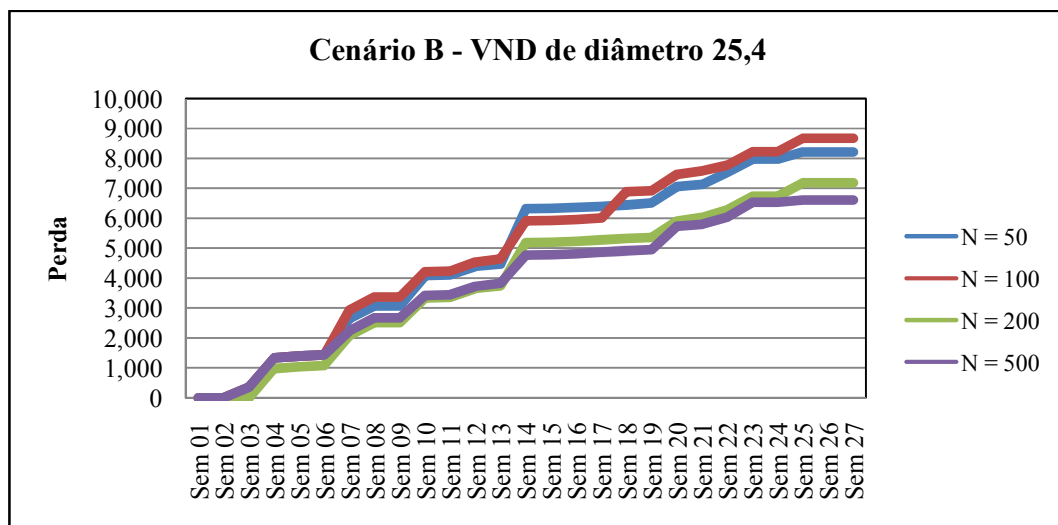


Gráfico 6.6 - Cenário B – perda acumulada, em milímetros, do aço VND de diâmetro 25,4.

A Tabela 6.8 mostra os resultados da função objetivo, o número de retalhos produzidos e o número de objetos utilizados pelo modelo para o aço D6 de diâmetro 31,75 milímetros no cenário B.

Para $N = 50$ e $N = 200$, a FO tem o mesmo comportamento, exceto na última semana, na qual para $R = 200$ o valor da FO foi maior do que mil. No total, o menor valor da soma da FO é para $N = 100$. Na semana 20, em todos os casos houve uma perda não nula.

Em apenas uma ocorrência o número de retalhos foi zero; em todas as outras foi igual a 1, valor limitado pelo parâmetro R . Em relação ao número de objetos utilizados, apenas nas semanas 3 e 27 houve diferença de um objeto, nas demais foram iguais.

Tabela 6.8 - Cenário B – Aço D6 de diâmetro 31,75: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500
1	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,09	25,09	0,09	140,09	1	1	1	1	6	6	6	6
3	0,08	0,08	0,08	0,10	1	1	1	1	5	5	5	6
4	0,04	0,04	0,04	0,03	1	1	1	1	2	2	2	2
5	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	2	2	2	2
6	0,13	0,13	0,13	0,13	1	1	1	1	7	7	7	7
7	0,10	0,10	0,10	0,10	1	1	1	1	5	5	5	5
8	0,14	0,13	0,14	0,13	1	1	1	1	6	6	6	6
9	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
10	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
11	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
12	0,06	0,06	0,06	0,06	1	1	1	1	4	4	4	4
13	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	2	2	2	2
14	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	3	3	3	3
16	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	0	1	3	3	3	3
17	0,09	0,08	0,09	0,08	1	1	1	1	5	5	5	5
18	0,03	0,03	0,03	0,03	1	1	1	1	3	3	3	3
19	0,06	0,06	0,07	0,06	1	1	1	1	6	6	6	6
20	100,06	27,06	100,06	50,06	1	1	1	1	5	5	5	5
21	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	2	2	2	2
22	0,02	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	2	2	2	2
23	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
24	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	3	3	3	3
25	0,03	0,03	0,03	0,02	1	1	1	1	2	2	2	2
26	0,01	0,01	0,01	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0,08	0,08	1.132,06	7,08	1	1	1	1	6	6	5	6
Total	101,44	53,42	1.233,44	198,42	27	27	26	27	94	94	93	95

No Gráfico 6.7 é possível ver a perda acumulada em milímetros ao longo das 27 semanas para o aço D6 de diâmetro 31,75 para o cenário B. As curvas de $N = 50$ e 200 se sobrepõe até a semana 26.

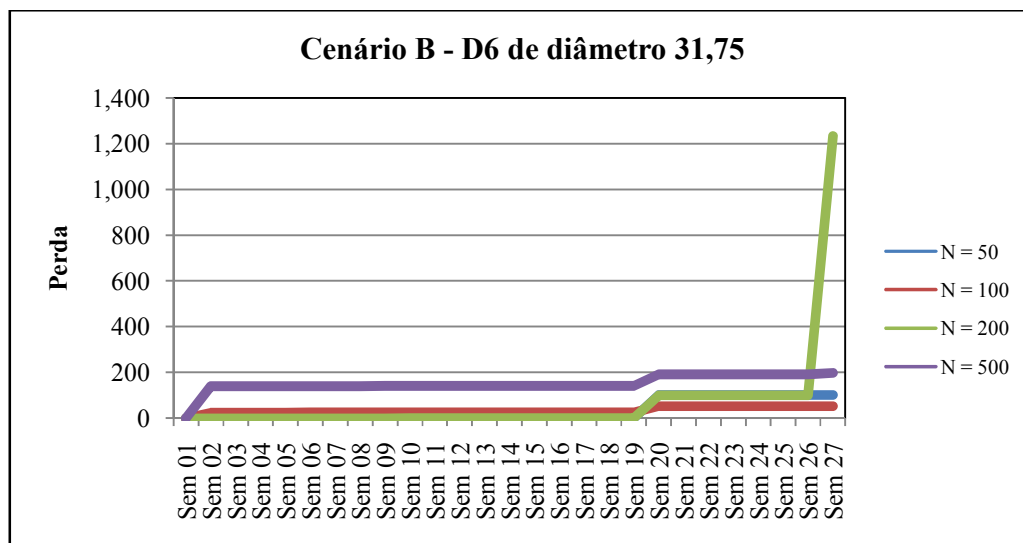


Gráfico 6.7 - Cenário B – perda acumulada, em milímetros, do aço D6 de diâmetro 31,75.

A Tabela 6.9 mostra os resultados no cenário B para o aço 8620 de diâmetro 25,4 mm.

Tabela 6.9 - Cenário B – Aço 8620 de diâmetro 25,4: FO, retalhos e objetos.

Semana	FO				Retalho				Objeto			
	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500
1	0,25	0,25	0,25	0,25	1	1	1	1	2	2	2	2
2	4,25	4,25	4,25	4,25	1	1	1	1	2	2	2	2
3	65,18	65,18	65,18	65,18	1	1	1	1	2	2	2	2
4	0,09	0,09	0,09	0,09	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0,10	0,10	0,10	0,10	1	1	1	1	2	2	2	2
8	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0,08	0,08	0,08	0,08	1	1	1	1	2	2	2	2
11	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
12	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0,09	0,09	0,09	0,09	1	1	1	1	2	2	2	2
17	0,09	0,09	0,09	0,09	1	1	1	1	2	2	2	2
18	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
19	0,05	0,05	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1
20	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0,08	0,08	0,08	230,08	1	1	1	1	2	2	2	2
22	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
24	0,13	1,13	1,13	0,16	1	1	1	1	3	3	3	4
25	0,05	0,09	0,09	0,09	1	1	1	1	1	2	2	2
26	2,23	2,18	2,23	4,29	1	1	1	1	5	4	5	6
27	0,04	0,04	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1	1	1
Total	73,29	74,29	74,34	305,43	27	27	27	27	41	41	42	44

O comportamento da função objetivo foi parecido entre os diversos valores do parâmetro N , exceto para a $N = 500$ nas semanas 21 e 26.

Não houve nenhuma ocorrência de zero retalhos. Em relação ao número de objetos utilizados, apenas na semana 3 para $N = 500$ e na semana 27, que o número de objetos utilizados foi diferente das demais ocorrências.

No Gráfico 6.8 é mostrada a perda acumulada em milímetros para o aço VND de diâmetro 25,4 mm.

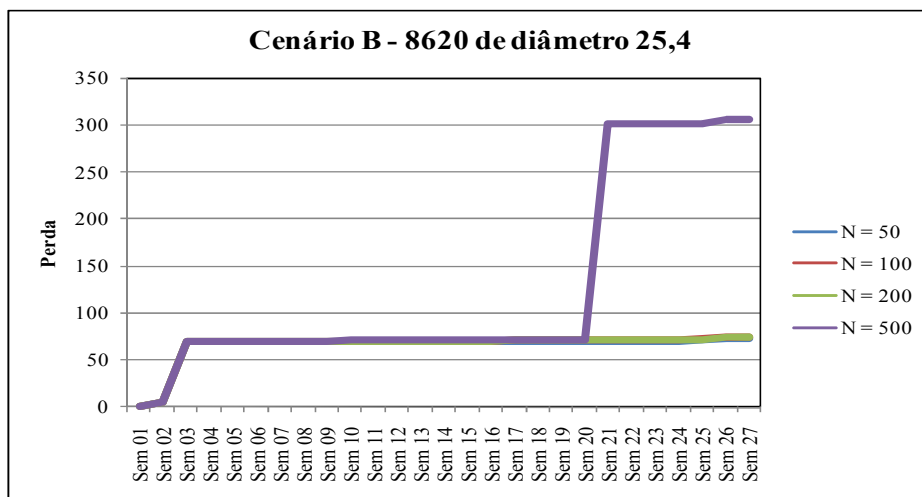


Gráfico 6.8 - Cenário B – perda acumulada, em milímetros, do aço 8620 de diâmetro 25,4.

As curvas para N igual a 50, 100 e 200 se sobrepõem pela proximidade de seus valores. O mesmo acontece para $N = 500$ até a semana 20.

Segue na Tabela 6.10 o tempo de execução do modelo no cenário B. Em nenhuma das ocorrências, o modelo precisou ser interrompido por exceder o tempo limite de 15 minutos para o aço D6 de diâmetro 31,75. O mesmo não aconteceu para o aço VND de diâmetro 25,4 (foram 62 interrupções) e nem para o aço 8620 de diâmetro 25,4 (2 interrupções).

Novamente o aço VND de diâmetro 25,4 apresentou muitas interrupções. As ocorrências interrompidas para o cenário B foram novamente executadas, mas sem tempo limite. O tempo médio de execução foi de 2 horas e 45 minutos. A solução ótima encontrada depois da execução sem limite de tempo foi a mesma da solução interrompida em 91,9% dos casos. No restante, a variação entre a solução ótima e a solução interrompida variou 51%.

Como o número de interrupções para o aço 8620 de diâmetro 25,4 mm foi baixo, as ocorrências interrompidas não foram executadas posteriormente sem limite de tempo.

Tabela 6.10 - Tempo (em segundos) de execução do modelo para o cenário B.

Semana	VND - diâmetro 25,4				D6 - diâmetro 31,75				8620 - diâmetro 25,4			
	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500	N=50	N=100	N=200	N=500
01	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
02	1	1	2	1	193	298	728	5	496	329	900*	46
03	900*	900*	135	900*	10	1	1	8	3	4	3	3
04	3	4	52	9	16	13	24	6	0	0	0	0
05	900*	900*	900*	900*	1	2	3	6	0	0	0	0
06	900*	900*	900*	900*	48	52	12	28	0	0	0	0
07	900*	900*	900*	900*	17	50	26	28	0	0	0	0
08	900*	900*	900*	900*	30	1	14	29	0	0	0	0
09	24	2	900*	900*	495	68	488	305	0	0	0	0
10	900*	900*	900*	900*	1	1	22	1	1	1	0	0
11	573	597	650	44	3	12	20	16	1	1	1	1
12	900*	900*	900*	900*	30	79	46	31	0	0	0	0
13	900*	11	19	56	23	26	3	2	0	0	0	0
14	900*	900*	900*	900*	1	1	1	2	0	1	0	1
15	900*	900*	900*	900*	2	9	4	27	1	1	0	1
16	900*	119	238	364	1	1	2	1	8	2	1	3
17	3	6	4	7	1	1	1	1	0	0	0	0
18	900*	900*	900*	900*	25	2	40	3	0	0	0	0
19	900*	900*	900*	900*	5	30	5	28	0	0	0	1
20	199	302	319	157	50	121	412	165	0	0	0	0
21	900*	900*	900*	900*	24	21	1	6	0	0	0	0
22	900*	900*	900*	900*	2	1	7	5	1	1	1	1
23	900*	900*	900*	900*	4	6	4	11	0	0	0	0
24	5	24	19	7	2	3	3	5	20	789	310	245
25	900*	900*	900*	274	1	2	1	1	0	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	900*	231	596	94
27	1	2	2	1	1	1	19	6	0	0	0	0
Total	16.110	14.569	14.941	14.421	988	804	1889	728	1.431	1.361	1.813	397

6.5 Comparação do modelo com os dados reais

Será feita uma comparação entre os três aços analisados nos cenários A e B com os dados reais da empresa para avaliar a redução da perda com a aplicação do modelo.

No sistema de informação da empresa é registrado a cada faturamento um número referente à origem do objeto de estoque. Entretanto, esse número pode ser o mesmo para mais de uma barra. Quando um lote chega do fornecedor, ele recebe um número, denominado de bloco. O número do bloco indica qual referência do fornecedor deve constar no certificado de garantia e é através dele que a baixa de estoque é feita no sistema computacional.

O cenário real da empresa será estimado através do número do bloco e da sequência da data de faturamento. É uma boa aproximação tendo em vista que o sistema de informação da empresa AçoX ainda é precário e não identifica barra por barra. Com a implantação do ERP, o controle do estoque será mais eficiente.

O valor do parâmetro N , comprimento mínimo que o retalho pode assumir para não ser considerado como uma perda, será igual a 50, 100, 200, 500 e de acordo com o valor mínimo solicitado na semana (N variando). O valor do parâmetro R , número máximo de retalhos produzidos, não será limitado.

Os dados reais serão comparados com um caso do cenário B, no qual o valor de N será definido pelo tipo de aço (informado pelo chefe da oficina da empresa AçoX) e o valor de R será igual a 1, justificado pelas análises do cenário A e pela perspectiva do chefe da oficina.

Os valores da perda para os aços VND de diâmetro 25,4, aço D6 de diâmetro 31,75 e aço 8620 de diâmetro 25,4 serão apresentados respectivamente nas Tabela 6.11, Tabela 6.12 e Tabela 6.13.

A perda total para o aço VND de diâmetro 25,4 no período dos seis primeiros meses de 2008 seria de 6.611 milímetros com o modelo, considerando o cenário B com $N = 500$ e $R = 1$. O chefe de oficina foi consultado para fazer a escolha do valor de N para o cenário B. O valor limite entre o que será perda e o que será retalho depende do tipo de aço, não existe um número padrão, pois cada aço tem um comportamento de demanda diferente.

A perda real em milímetros para o aço VND de diâmetro 25,4 considerando os dados reais com os mesmos parâmetros foi de 19.576 milímetros. Se o modelo tivesse sido utilizado a redução na perda seria significativa e igual a 66,2%.

Tabela 6.11 - Dados reais – Aço VND de diâmetro 25,4: perda.

Semana	N = 50	N = 100	N = 200	N = 500	N variando
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	199	1.694	0
4	0	0	266	266	100
5	32	107	107	307	32
6	0	483	483	1.099	483
7	0	0	250	1.115	0
8	0	375	496	496	0
9	0	56	347	347	56
10	6	6	116	416	6
11	195	195	343	343	195
12	0	0	100	600	300
13	0	100	100	100	100
14	17	67	184	635	635
15	6	116	240	1.410	6
16	67	335	435	1.335	20
17	0	120	120	990	120
18	0	0	390	390	0
19	58	58	158	438	158
20	10	110	250	1.500	110
21	64	204	362	1.202	204
22	63	63	163	1.363	0
23	0	0	0	500	2.179
24	55	55	780	1.623	55
25	0	0	0	200	1.450
26	99	151	151	1.109	151
27	48	98	98	98	0
Total	720	2.699	6.138	19.576	6.360

No Gráfico 6.9 é mostrada a perda acumulada em milímetros dos dados reais para o aço VND de diâmetro 25,4.

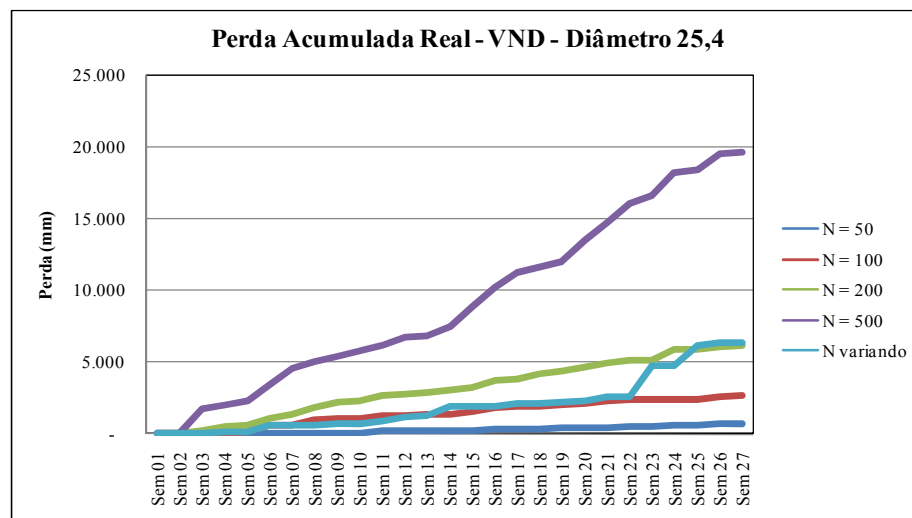


Gráfico 6.9 - Perda real acumulada para diferentes valores de N – aço VND de diâmetro 25,4.

Segue na Tabela 6.12 a perda em milímetros dos dados reais para o aço D6 de diâmetro 31,75.

Tabela 6.12 - Dados reais – Aço D6 de diâmetro 31,75: perda.

Semana	N = 50	N = 100	N = 200	N = 500	N variando
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	232	0
3	0	0	0	545	0
4	25	90	205	205	25
5	21	21	180	580	21
6	0	0	0	0	0
7	54	54	54	254	54
8	40	40	40	640	40
9	60	120	120	520	120
10	5	5	5	485	5
11	0	72	72	72	72
12	7	7	171	171	7
13	41	41	141	141	0
14	0	0	195	195	0
15	90	261	261	561	165
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	2.000
18	0	0	100	100	0
19	2	2	182	182	2
20	0	0	0	260	0
21	24	24	24	262	24
22	28	28	213	413	28
23	66	218	318	546	66
24	0	0	0	200	0
25	0	80	80	680	0
26	12	12	12	12	12
27	35	35	160	160	35
Total	510	1.110	2.533	7.416	2.676

A perda total para o aço D6 de diâmetro 31,75 no período dos seis primeiros meses de 2008 seria de 52 milímetros com o modelo, considerando o cenário B com $N = 100$ e $R = 1$. A perda real para esse aço considerando os dados reais com os mesmos parâmetros foi de 1.110 milímetros. Se o modelo tivesse sido utilizado a redução na perda seria significativa e igual a 95,3%.

No Gráfico 6.10 é mostrada a perda acumulada em milímetros para diferentes valores de N para o aço D6 de diâmetro 31,75.

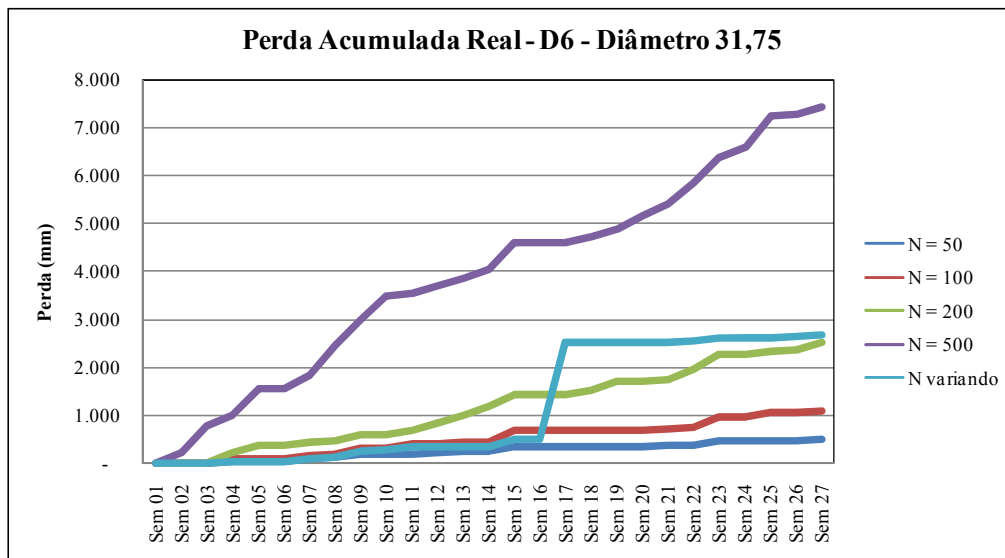


Gráfico 6.10 - Perda real acumulada para diferentes valores de N – aço D6 de diâmetro 31,75.

Segue na Tabela 6.13 a perda dos dados reais para o aço D6 de diâmetro 31,75.

Tabela 6.13 - Dados reais – Aço 8620 de diâmetro 25,4: perda.

Semana	N = 50	N = 100	N = 200	N = 500	N variando
1	0	0	0	0	500
2	20	20	20	1.123	20
3	0	0	0	265	0
4	2	2	2	459	2
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	209	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	36	36	36	36	36
10	0	0	162	442	0
11	43	43	147	147	43
12	34	34	34	34	34
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	353	0
17	0	50	50	545	50
18	0	75	75	75	0
19	32	32	218	218	32
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	14	14	14	14	14
24	0	0	0	429	0
25	0	0	0	321	0
26	0	140	140	706	50
27	0	0	0	0	0
Total	181	446	898	5.376	781

No Gráfico 6.11 é mostrada a perda acumulada em milímetros para diferentes valores de N para o aço D6 de diâmetro 31,75.

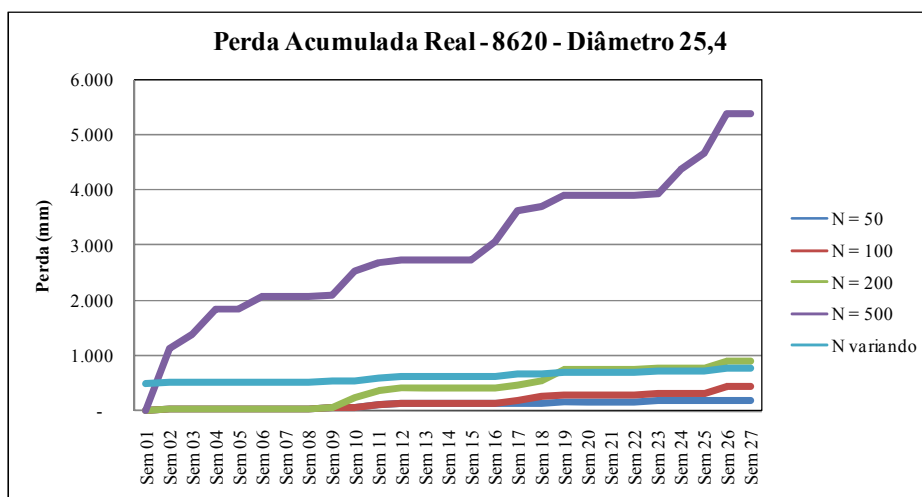


Gráfico 6.11 - Perda real acumulada para diferentes valores de N – aço 8620 de diâmetro 25,4.

A perda total para o aço 8620 de diâmetro 25,4 no período dos seis primeiros meses de 2008 seria de 72 milímetros com o modelo, considerando o cenário B com $N = 100$ e $R = 1$. A perda real para esse aço considerando os dados reais com os mesmos parâmetros foi de 446 milímetros. Se o modelo tivesse sido utilizado a redução na perda seria significativa e igual a 83,9%.

O resumo da redução da perda com o modelo dos três aços é mostrado na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Redução da perda com o modelo.

Aço	Diâmetro	Redução
VND	25,4	66,2%
D6	31,75	95,3%
8620	25,4	83,9%

Além da perda acumulada, outra comparação a ser feita entre o modelo é a quantidade de objetos utilizados. Quanto maior o número de objetos, maior será o tempo de preparação das máquinas e de movimentação das barras. Apesar de não estarmos considerando o tempo de preparação como uma variável importante, um menor número de objetos utilizados pode indicar

um maior número de objetos inteiros não utilizados e, por tanto, se tiver uma demanda do tamanho do objeto, ela poderá ser atendida com maior probabilidade.

A diferença entre o número de objetos entre o cenário B escolhido e os dados reais para o aço VND de diâmetro 25,4 é apresentada no Gráfico 6.12.

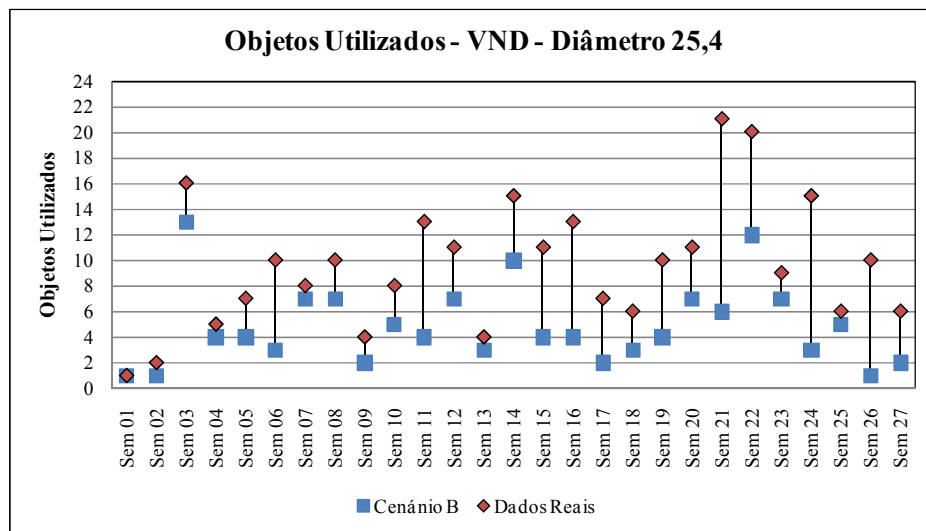


Gráfico 6.12 - Comparação entre o número de objetos utilizados – aço VND de diâmetro 25,4.

Em todos os casos, o número de objetos utilizados pelo modelo no cenário B com parâmetros $N = 100$ e $R = 1$ foi menor ou igual ao número de objetos utilizados nos dados reais. A maior diferença, de 15 objetos, ocorreu na semana 21 para o aço VND de diâmetro 25,4.

A diferença entre o número de objetos entre o cenário B escolhido e os dados reais para o aço D6 de diâmetro 31,75 é apresentada no Gráfico 6.13.

Novamente, em todos os casos, o número de objetos utilizados pelo modelo no cenário B com parâmetros $N = 100$ e $R = 1$ foi menor ou igual ao número de objetos utilizados nos dados reais. O caso de diferença extrema para o aço D6 de diâmetro 31,75 foi na semana 15, na qual pelo cenário B foi utilizado 3 objetos e nos dados reais, 12.

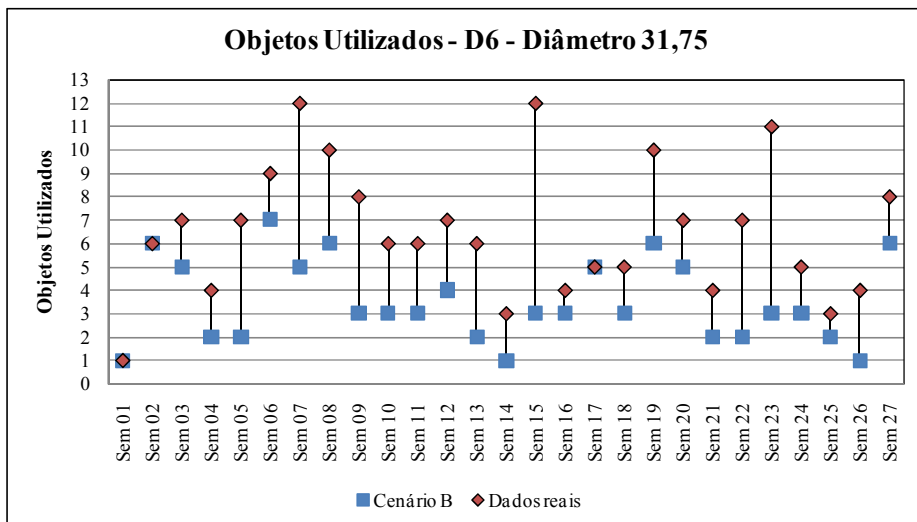


Gráfico 6.13 - Comparação entre o número de objetos utilizados – aço D6 de diâmetro 31,75.

A diferença entre o número de objetos entre o cenário B escolhido e os dados reais para o aço D6 de diâmetro 31,75 é apresentada no Gráfico 6.14.

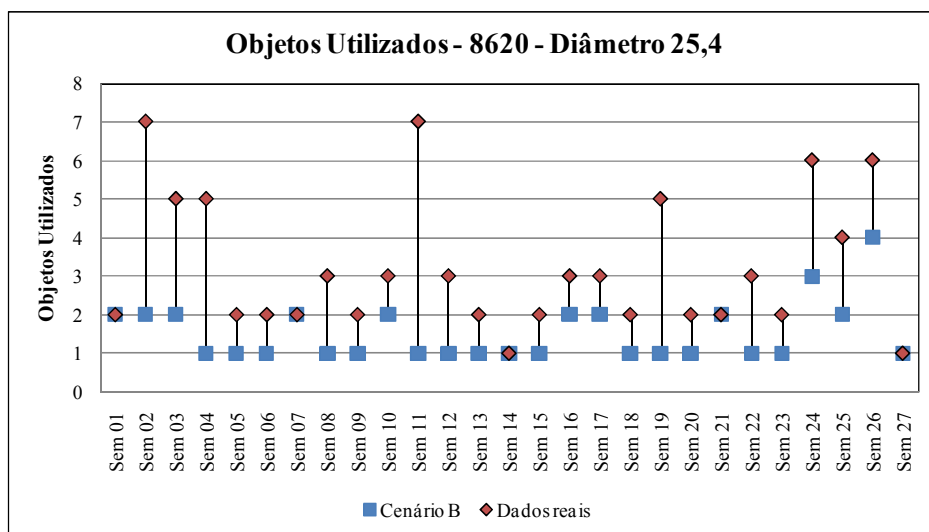


Gráfico 6.14 - Comparação entre o número de objetos utilizados – aço 8620 de diâmetro 25,4.

Não diferente do comportamento dos outros dois aços, o número de objetos utilizados para o aço 8620 de diâmetro 25,4 no modelo é sempre menor ou igual aos dados reais. A maior diferença foi na 11ª semana com 6 objetos.

6.6 Expansão

Será realizada uma expansão da aplicação do modelo para outros tipos de aço e outras dimensões. Para isso, foi escolhida aleatoriamente uma semana no período do primeiro semestre de 2008: a semana 15. Como a empresa trabalha com muitos tipos de aço, são considerados apenas os cinco aços mais vendidos pela empresa, os quais representam 75% em volume das vendas. Os aços são: 1045, 4140, 8260, D6 e VND. Cada dimensão da seção transversal de cada aço será considerada como um item, pois seu estoque e sua demanda são diferentes das outras. Para esses cinco tipos de aço, tanto no perfil da seção transversal redondo ou retangular, foram totalizados 293 itens, dos quais 87 são do aço D6, 68 do aço 1045, 64 do aço VND, 39 do aço 8620 e 35 do aço 4140.

Apesar de serem os aços mais vendidos em volume e faturamento com um número grande de pedidos durante as semanas, nem todos os itens possuem dados relevantes ao problema de corte, como por exemplo quantidade de pedidos menor ou igual a dois e/ou quantidade de objetos de estoque igual a um. Do total de 293, 162 itens são irrelevantes ou de seção transversal retangular e serão desconsiderados das análises.

Segue na Tabela 6.15 o valor da perda em milímetros e o número de objetos utilizados pelo modelo e pela aproximação dos dados reais para os itens selecionados dos cinco aços mais vendidos pela empresa de seção transversal da barra de perfil redondo. Os dados foram organizados por ordem crescente do valor da perda do modelo.

Tabela 6.15 - Resultados para os 5 aços principais para a semana 15.

Id	Aço	Diâmetro	N	Tempo	FO	Objetos - Modelo	Perda real	Objetos - Real
1	VND	254,00	500	94	0,01	6	0	6
2	VND	139,70	500	260	0,01	7	0	12
3	D6	82,55	100	1	0,01	3	7	6
4	8620	139,70	100	15	0,01	7	17	10
5	VND	215,90	500	227	0,01	2	53	6
6	D6	279,40	100	1	0,01	2	154	6
7	8620	66,67	100	2	0,02	1	4	5
8	D6	330,20	100	1	0,02	1	77	6
9	4140	44,45	100	2	0,03	7	3	8
10	D6	9,53	100	1	0,03	7	52	10
11	1045	44,45	200	2	0,03	4	65	5

Tabela 6.15 (cont)

Id	Aço	Diâmetro	N	Tempo	FO	Objetos - Modelo	Perda real	Objetos - Real
12	D6	203,20	100	1	0,03	8	102	11
13	1045	228,60	200	1	0,03	1	164	3
14	8620	25,40	100	1	0,04	1	0	2
15	1045	69,85	200	1	0,04	4	55	5
16	D6	304,80	100	30	0,04	3	76	4
17	1045	34,92	200	2	0,04	1	82	3
18	VND	69,85	500	1	0,04	6	88	8
19	8620	22,22	100	2	0,04	7	95	10
20	8620	190,50	100	2	0,04	7	104	10
21	1045	88,90	200	119	0,04	3	145	6
22	D6	190,50	100	1	0,04	1	155	6
23	1045	9,53	200	2	0,04	2	684	6
24	1045	120,65	200	1	0,05	5	0	10
25	8620	127,00	100	1	0,05	2	7	6
26	D6	177,80	100	900*	0,05	8	9	8
27	D6	73,02	100	1	0,05	7	38	12
28	D6	215,90	100	1	0,05	6	51	7
29	D6	31,75	100	9	0,05	3	261	12
30	VND	25,40	500	900*	9,03	4	1.410	11
31	1045	177,80	100	1	13,05	2	673	2
32	VND	57,15	500	1	14,05	1	69	5
33	VND	114,30	500	2	16,04	6	423	8
34	D6	76,20	100	83	18,03	1	680	2
35	8620	82,55	100	82	19,11	1	69	1
36	1045	38,10	200	2	20,03	6	115	8
37	1045	95,25	200	12	24,07	3	596	8
38	4140	34,92	100	1	25,03	4	315	4
39	VND	15,87	500	282	26,08	2	31	6
40	8620	215,90	100	2	27,06	7	308	8
41	D6	254,00	100	2	29,05	6	526	7
42	4140	82,55	100	1	34,11	4	308	4
43	8620	76,20	100	1	36,03	6	645	7
44	1045	19,05	200	2	37,08	6	584	9
45	D6	15,87	100	2	38,04	2	91	2
46	1045	101,60	200	1	41,10	2	342	6
47	1045	41,27	200	2	42,07	3	173	7
48	D6	114,30	100	2	45,06	7	305	7
49	VND	165,10	500	1	47,11	1	204	1
50	VND	95,25	500	2	49,11	5	231	6
51	D6	152,40	100	206	50,06	4	489	8
52	VND	177,80	500	2	51,04	4	390	8
53	VND	88,90	500	1	55,05	3	208	4
54	D6	88,90	100	2	56,07	3	234	7
55	D6	63,50	100	2	60,11	8	78	8
56	VND	38,10	500	235	63,06	3	130	7
57	8620	88,90	100	187	63,11	7	186	8
58	8620	101,60	100	1	64,10	2	624	5
59	D6	44,45	100	1	66,10	8	546	9
60	8620	165,10	100	1	73,03	3	505	7
61	4140	15,87	100	2	73,05	6	472	9

Tabela 6.15 (cont)

Id	Aço	Diâmetro	N	Tempo	FO	Objetos - Modelo	Perda real	Objetos - Real
62	1045	190,50	200	296	74,11	6	498	8
63	1045	22,22	200	900*	81,02	7	434	11
64	1045	107,95	200	12	81,05	8	486	9
65	D6	241,30	100	176	82,01	6	621	6
66	VND	101,60	500	34	84,04	8	562	10
67	8620	57,15	100	2	86,05	5	113	8
68	1045	203,20	200	2	87,07	4	439	7
69	8620	107,95	100	84	87,09	2	597	5
70	VND	190,50	500	157	89,10	8	678	10
71	8620	95,25	100	117	91,06	7	524	12
72	8620	120,65	100	1	94,06	1	305	2
73	4140	31,75	100	2	95,10	6	612	11
74	4140	38,10	100	2	96,02	5	633	5
75	1045	165,10	200	230	105,03	3	562	8
76	1045	15,87	200	194	107,09	2	373	6
77	8620	12,70	100	2	107,11	4	653	8
78	1045	215,90	200	1	108,01	5	636	5
79	1045	114,30	200	1	109,04	6	642	8
80	VND	107,95	500	900*	109,07	5	161	9
81	D6	165,10	100	1	109,08	6	506	8
82	D6	95,25	100	2	112,05	4	179	8
83	VND	31,75	500	106	114,03	4	499	5
84	1045	12,70	200	2	114,05	7	208	9
85	1045	222,25	200	1	116,05	6	657	8
86	1045	31,75	200	2	117,04	4	630	8
87	D6	53,97	100	70	117,06	2	435	6
88	D6	127,00	100	2	119,07	8	397	13
89	1045	254,00	200	900*	119,11	1	139	2
90	4140	22,22	100	89	120,02	2	251	4
91	1045	82,55	200	40	124,09	5	284	7
92	D6	139,70	100	1	125,03	7	600	12
93	VND	82,55	500	1	125,09	7	219	7
94	8620	203,20	100	275	126,10	1	149	2
95	VND	127,00	500	2	128,03	6	609	11
96	8620	34,92	100	11	129,07	1	690	5
97	1045	63,50	200	1	129,11	7	366	8
98	D6	101,60	100	1	133,03	1	358	5
99	VND	44,45	500	126	139,08	5	379	6
100	1045	152,40	200	2	139,09	7	680	12
101	4140	63,50	100	234	140,06	1	523	6
102	4140	101,60	100	2	146,08	3	655	6
103	1045	53,97	200	2	147,06	6	430	11
104	1045	28,57	200	1	147,10	4	318	9
105	VND	63,50	500	2	154,10	3	365	4
106	8620	38,10	100	1	157,06	6	390	10
107	8620	63,50	100	2	157,09	7	451	10
108	D6	355,60	100	2	158,04	3	598	4
109	8620	15,87	100	1	161,05	7	556	10
110	1045	139,70	200	1	161,10	3	525	3

Tabela 6.15 (cont)

Id	Aço	Diâmetro	N	Tempo	FO	Objetos - Modelo	Perda real	Objetos - Real
111	8620	279,40	100	106	162,04	6	674	6
112	1045	25,40	200	2	166,06	1	184	4
113	VND	76,20	500	262	173,05	6	496	6
114	8620	69,85	100	1	173,07	4	483	4
115	8620	114,30	100	189	173,07	1	507	1
116	D6	57,15	100	16	174,07	8	592	13
117	4140	28,57	100	2	174,09	4	221	8
118	VND	28,57	500	104	175,01	3	205	3
119	VND	9,53	500	1	175,09	4	196	4
120	VND	34,92	500	1	179,08	3	354	5
121	1045	127,00	200	5	180,06	6	315	10
122	VND	152,40	500	1	180,08	6	665	10
123	8620	28,57	100	1	182,09	3	251	6
124	D6	228,60	100	21	184,03	1	412	6
125	1045	50,80	200	2	185,09	1	456	1
126	4140	88,90	100	64	188,08	5	286	8
127	8620	152,40	100	1	189,11	4	530	8
128	8620	19,05	100	24	191,09	2	442	3
129	8620	177,80	100	1	193,02	6	322	10
130	1045	76,20	200	2	194,04	8	363	11
131	8620	41,27	100	1	257,03	5	467	9
Total					10.891,57	571	45.504	911

O modelo teve que ser interrompido por exceder o tempo limite de quinze minutos em apenas 5 dos 131 tipos de aços escolhidos para a expansão do modelo. Como esse número não foi expressivo, a aplicação de uma heurística (método de busca de soluções adequadas e próximas da ótima) não se faz necessária.

Com a utilização do modelo a perda da empresa para esses 131 itens seria de 10.884 milímetros. Esse valor foi obtido da soma da parte inteira dos resultados da função objetivo, desconsiderando as casas decimais, pois estas representam a porcentagem de barras utilizadas. A perda real para os mesmos itens foi de 45.504 milímetros.

A redução total da perda para todos os 131 itens considerados na 15ª semana de 2008 foi de 76,1%.

Segue no Gráfico 6.15 a perda real acumulada e a perda acumulada pelo modelo referente à 15ª semana para os 131 itens dos cinco aços mais vendidos pela empresa.

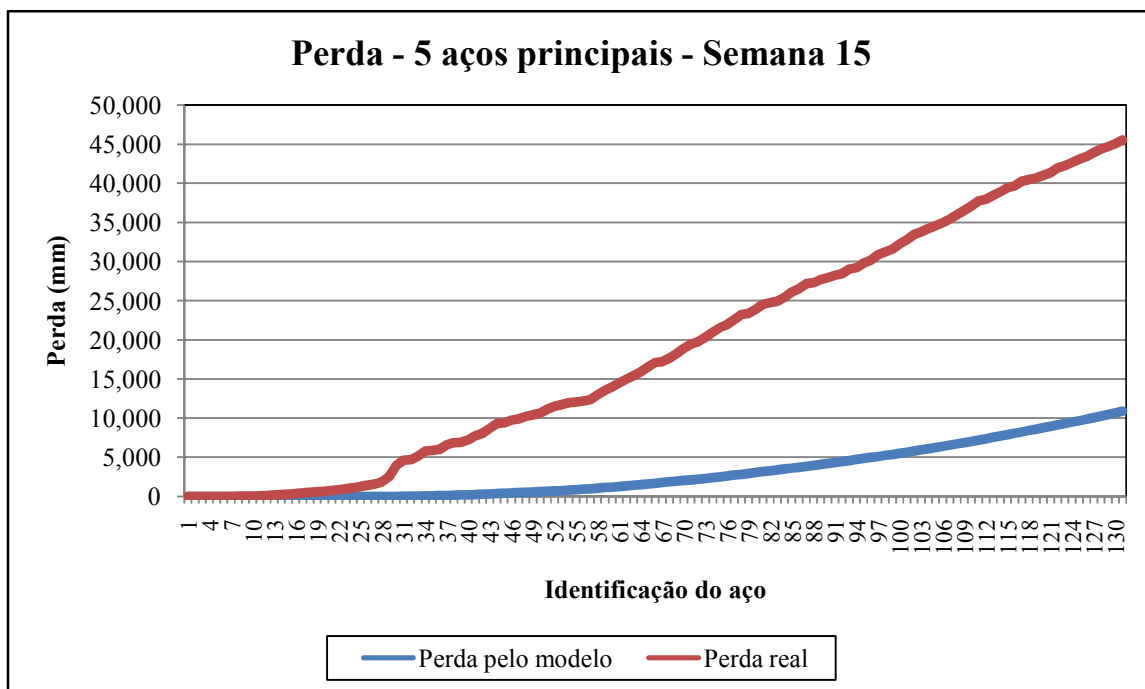


Gráfico 6.15 - Perda para os aços mais vendidos na semana 15.

No Gráfico 6.16 é apresentada a diferença entre o número de barras utilizadas pelo modelo e nos dados reais para cada um dos itens.

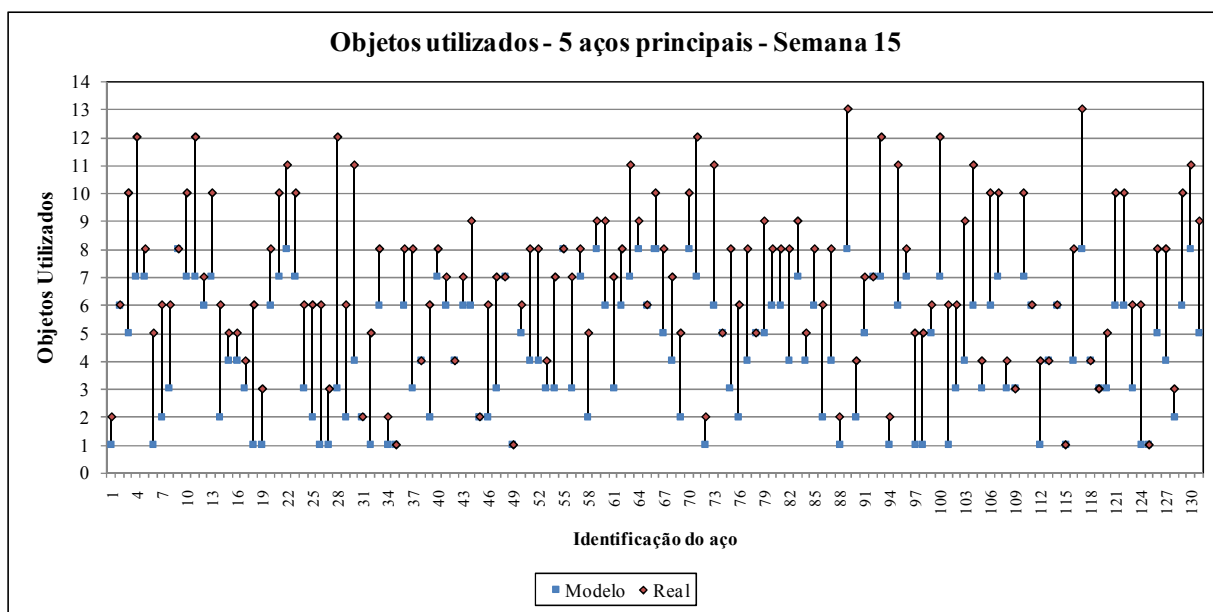


Gráfico 6.16 - Número de objetos utilizados para os aços mais vendidos na semana 15.

O número de objetos usados foi sempre menor ou igual no modelo em relação ao real. Esse fato ajuda a justificar o resultado significativo da redução da perda. Quanto maior o número de barras utilizadas, menos otimizado é o corte e maior a chance da sobra ser uma perda e não um retalho.

Encerra-se aqui as análises e resultados computacionais. A perspectiva de continuação deste estudo é apresentada no próximo capítulo, assim como uma síntese e destaques do trabalho.

7 CONCLUSÃO

Este capítulo finaliza este trabalho de formatura com uma síntese do trabalho, com os principais destaques e críticas e, por fim, sugestões para futura continuação deste estudo.

7.1 Síntese

O processo de corte consiste em cortar um material maior em pedaços menores de acordo com uma solicitação, seja ela diretamente do cliente, ou de outro processo interno da empresa. A produção de retalhos e perdas é inevitável neste processo e, em muitas situações, torna-se um custo significativo para a empresa.

Normalmente, as empresas têm dificuldade em enxergar esse problema e adotam como método a própria experiência de seus funcionários. Este é o caso da AçoX, uma empresa pequena que revende aço cortado para seus clientes.

A otimização no processo de corte reduz custos de matéria-prima perdida, melhora qualidade do estoque, reduz tempo da tarefa de escolher o material, entre outros benefícios.

Neste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre o problema de corte unidimensional, um problema presente na empresa AçoX. Foi escolhido o modelo que mais se aproximou da realidade da AçoX e, baseado neste modelo, foi feita a modelagem no programa *What's Best*. Com a modelagem pronta, foram simulados dois cenários para verificar o comportamento dos dados frente a diferentes parâmetros para três tipos de aço escolhidos aleatoriamente entre os mais vendidos pela empresa. Posteriormente, os resultados do modelo foram comparados com os dados reais da empresa, ainda para os três tipos de aço. Por fim, foi escolhido um único período (aleatoriamente a semana 15) para a realização da expansão do modelo para as principais dimensões dos cinco principais tipos de aço vendidos pela empresa, os

quais representam 75% das vendas em volume. Esses resultados foram comparados com os dados reais da AçoX, e, no total, a redução da perda foi significativa e igual a 76,1%.

7.2 *Destaques e críticas*

Quando as empresas visam aumentar seus lucros, a primeira coisa que é pensada é a redução de custos, sejam eles ligados aos recursos materiais ou humanos. Uma alteração no processo, nos hábitos dos funcionários pode trazer um grande benefício. Foi pensando em uma pequena alteração no processo da AçoX que um estudo foi feito, visando a redução de custos e uma melhor estruturação do processo de corte.

Uma das principais dificuldades encontrada na realização do trabalho foi a má estruturação da base de dados da empresa AçoX. O sistema computacional utilizado na empresa é antigo e fragmentado. Além disso, o responsável pela manutenção do sistema computacional é um funcionário de uma empresa terceirizada e seus serviços não estão disponíveis a qualquer momento.

Apesar dos problemas enfrentados com o banco de dados, foi possível aplicar o modelo em alguns tipos de aço comparando-os assim com o desempenho real da empresa no primeiro semestre de 2008.

Determinadas dimensões de alguns tipos de aços não possuem pedidos suficientes para que haja a necessidade da aplicação do modelo. Como as informações de todos os aços estarão agrupadas nas mesmas tabelas de origem, não haverá obrigatoriedade de separar os itens irrelevantes ao aplicar o modelo.

Depois que o modelo for aprovado pela empresa para implantação, será necessário fornecer um pequeno treinamento para alguns funcionários e explicitar o que mudará nas suas atividades de rotina.

Uma pessoa deverá ser responsável pelo funcionamento e execução do modelo na empresa. Um dos vendedores poderia ser o escolhido ou então, o próprio chefe da oficina. É mais

recomendado que um vendedor assuma essa função, pois eles têm maior contato e familiaridade com o computador. Para que não haja problema quando o vendedor responsável estiver ausente, é aconselhável que todos os outros vendedores também tenham conhecimento do modelo.

Seria ideal a inclusão de um campo extra na própria ordem de fabricação, OF, para identificação do objeto a ser utilizado para o corte. Assim, o chefe da oficina facilmente visualizará o objeto a ser utilizado para cada OF. Como já é de uso da empresa adotar números para identificar os objetos de estoque devido ao certificado de garantia que contém o número de série informado pelo fornecedor, o chefe da oficina não terá dificuldades para localizar o objeto sugerido pelo modelo.

Se a sugestão do modelo realmente for vinculada com a ordem de fabricação de cada pedido, o vendedor responsável ficará encarregado de imprimir todas as OF's ou de repassá-las aos outros vendedores. Se uma lista separada da OF for gerada com todos os resultados do modelo e passada diretamente ao chefe da oficina, os vendedores continuam imprimindo suas próprias OF's sem alteração.

Como a empresa está passando por um processo de mudança de sistema computacional, a inclusão dos resultados do modelo na OF pode ser facilmente adaptada, uma vez que a estruturação do ERP está em desenvolvimento até o final de 2008.

Segue na Figura 7.1 uma sugestão na alteração do fluxo de processo. Entre as atividades 2 e 3 será inserida a atividade A, na qual será executado o modelo para obter o objeto de estoque a ser escolhido. A atividade 6 deve ser excluída, pois não há necessidade do chefe de oficina escolher o objeto de estoque. Essa atividade poderia ser substituída pela validação dos resultados do modelo pelo chefe de oficina.

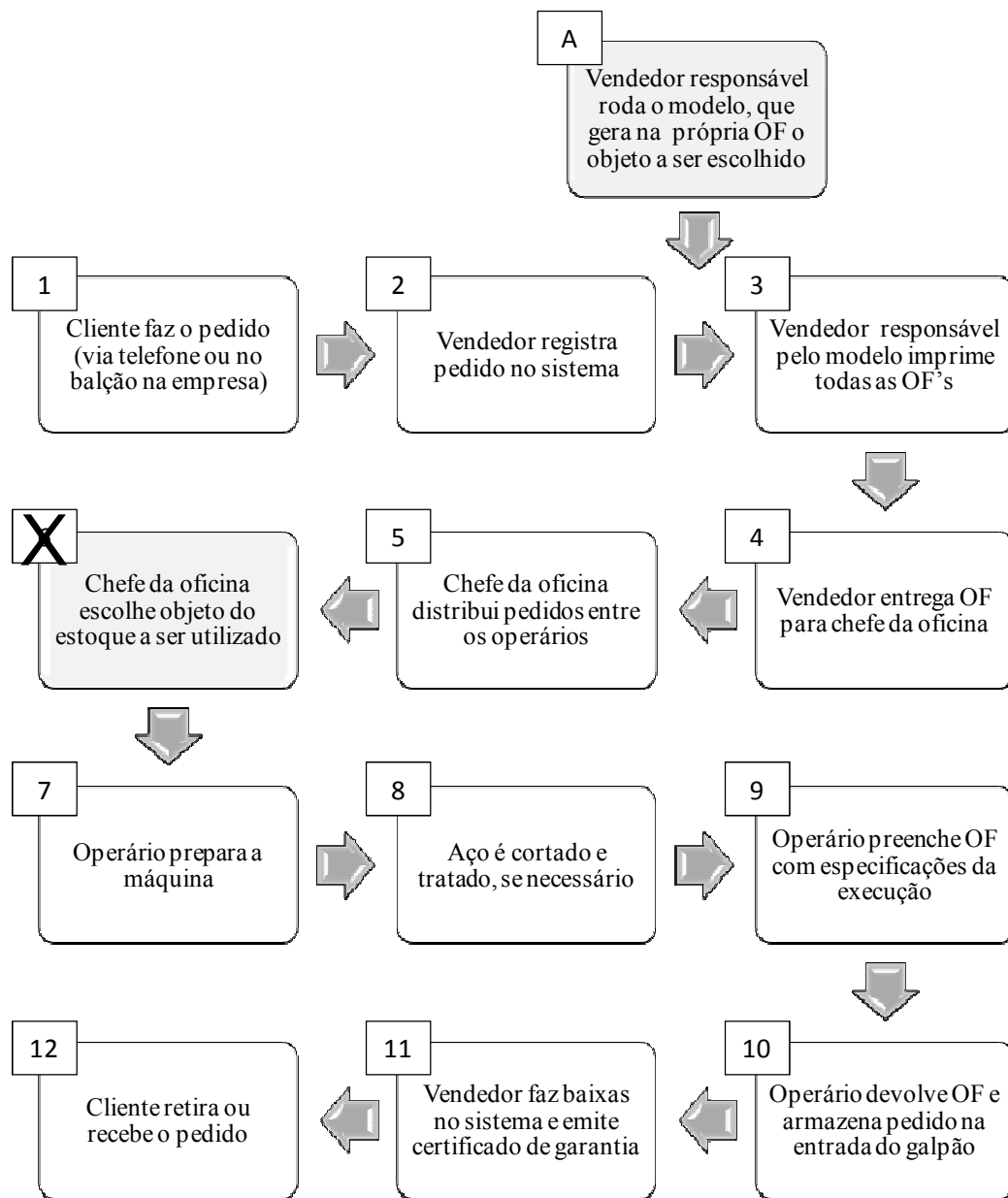


Figura 7.1 - Processo com alteração devido à implantação do modelo.

7.3 Desdobramentos

O primeiro passo da aplicação do modelo, depois de validada sua modelagem, foi a execução do modelo para os três itens escolhidos. Posteriormente, foi feita a expansão para os cinco principais aços de perfil redondos. Para a continuação deste trabalho deverá ser aplicado o modelo para os demais tipos de aço de perfil redondo e para os retangulares no âmbito da unidimensionalidade.

Como eventualmente são feitos cortes internos em aços de perfil retangular, o estudo pode ser aprofundado e estendido para a determinação da altura e largura dos cortes, ou seja, para o problema de corte bidimensional. O problema de corte bidimensional terá maior relevância quando o estoque da empresa for reduzido para uma menor variedade das dimensões das barras, mas ao mesmo tempo, com barras de maior tamanho. Apenas com barras de maior dimensão, fica fácil de atender a demanda e também de fazer a gestão de compra do estoque.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM Handbook Volume 01: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Ohio: ASM, 1990. 1v.

ABUABARA, A. **Otimização no Corte de Tubos Estruturais: Aplicação na Indústria Aeronáutica Agrícola.** 2006. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

ABUABARA, A.; MORABITO, R., **Otimização do Corte de Tubos da Indústria Aeronáutica Agrícola.** In: ENEGEP, XXVI, 2006 Fortaleza – CE (2006).

ABUABARA, A.; MORABITO, R., **Modelo de Otimização de Corte Unidimensional Aplicado à Fabricação de Aeronaves Agrícolas.** In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 39, 2007 Fortaleza – CE (2007).

ARENALES, M.N *et al.* **Pesquisa Operacional.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

CHERRI, A. C. **O Problema de Corte de Estoque com Reaproveitamento das Sobras de Material.** 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado) – ICMC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Diferro Comércio e Representações Ltda. Disponível em <<http://www.diferro.com.br>> Acesso em 12 de setembro de 2008.

DYCKHOFF, H. (1990). **A Typology of Cutting and Packing Problems.** *European Journal of Operational Research*, **44**, 145-159.

GRADISAR, M.; JESENKO, J.; RESINOVIC, C. (1997). **Optimization of Roll Cutting in Clothing Industry.** *Computers & Operation Research*, **10**, 945-953.

GRADISAR, M.; KLJAJIC, M.; RESINOVIC, C.; JESENKO, J. (1999a). **A Sequential Heuristic Procedure for One-dimensional Cutting.** *European Journal of Operational Research*, **114**, 557-568.

GRADISAR, M.; RESINOVIC, C.; KLJAJIC, M. (1999b). **A Hybrid Approach for Optimization of One Dimensional Cutting**. *European Journal of Operational Research*, **119**, 719-728.

GRADISAR, M.; RESINOVIC, C.; KLJAJIC, M. (2002). **Evaluation of Algorithms for One-dimensional Cutting**. *Computer & Operations Research*, **29**, 1207-1220.

Infomet. Disponível em <<http://www.infomet.com.br/siderurgia.php>> Acesso em 07 de outubro de 2008.

Instituto Brasileiro de Siderurgia. Disponível em <<http://www.ibs.org.br>> Acesso em 07 de maio de 2008.

Lindo System Inc. Disponível em <<http://lindo.com/products/wb/wbm.html>> Acesso em 22 de junho de 2008.

OZDEN, M. (1988). **A Solution Procedure for General Knapsack Problems with a Few Constraints**. *Computer & Operations Research*, **15**, 145-155.

WILLIAMS, H.P. **Model Building in Mathematical Programming**. 4^a ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ARENALES, M.; MORABITO, R. (1995). **An And/Or-graph Approach to the Solution of Two-dimensional Non-guillotine Cutting Problems.** *European Journal of Operational Research*, **84**, 599-617.

DOWSLAND, K.A.; DOWSLAND, W.B. (1992). **Packing Problem.** *European Journal of Operational Research*, **56**, 2-14.

LI, V.; CURRY, G. (2005). **Solving Multidimensional Knapsack Problems with Generalized Upper Bound Constraints Using Critical Event Tabu Search.** *Computer & Operations Research*, **32**, 825-848.

PILEGGI, G.C.F.; MORABITO, R.; ARENALES, M.N. (2005). **Abordagens para Otimização Integrada dos Problemas de Geração e Seqüenciamento de Padrões de Corte: Caso Unidimensional.** *Pesquisa Operacional*, **25**(3), 417-447.

PUREZA, V., MORABITO, R., **Estudos para uma Nova Heurística para Resolução do Problema do Carregamento de Paletes do Produtor.** In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 32, 2000 Viçosa – MG (2000).

WÄSCHER, G.; HAUßNER, H.; SCHUMANN, H. (2007). **An Improved Typology of Cutting and Packing Problems.** *European Journal of Operational Research*, **183**, 1109-1130.

WINSTON, W.L. **Introduction to Mathematical Programming: Applications and Algorithms.** 2^a ed. California: Duxbury Press, 1995.

ANEXO A

Dados de entradas dos aços selecionados para o modelo

Os aços escolhidos para a aplicação do modelo nos cenários A e B foram: aço VND de diâmetro 25,4, aço D6 de diâmetro 31,75 e aço 8620 de diâmetro 25,4. Os dados utilizados como parâmetros desses aços são mostrados a seguir. Os dados dos aços usados na expansão do modelo e os dados reais de todos os aços considerados não serão apresentados devido a grande quantidade de tabelas.

Os dados de entradas para um dos aços são: estoque inicial em 01/01/2008 (data do início das análises), compras efetuadas ao longo do período de análise (seis primeiros meses de 2008 divididos em 27 semanas), comprimento e quantidade de pedidos de cada semana.

Na Tabela A.1 é apresentado o estoque inicial em 01/01/2008 do aço VND de diâmetro 24,5 milímetros.

Tabela A.1 - Estoque inicial do aço VND de diâmetro 25,4.

Comprimento (mm)	Quantidade
350	1
375	1
400	1
1.750	1
5.200	18
6.000	10

Também serão consideradas as novas entradas para a reconstituição do estoque. Ao longo dos seis primeiros meses de 2008, foram compradas 44 barras com comprimento de 5.700 mm na 5ª semana, 55 barras com comprimento de 5.800 na 6ª semana e 19 barras com comprimento de 5.000 mm na 22ª semana.

As vendas realizadas do aço VND de diâmetro 25,4 seguem na Tabela A.2, onde li é o comprimento solicitado e di a quantidade de cada comprimento.

Tabela A.2 - Vendas do aço VND de diâmetro 25,4.

	Sem 1		Sem 2		Sem 3		Sem 4		Sem 5		Sem 6		Sem 7		Sem 8		Sem 9	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	3000	1	8	1	8	1	118	4	75	12	115	4	51	1	32	2	65	1
2			10	1	10	2	200	1	78	6	128	2	1000	6	40	2	120	20
3			20	1	40	1	500	1	1000	5	450	1	2000	1	500	1	403	3
4			70	1	45	1	2000	6	2000	1	1000	7	3000	1	1000	3	500	1
5			76	2	55	2	250	1	5500	1	5500	1	5500	2	3000	2	2000	1
6			90	1	80	1	5200	1	5625	1			5675	2	5713	2		
7			110	1	100	1									5733	3		
8			500	1	180	1												
9			700	1	500	1												
10			1000	3	1000	31												
11					2000	1												
12					2500	4												
13					5500	2												
14					6000	2												

Tabela A.2 (cont)

	Sem 10		Sem 11		Sem 12		Sem 13		Sem 14		Sem 15		Sem 16		Sem 17		Sem 18	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	50	1	52	7	300	1	145	4	283	5	10	16	33	2	230	1	90	1
2	390	1	300	1	1000	3	150	3	400	2	51	1	70	7	500	1	100	1
3	1000	2	500	1	1500	1	1000	1	1000	3	110	1	500	2	510	5	160	2
4	2000	3	900	1	1600	1	5750	2	2000	1	240	1	700	1	5750	1	1000	8
5	2500	4	1000	1	2000	1			3000	2	500	5	1000	6			2000	2
6	5500	1	5792	3	3000	2			5000	5	530	1	5750	2			3000	1
7					5500	1			5800	1	1000	2						
8					5800	3			5750	1	1500	4						
9											2000	2						
10											5750	1						

Tabela A.2 (cont)

	Sem 19		Sem 20		Sem 21		Sem 22		Sem 23		Sem 24		Sem 25		Sem 26		Sem 27	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	132	6	100	2	132	4	20	1	1000	4	36	3	1000	11	56	2	25	2
2	200	1	160	1	200	1	223	12	1500	1	140	2	1500	1	124	6	95	2
3	500	1	300	1	500	3	500	4	2000	2	160	3	3000	1	155	8	140	4
4	1000	8	5750	2	1000	4	625	1	3000	1	500	1	4000	1	1000	3	160	3
5	1500	2	5450	5	2500	1	900	1	5500	1	1000	3	5250	1			164	2
6	2000	1			3000	1	1000	12	2919	4	1100	1					1000	4
7	4000	1			5625	1	2000	2			2500	4						
8					245	48	3000	5										
9							5000	1										
10							5775	1										
11							2800	3										

Na Tabela A.3 é apresentado o estoque inicial em 01/01/2008 do aço D6 de diâmetro 31,75 milímetros.

Tabela A.3 - Estoque inicial do aço D6 de diâmetro 31,75.

Comprimento (mm)	Quantidade
5.500	30
5.900	19
6.000	16

Também serão consideradas as novas entradas em estoque. Foram compradas 33 barras de comprimento de 6.000 mm na 9ª semana e 41 barras de comprimento de 5.200 mm na 18ª semana.

As vendas realizadas do aço D6 de diâmetro 31,75 seguem na Tabela A.4, onde li é o comprimento solicitado e di a quantidade de cada comprimento.

Tabela A.4 - Vendas do aço D6 de diâmetro 31,75.

	Sem 1		Sem 2		Sem 3		Sem 4		Sem 5		Sem 6		Sem 7		Sem 8		Sem 9	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	21	8	85	30	27	1	35	40	46	1	200	2	40	2	50	2	85	40
2			100	3	110	1	150	20	53	8	500	1	45	3	60	6	1000	5
3			200	1	500	1	500	1	500	1	1500	1	65	2	400	1	1200	1
4			500	3	5500	4	2000	1	1000	3	2000	1	75	1	500	1	1500	1
5			1000	9	6000	1			2000	1	3000	2	300	1	1000	1	5500	1
6			2000	1					5500	1	5500	5	500	1	2000	2		
7			2200	2									800	1	5500	5		
8			3000	2									900	1				
9			4835	1									1000	7				
10													2000	2				
11													3000	1				
12													5500	2				

Tabela A.4 (cont)

	Sem 10		Sem 11		Sem 12		Sem 13		Sem 14		Sem 15		Sem 16		Sem 17		Sem 18	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	55	1	136	4	65	1	41	3	155	1	80	2	500	1	600	1	100	1
2	400	1	500	1	600	1	60	1	500	2	85	30	1000	6	5500	4	200	1
3	1000	11	1000	6	1000	1	80	1	1000	1	89	6	5500	2			250	1
4	2000	1	2000	2	1500	1	160	1	2400	1	90	1					700	1
5	3000	1	5500	1	3000	2	250	1			150	20					5500	2
6					5500	2	300	1			200	1						
7							1000	2			500	5						
8							3000	1			1000	3						
9											3000	1						

Tabela A.4 (cont)

	Sem 19		Sem 20		Sem 21		Sem 22		Sem 23		Sem 24		Sem 25		Sem 26		Sem 27	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	43	6	240	1	32	17	35	15	43	20	35	3	35	3	30	6	53	6
2	60	4	2500	4	46	4	500	1	45	1	200	1	1000	3	500	1	75	2
3	80	4	5500	3	200	1	900	1	108	35	300	1	5500	1	1000	1	5500	5
4	300	2			250	1	1000	4	200	2	1000	5						
5	1000	8			5500	1	2000	1	500	1	1500	1						
6	2000	1							1000	6	5500	1						
7	3000	2							2500	1								
8	4000	1																
9	5500	2																

Na Tabela A.5 é apresentado o estoque inicial em 01/01/2008 do aço 8620 de diâmetro 24,5 milímetros.

Tabela A.5 - Estoque inicial do aço 8620 de diâmetro 25,4.

Comprimento (mm)	Quantidade
500	1
625	1
1.000	2
5.500	4

Também serão consideradas as novas entradas em estoque. Foram compradas 3 barras de 5.500 mm de comprimento na 3ª semana, 8 barras de 6.000 mm de comprimento e 1 barra de 3.000 mm de comprimento na 5ª semana, 5 barras de 6.000 mm de comprimento na 10ª semana, 4 barras de 5.500 m de comprimento na 20ª semana e 5 barras de 6.000 mm de comprimento na 27ª semana. As vendas realizadas seguem na Tabela A.6, onde *li* é o comprimento solicitado e *di* a quantidade de cada comprimento.

Tabela A.6 - Vendas do aço 8620 de diâmetro 25,4.

	Sem 1		Sem 2		Sem 3		Sem 4		Sem 5		Sem 6		Sem 7		Sem 8		Sem 9	
<i>i</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>	<i>li</i>	<i>di</i>
1	1500	5	30	1	35	1	18	6	37	3	35	1	150	1	80	1	60	2
2			73	4	700	3	20	1	500	1	1000	1	1000	3	118	3	80	1
3			120	8	1000	6	95	2					6000	1	145	1	170	6
4			1000	8	2000	1	103	2					80	1	200	2	1000	1
5			1200	1			120	1					118	3	700	1		
6							190	1					145	1	3000	1		
7							205	2					200	2				
8							550	1					700	1				
9							850	1					3000	1				

Tabela A.6 (cont)[illegible]**Tabela A.6 (cont)**[illegible]