

INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL EM AÇÃO

CASOS DE APLICAÇÃO

RUI CARVALHO OLIVEIRA
JOSÉ SOEIRO FERREIRA
(EDITORES)

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

CASO 10

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS NA PRODUÇÃO DE CAPAS PARA ESTOFOS DE AUTOMÓVEIS: O CASO DA COINDU

Cláudio Alves

Centro de Investigação Algoritmi da Universidade do Minho
Escola de Engenharia, Universidade do Minho
claudio@dps.uminho.pt

Pedro Brás

Centro de Investigação Algoritmi da Universidade do Minho
Escola de Engenharia, Universidade do Minho
pedro.bras@dps.uminho.pt

José Valério de Carvalho

Centro de Investigação Algoritmi da Universidade do Minho
Escola de Engenharia, Universidade do Minho
vc@dps.uminho.pt

Telmo Pinto

Centro de Investigação Algoritmi da Universidade do Minho
Escola de Engenharia, Universidade do Minho
telmo@dps.uminho.pt

RESUMO

Este artigo descreve a aplicação de ferramentas de otimização no quadro da atividade da empresa Coindu sediada no Norte de Portugal. A empresa produz capas para estofos de automóveis a partir de diferentes matérias-primas incluindo tecido e couro natural. Em 2011, produziu mais de 700000 capas para produtores de estofos nacionais e internacionais que fornecem por sua vez grandes marcas do setor automóvel. Neste artigo, analisamos em particular os processos de corte de peles de couro da Coindu. As peles de couro são usadas para produzir os modelos de gama mais alta. As peças dos estofos são cortadas diretamente a partir das peles. Dado que as peças e as peles são figuras geométricas com contornos irregulares, o processo de corte gera inevitavelmente desperdícios. O custo das peles de couro e os elevados requisitos de qualidade impostos pelos clientes explicam a intenção da empresa em automatizar estes processos para melhorar assim o aproveitamento dessas matérias-primas.

Diferentes abordagens de otimização foram desenvolvidas para maximizar o aproveitamento das peles. O problema de otimização associado é um problema de corte e empacotamento a duas dimensões que envolve figuras geométricas fortemente irregulares. Dada a complexidade do problema, optou-se pelo desenvolvimento de métodos heurísticos. Os detalhes dessas abordagens e os resultados obtidos são descritos nas secções seguintes.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização de processos; Indústria automóvel; Heurísticas; Meta-heurísticas.

1. Introdução

A Coindu é uma empresa multinacional do ramo têxtil que produz essencialmente capas de estofos para a indústria automóvel. Atualmente, a empresa é composta por três unidades de produção situadas em Mogege (Vila Nova de Famalicão), Arcos de Valdevez e Curtici (Roménia), que empregam mais de 1700 colaboradores. A principal unidade situada em Mogege emprega praticamente metade de toda a mão-de-obra da empresa. No total, são cerca de 840 colaboradores que garantem a operacionalidade de doze linhas de produção e do setor de corte de tecido e couro. As outras unidades nasceram no quadro de sucessivas expansões levadas a cabo pela empresa para responder ao aumento da procura. A nível nacional, a Coindu é líder no setor dos têxteis para a indústria automóvel. A empresa alcançou uma posição de destaque a nível internacional, e é hoje fornecedora de capas em tecido e couro natural para as principais empresas mundiais de produção de estofos e bancos de automóveis. Os clientes finais dessas empresas são marcas bem conhecidas do setor automóvel.

As capas e outros acessórios fornecidos pela Coindu são compostos por diversos elementos e materiais. A superfície das capas é produzida a partir de couro natural, PVC e tecido. Por baixo dessa superfície, podem estar telas, espumas, linhas, etiquetas, entre outros elementos, que fazem parte da estrutura da capa e que entram por isso no processo de produção. A produção das capas envolve diversas operações entre as quais se destacam as operações de corte das matérias-primas. Neste artigo, focamo-nos num destes processos e abordamos em particular aquele que envolve o corte do couro.

O corte do couro é, por vários motivos, um dos processos produtivos mais críticos da empresa. O couro é usado naturalmente para produzir as capas de estofos dos segmentos de automóveis mais altos. Os requisitos de qualidade impostos pelos clientes são altos e condicionam em parte estes processos. A Coindu compra peles de couro tratadas a partir das quais corta as diferentes peças dos estofos. Atualmente, grande parte do corte das peles de couro é executado de forma manual. As peças são representadas através de estruturas metálicas com a forma das peças dos estofos que são designadas por

«cortantes». Os cortantes são colocados na pele por operadores manuais de modo a aproveitar ao máximo a superfície evitando os defeitos da pele e cumprindo os requisitos de qualidade definidos para cada peça. Uma vez preenchida, a pele passa por uma prensa que irá provocar o corte das peças dos estofos. Todos os espaços à superfície da pele que não são aproveitados por serem demasiado pequenos acabam como desperdício. Dado o valor de uma pele de couro e as quantidades que são processadas pela empresa, o desperdício que é gerado neste processo de corte representa um custo significativo.

Apesar das políticas de melhoria implementadas pela empresa ao nível dos processos de corte de couro (formação dos operadores, atribuição de prémios de produtividade, por exemplo), a dependência destes processos do fator humano levanta invariavelmente várias dificuldades. Um operador necessita de algum tempo para alcançar a experiência que garanta níveis competitivos de aproveitamento das peles. Por outro lado, a dificuldade em encontrar profissionais motivados e interessados em prosseguir com o ofício é real. Finalmente, aspetos como o cansaço e o empenho dos operadores afetam de forma significativa os resultados alcançados.

Por todos estes motivos, a empresa procurou avaliar o potencial de sistemas de corte automático comparando-os com o desempenho dos operadores atuais. O principal desafio consiste em desenvolver módulos automáticos para o cálculo dos planos de corte. Como veremos mais adiante, enquanto os problemas de corte têm sido em geral muito estudados, existem muito poucas soluções para o problema específico de corte de couro da Coindu. O principal objetivo deste trabalho consistiu assim em desenvolver, implementar e testar algoritmos adaptados ao caso específico da empresa.

O processo de corte das peles de couro pode ser representado através de um problema de otimização que envolve figuras geométricas a duas dimensões (as peles e as peças dos estofos), e onde o objetivo consiste em determinar a posição das peças à superfície das peles de forma a evitar que uma peça se sobreponha a outra e a garantir que ela esteja totalmente dentro da superfície da pele. O facto de a pele ser um produto natural com defeitos

(incluindo buracos) e zonas de qualidade distinta levanta outras dificuldades. As peças devem evitar os defeitos e devem ser colocadas de forma que os requisitos de qualidade especificados pelos clientes sejam rigorosamente satisfeitos. O critério de otimização depende do aproveitamento total da pele que é conseguido.

Este problema de otimização pertence à família dos problemas de corte e empacotamento. Na literatura, o problema é designado por problema de corte em peles de couro (*leather nesting problem*). Os principais elementos deste problema (as peças e as peles de couro) são figuras geométricas fortemente irregulares. Os contornos das figuras não seguem nenhum padrão específico e a própria superfície das peças e das peles não são espaços homogêneos. As superfícies podem ter buracos (e outros defeitos no caso das peles), e podem ser divididas em zonas de qualidade segundo a natureza do produto no caso das peles ou segundo as especificações dos clientes no caso das peças. Todos estes aspetos tornam este problema num dos mais complexos no domínio dos problemas de corte e empacotamento.

Neste artigo, descrevemos os detalhes do problema de corte de peles de couro da Coindu, e discutimos as abordagens que foram desenvolvidas para a sua resolução. A atividade da empresa, os seus produtos e as principais características do processo de corte de couro são apresentados na Secção 2. Os elementos que caracterizam o problema de otimização associado são descritos na Secção 3. Na Secção 5, revemos de forma sumária as contribuições descritas na literatura para este problema. Duas classes de algoritmos que foram desenvolvidos e implementados são apresentados nas secções 6 e 7. A primeira abordagem consiste num conjunto de heurísticas construtivas baseadas em regras de agrupamento e seleção de peças, de seleção de regiões a explorar à superfície da pele e em funções de avaliação das diferentes posições de colocação. Essas heurísticas são descritas na Secção 6. Na Secção 7, descrevemos uma meta-heurística baseada em pesquisa local que consiste num algoritmo de pesquisa de vizinhança variável (*variable neighborhood search*). Os resultados obtidos com estes algoritmos são discutidos na Secção 8.

2. A Coindu

O diagrama da Figura 1 ilustra os principais elementos e processos relacionados com a atividade de produção da Coindu.

O processo de armazenagem consiste na receção das matérias-primas provenientes dos fornecedores e está sujeito a normas rigorosas de controlo e documentação. A avaliação da qualidade dos materiais é um processo exigente, nomeadamente no que diz respeito ao couro. Ao receber um lote de peles, é feita uma inspeção geral ao couro para certificar o nível de qualidade declarado pelo fornecedor. Se for detetado algum desvio relativamente ao nível de qualidade declarado, é desencadeado um processo de renegociação dos termos do contrato de compra e venda referentes ao lote de peles em causa. Estes desvios são relativamente comuns dado que o couro é um produto natural que apresenta características variáveis e que está sujeito a condições que o poderão afetar tais como a temperatura e a humidade.

O processo de produção é despoletado por uma ordem de fabrico que envolve a especificação das matérias-primas necessárias à produção do artigo em causa. A maioria das matérias-primas está sujeita a um processo de corte. De acordo com as especificações das ordens de fabrico, a secção de corte faz a preparação e o corte das matérias-primas necessárias à produção. Os objetivos desta secção são o corte atempado de todos os materiais solicitados com o melhor aproveitamento possível. O nível de aproveitamento das matérias-primas é um dos fatores com maior impacto na competitividade global da empresa.

O processo de corte da Coindu divide-se em três etapas:

- o corte de couro;
- o corte de outros materiais;
- o controlo de qualidade dos materiais cortados.

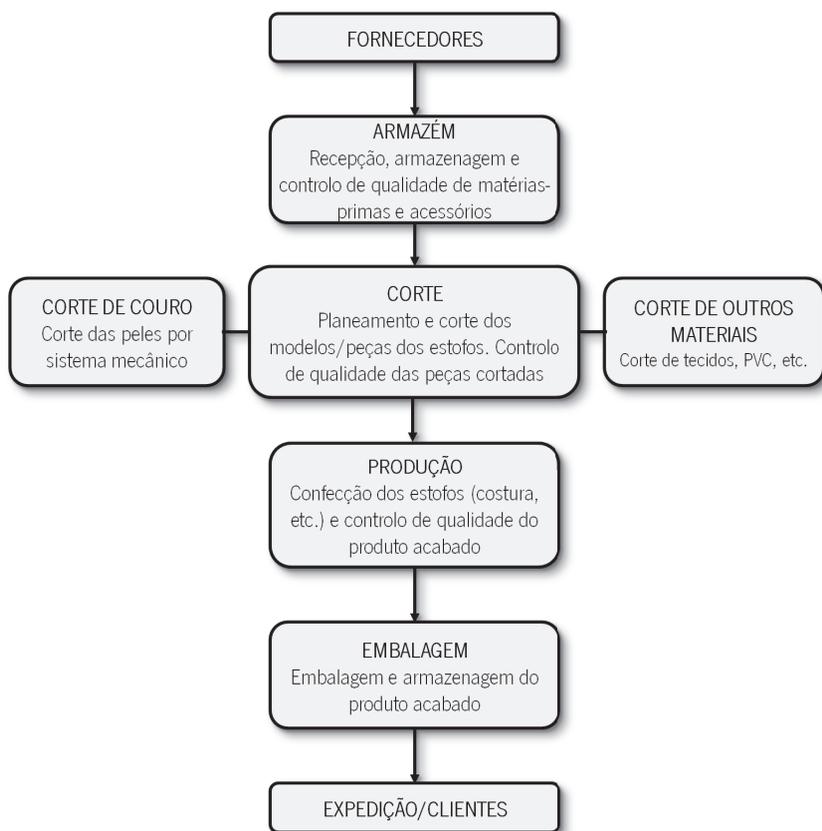


Figura 1: Visão geral das atividades de produção da Coindu

Atualmente, o corte de couro na Coindu é feito de forma manual. Apesar de muitas outras empresas já terem abdicado desta forma de corte e terem adotado sistemas automáticos, a Coindu mantém este setor a operar de forma manual devidos aos elevados níveis de eficiência que outros métodos ainda não permitem alcançar. O processo de corte de couro da Coindu depende assim de operadores especializados e com muita experiência.

Para atingir níveis elevados de aproveitamento do couro, a Coindu traçou uma filosofia para o setor do corte que assenta na formação de novos cortadores, no estabelecimento de objetivos e no estímulo à competição. A empresa aposta fortemente na formação de operadores de corte. Essa

formação consiste essencialmente num processo de aprendizagem prático e diário que junta os cortadores mais experientes e eficazes aos cortadores em formação. Com este método, a experiência e técnicas de corte são legadas de forma progressiva e natural. A Coindu estabelece também objetivos de aproveitamento do couro relativos a cada modelo a ser cortado e atribui prémios a quem cumprir ou ultrapassar essas metas. Desta forma, a empresa recompensa os cortadores mais empenhados pelos níveis de eficiência alcançados.

Os processos de corte manual de couro têm também as suas desvantagens relacionadas inevitavelmente com o fator humano. O processo de formação é moroso, consome recursos e afeta, de alguma forma, a eficácia do setor do corte. O retorno só se faz verdadeiramente sentir quando o operador já conquistou experiência e autonomia, o que depende evidentemente da disposição deste em prosseguir com o ofício. A dificuldade em encontrar novos profissionais com motivação para esta atividade é também um entrave. Outras desvantagens relacionam-se com outras variáveis relativas à natureza humana, tais como o cansaço, a motivação, o ânimo e o empenho.

O corte efetuado através de cortantes pelos operadores manuais consiste nos passos seguintes:

1. identificação e requisição do lote de couro a ser cortado de acordo com a ordem de fabrico;
2. seleção dos cortantes associados às peças que constam da ordem de fabrico;
3. seleção da pele do lote requisitado para a execução do corte;
4. colocação da pele na mesa de corte;
5. revista da pele de forma a realçar com um giz ou um marcador próprio os defeitos e as diferentes zonas de qualidade da pele;
6. colocação dos cortantes sobre a pele de forma a criar um plano de corte compacto e eficiente, tendo em conta as zonas de qualidade, os defeitos e as quantidades de cada peça requerida na ordem de fabrico;

7. passagem da mesa de corte para a prensa para a execução do corte;
8. recolhimento dos cortantes, peças cortadas e desperdício da mesa de corte;
9. colocação das peças cortadas na mesa de inspeção.

A revista e o corte das peles de couro são realizados por dois operadores em cada mesa de corte. A coordenação dessas atividades é normalmente definida por estes operadores. Uma boa comunicação e interação entre os cortadores são essenciais para a eficácia dessas operações.

Após o corte, as peças são submetidas a um rigoroso controlo de qualidade cujo objetivo é identificar e recolher as peças defeituosas evitando assim que estas avancem no processo produtivo. Os defeitos devem-se a falhas no processo de revista do couro que resultam em peças cortadas em zonas com defeito ou a anomalias no processo de corte (arrastamento dos cortantes pela prensa, peças deformadas). A inspeção das peças é realizada por um revistador que opera em mesa própria (com forma e iluminação adequada), e termina com a separação das peças cortadas por tipo e modelo.

O processo de corte de outros materiais engloba o corte de tecidos (de vários tipos), PVC, telas, espumas, alcatifas, alcântara e TNT (Tecido Não Tecido). Esses materiais são fornecidos sob a forma de rolos com várias dezenas de metros de comprimento. O corte é feito de forma automática através de lâminas. Para executar este processo, são estendidas sobre a máquina de corte várias camadas do material a cortar, formadas por dezenas de folhas de tecido que são fixadas à mesa de corte por meio de vácuo (ao conjunto destas camadas chama-se o colchão). Sobre o colchão movimentam-se as cabeças de corte que possuem lâminas, vazadores (ferramenta que permite fazer cortes circulares de diâmetro fixo) e outras ferramentas de corte. Essas cabeças executam o corte de um plano de corte pré-definido que foi elaborado por meio de uma aplicação informática própria. Evidentemente, o plano é gerado de forma a originar o máximo aproveitamento da matéria-prima e a respeitar as quantidades impostas pela ordem de fabrico. Neste tipo

de corte, e ao contrário do que se passa no corte de couro, nem todas as peças são revistadas após terem sido cortadas dado que o número de defeitos é tipicamente baixo e as elevadas quantidades de peças cortadas tornam financeiramente inviável uma revista exaustiva. Os defeitos que poderão surgir dependem exclusivamente do processo de corte e são rastreados através da amostra de peças que são recolhidas.

Em qualquer um dos processos de corte descritos (couro e outros materiais), as peças cortadas são identificadas através de timbragem. Em cada peça, é impresso ou carimbado um conjunto de informações que inclui o número de referência do cliente, a identificação sumária da peça, o número da ordem de fabrico e a data. Essa identificação permite a rastreabilidade das peças ao longo do processo de fabrico até ao cliente final, e possibilita que, no caso de uma reclamação de defeito de fabrico num estofo, seja possível identificar a fábrica que o produziu, a data de produção e a equipa responsável pela produção e aprovação do mesmo. Após essa identificação, as peças validadas seguem para a área de produção da empresa.

A produção consiste em operações de costura que visam agregar as peças cortadas e outros materiais para dar origem ao produto final (as capas). É o setor da Coindu que utiliza o maior número de recursos humanos. A costura é feita de forma manual por costureiras em máquinas de costura industriais. A área de produção divide-se em linhas, cada uma delas especializada num determinado tipo de modelo de estofo. Essa especialização é indispensável já que cada modelo de estofo envolve um conjunto de operações próprias. Os materiais necessários ao processo são as peças cortadas provenientes do setor de corte, linhas, elásticos, e perfis, entre outros. No final, os produtos passam por um controlo de qualidade que consiste na inspeção geral e meticulosa de toda a capa de forma a garantir que estas estão livres de defeitos e em conformidade com todos os requisitos de qualidade. As capas defeituosas são encaminhadas para análise de forma a apurar as causas que estiveram na origem do defeito. Os produtos acabados e sem defeitos seguem para a embalagem.

O setor da embalagem completa o ciclo produtivo da Coindu. Consiste no acondicionamento dos produtos acabados em embalagens para que estes cheguem em perfeitas condições ao cliente. O tipo de caixas a usar, a disposição do produto dentro destas e o tipo de etiquetagem são requisitos definidos pelo cliente e que a empresa segue escrupulosamente.

3. Produtos e matérias-primas

A Coindu produz essencialmente capas para estofos de automóveis. Os clientes finais destes produtos são marcas bem conhecidas da indústria automóvel entre as quais se destacam a Audi, BMW, Peugeot, Citroën e Volvo. A empresa produz vários modelos para cada uma destas marcas, cada um com as suas características próprias ao nível do *design*, das funcionalidades, dos tipos de materiais, e da configuração e quantidade de peças.

Os materiais usados para a produção das capas são variados (couro, PVC – vinil – , licra, alcântara, espuma, tecidos, telas e linhas). O couro distingue-se dos outros materiais pelas suas propriedades e características únicas. O couro é um produto de origem natural que é extraído a partir da pele que cobre o corpo de um animal. No seu estado original, essas peles estão cobertas por pêlos ou lã e são compostas por várias camadas: epiderme, derme e tecido subcutâneo. O couro usado pela Coindu é constituído apenas pela derme da pele proveniente de bovinos. A empresa compra peles de couro prontas a serem usadas que foram já tratadas pelos fornecedores através dos processos tradicionais de preparação desses materiais (curtimento, tingimento, amaciamento e acabamento). Essa preparação confere às peles de couro o aspeto que é conhecido, mas não elimina todas as imperfeições. As características do couro variam de pele para pele em termos de espessura, rigidez, flexibilidade, ao nível da textura estampada à superfície e do aspeto superficial (poros dos pelos, rugas da barriga e pernas). Uma pele de couro poderá ter também outros tipos de marcas de origem não natural tais como picadas de insetos, cicatrizes, arranhões, e marcas ou defeitos associados ao processo de curtimento.

Em contexto industrial, todas estas características das peles de couro traduzem-se em zonas diferenciadas de qualidade e em defeitos que são considerados como áreas não aproveitáveis. A Coindu usa uma escala de classificação constituída por cinco zonas de qualidade designadas por A, B, C, D e «lixo» (em ordem decrescente de qualidade, sendo a zona A a que representa o melhor nível de qualidade e a zona de «lixo» a que caracteriza as regiões do couro que não podem ser aproveitadas). A aplicação dessa escala às peles de couro depende de um conjunto de orientações e normas definidas previamente por cada cliente. Assim, uma zona que é considerada como sendo de um determinado nível de qualidade para um cliente poderá ser avaliada de forma diferente por outro. Para cada cliente e para cada modelo de carro, existe um catálogo de couro que contém toda a informação de qualificação das zonas e defeitos do couro.

Em geral, o grau de exposição que uma peça tem num assento de um automóvel determina o nível de qualidade associado. As zonas das peças que, após montagem num assento, estiverem mais expostas, deverão ser de qualidade superior, e o oposto sucede com as zonas mais escondidas de um assento. Seguindo o mesmo princípio, é atribuído o nível de qualidade mais elevado às peças nas zonas do banco que sofrem maior uso. É o caso, por exemplo, das zonas laterais dos assentos onde o desgaste é maior devido à entrada e saída dos ocupantes do automóvel.

O setor de corte do couro da Coindu utiliza um sistema de cores associado às diferentes zonas de qualidade. Este sistema é aplicado aos cortantes para identificar as zonas de qualidade das peças. Esse método visual permite aos cortadores identificar as restrições de posicionamento de um dado cortante de forma rápida. Neste artigo, usaremos a cor preta para representar as zonas A das peles. As zonas B, C e D serão representadas a vermelho, verde e azul, respetivamente. As zonas de «lixo» serão representadas a cinzento.

As peles de couro podem ser divididas em várias partes às quais estão tipicamente associados determinados níveis de qualidade. Por exemplo, as zonas da pele localizadas perto das articulações têm características que são

distintas das zonas mais próximas do dorso do animal. Uma pele de couro pode ser decomposta em seis regiões distintas:

1. parte de trás do dorso: esta é a zona mais espessa e resistente das peles donde provém o couro de melhor qualidade (nível A);
2. pescoço: nessa região, a pele é grossa e resistente, mas tem também um grande número de defeitos (marcas de crescimento, vincos e cicatrizes);
3. dorso: juntamente com a primeira região, é a zona nobre da pele que fornece o couro de melhor qualidade;
4. barriga: esta é uma zona fina da pele onde o corte de peças é delicado já que o operador tem de evitar o couro com fraca elasticidade, farpado no avesso ou com marcas profundas derivadas de vincos naturais na pele;
5. patas: região da pele que é fina com vincos ao nível das articulações;
6. zona da cauda: região da pele com uma grande variedade de defeitos incluindo picadas de insetos e cicatrizes.

A Figura 2 ilustra a localização dessas regiões numa pele de couro.

Um automóvel possui sempre dois assentos situados à frente, e poderá ter uma ou mais filas de bancos traseiros. Cada um dos lugares poderá também incluir encostos de cabeça, apoios de braço, apoio para copos, apoios para cadeira de bebé, airbags ou LCD (para os encostos de cabeça). Na Coindu, o estofos de um automóvel, constituído pelos bancos da frente e de trás, é designado por carro completo.

Na generalidade dos modelos, é necessário distinguir o lado esquerdo do lado direito dos estofos de um automóvel por várias razões (ausência de simetria, funcionalidade dos bancos, existência de airbags ou detalhes estéticos). As partes que constituem o estofos de um carro completo são constituídas por diferentes peças que envolvem um conjunto variado de

materiais. A composição e especificação de cada uma dessas partes e os seus componentes são descritos numa ficha técnica (Figura 3). Cada modelo de carro possui um conjunto destes documentos que compila informações como as codificações internas e do cliente, a lista de materiais necessários, a nomenclatura de todas as peças e pequenos materiais, o esquema de montagem, a descrição de procedimentos técnicos de corte, costura e operações especiais, a gama de controlo de defeitos, e as instruções de acondicionamento das peças na embalagem.

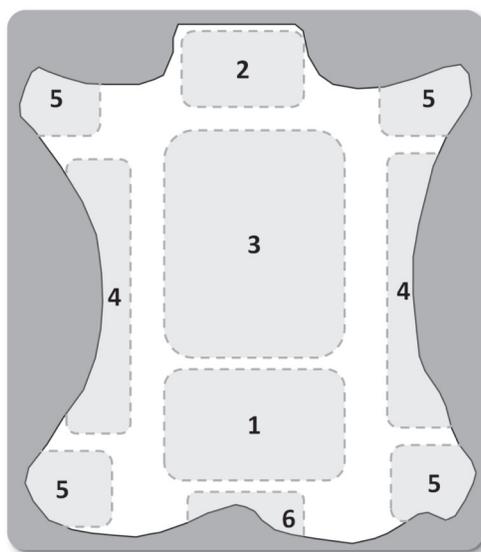


Figura 2: Distribuição das diferentes regiões de uma pele de couro

Atualmente, a Coindu produz mais de uma dezena de modelos de automóveis que têm até dez variantes distintas em alguns casos. O estofa de cada um destes modelos possui características, materiais e peças que poderão diferir consideravelmente em relação a outro modelo. A caracterização geométrica das peças que compõem o estofa de um modelo genérico fabricado na Coindu é feita com base nos seguintes elementos:

- dimensão: a área das peças pode variar consideravelmente desde 50 cm² até 1500 cm²;

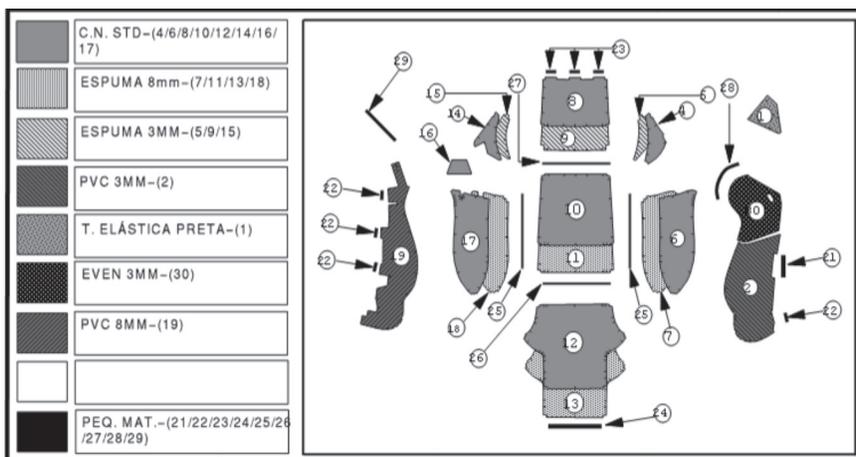


Figura 3: Parte de uma ficha técnica (assento da frente direito)

- zonas de qualidade: uma peça é constituída por uma ou várias zonas de qualidade (até um máximo de quatro zonas distintas). Na fase de criação das peças, em *software* CAD, estas zonas são concebidas como camadas sobrepostas ao traçado do contorno da peça, sendo assim consideradas como formas geometricamente independentes. Essas zonas definem requisitos mínimos de qualidade do couro a partir do qual a peça será cortada;

- buracos: a presença de buracos no interior das peças é uma característica pouco comum que se verifica em peças onde se encontram encostos de cabeça, airbags, cintos de segurança ou cadeiras de bebé;

- irregularidade: dependendo do modelo de automóvel e da parte do estofado em causa, algumas peças poderão ter contornos regulares (algumas quase de forma retangular) ou fortemente irregulares (com várias concavidades e contornos com detalhes sinuosos);

- número de vértices: as peças podem ser representadas através de um conjunto de segmentos consecutivos (polígonos). O número de vértices de uma peça depende da sua dimensão, irregularidade e das suas zonas de qualidade. No seu conjunto (contorno e zonas de qualidade), uma peça

pequena poderá ser representada através de um polígono com poucas dezenas de vértices, enquanto que uma peça de grandes dimensões e várias zonas de qualidade poderá envolver centenas de pontos distintos.

4. O problema de corte em peles de couro

O processo de corte do couro da Coindu pode ser formulado como um problema de otimização no qual se pretende posicionar um conjunto de pequenas figuras irregulares (as peças dos estofos) em superfícies irregulares de maiores dimensões que representam as peles de couro, com o objetivo de maximizar a sua ocupação. O problema pertence à família dos problemas de corte e empacotamento que têm merecido uma atenção crescente por parte da comunidade académica. Entre 1995 e 2004, foram referenciadas mais de 400 publicações nessa área em (Wäscher, Haußner, & Schumann, 2007). Na literatura, o problema é designado por *leather nesting problem* (problema de corte em peles de couro). Apesar da sua relevância prática, existem poucos resultados para a variante do problema associado ao caso da Coindu. A maior parte das aplicações descritas na literatura referem-se a outras indústrias como a do calçado onde se consideram restrições adicionais que não têm correspondência na indústria automóvel.

No caso da Coindu, as ordens de fabrico são compostas por listas de peças que ocupam normalmente mais do que uma pele. O objetivo do problema de otimização consiste assim em determinar os planos de corte com os melhores aproveitamentos para um conjunto de peles de couro.

Conforme foi referido acima, as peças dos estofos são compostas por zonas de qualidade e poderão ter eventualmente buracos no seu interior. Uma zona de qualidade representa o nível mínimo de qualidade para essa região da peça. Como tal, nunca poderá ser colocada numa região da pele de qualidade inferior. Ao longo deste artigo, as zonas de qualidade A das peças serão representadas a magenta, enquanto que as outras zonas de qualidade serão representadas com as cores utilizadas para as zonas de qualidade das peles de couro. As figuras 4 e 5 representam respetivamente uma pele de couro e um conjunto de peças de modelos produzidos pela Coindu. As

caraterísticas das peças dependem do tipo de indústria que é considerado. Na indústria do calçado, por exemplo, as peças são de pequenas dimensões enquanto na indústria automóvel existem peças com uma grande variedade de tamanhos.

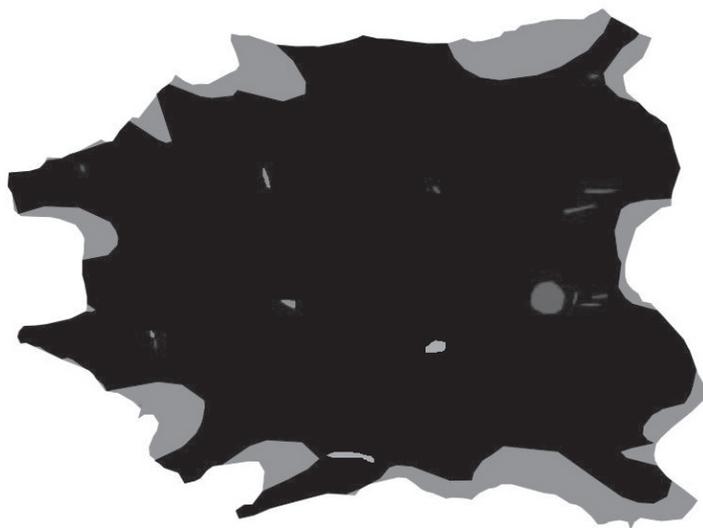


Figura 4: Pele de couro



Figura 5: Peças de estofos de automóveis

Um plano de corte consiste num conjunto de peças posicionado à superfície das peles de couro. Um plano é considerado válido se todas as peças estiverem integralmente em cima da pele, se não houver sobreposições entre peças e se nenhuma peça for colocada em cima de um defeito, de um buraco ou de uma zona de qualidade inferior. A eficiência de um conjunto de planos de corte associados a uma ordem de fabrico é calculada com base na razão entre a área total de todas as peças cortadas e a área total das peles envolvidas subtraindo a área considerada como utilizável da última pele.

Um dos aspetos importantes a ter em conta no desenvolvimento de abordagens para o problema de corte em peles de couro tem a ver com a forma como são representadas as figuras. No nosso caso, optou-se por uma representação baseada em polígonos que são gerados a partir de uma ferramenta de CAD. O número de vértices que são necessários para representar uma peça varia entre 150 e 300. Para as peles, esse valor ultrapassa frequentemente os 1000 vértices. O número de vértices dos polígonos tem um impacto significativo no desempenho dos algoritmos. Como tal, na aplicação que foi desenvolvida, os polígonos usados para representar as peças e peles do problema foram sujeitos a um conjunto de operações de simplificação baseadas em aproximações por defeito ou por excesso.

No caso das peles, foram aplicadas aproximações por defeito para a área de qualidade A que representa a base da pele (assumimos que todas as outras zonas de qualidade se sobrepõem a essa base). As outras zonas de qualidade inferior são representadas através de aproximações por excesso. Se duas ou mais zonas de qualidade se intersectarem após estas simplificações, as restrições referentes às zonas de qualidade inferiores irão prevalecer, o que garante a validade dos planos de corte finais. A título de exemplo, se dois polígonos associados a zonas de qualidade B e D se intersectarem, nunca será colocada na zona de interseção uma peça cuja qualidade seja superior a D. Aos polígonos que representam as peças, são aplicadas aproximações por excesso. Esse procedimento garante que os planos continuam a ser válidos mesmo quando as peças simplificadas são substituídas pelas peças originais. Esse procedimento de simplificação dos polígonos permitiu reduzir o número médio de vértices das peles para 300. No caso das peças, o número médio de vértices baixou para 80.

Outra dificuldade associada aos problemas de corte em peles de couro está relacionada com a forma como são detetadas interseções. Todos os polígonos envolvidos são figuras com contornos irregulares e, em muitos casos, com concavidades. A existência de zonas de qualidade nas peças e nas peles torna o problema ainda mais complexo. Com efeito, os polígonos

usados para representar as zonas de qualidade de uma peça e da pele poderão eventualmente ficar sobrepostos se os níveis de qualidade associados forem compatíveis. Bennell e Oliveira (2008) descrevem várias abordagens para o cálculo das posições relativas entre dois polígonos. Na nossa implementação, usámos uma ferramenta designada por *invólucro de posicionamento* (*no-fit polygon* - NFP) que determina o conjunto de pontos onde pode ser colocado um polígono de modo a não interseccionar com outro. O *invólucro de posicionamento interior* (*inner-fit polygon* - IFP) é um instrumento similar que permite determinar se um polígono se encontra totalmente no interior de outro polígono.

Dados dois polígonos A e B, o invólucro de posicionamento de A relativamente a B (NFP_{AB}) é um polígono cujo contorno é definido pelo percurso de um ponto de referência do polígono A quando este percorre o contorno de B. Ao longo desse percurso, assume-se que A e B se mantêm sempre em contacto sem nunca se sobrepor. Uma vez calculado NFP_{AB} , a posição de A relativamente a B é avaliada com base na posição do ponto de referência de A relativamente a NFP_{AB} . Assim, se o ponto de referência se encontrar dentro de NFP_{AB} , então os polígonos A e B interseccionar-se-ão. Se o ponto de referência estiver na fronteira de NFP_{AB} , então os polígonos A e B estarão em contacto sem contudo se interseccionar. Finalmente, se o ponto de referência de A estiver fora de NFP_{AB} , os polígonos A e B não estarão nem em contacto nem sobrepostos. A Figura 6 ilustra um invólucro de posicionamento entre dois polígonos irregulares com concavidades.

O invólucro de posicionamento interior entre dois polígonos A e B (IFP_{AB}) é obtido fazendo deslizar o ponto de referência do polígono A ao longo do contorno de B, mas de forma a que o polígono A se mantenha sempre no interior do polígono B. Se o ponto de referência do polígono A estiver dentro do invólucro IFP_{AB} , então A estará completamente no interior de B sem tocar na sua fronteira. Se o ponto de referência estiver fora do polígono IFP_{AB} , então o polígono A não estará inteiramente dentro de B. Finalmente, se o ponto de referência estiver na fronteira de IFP_{AB} , então A estará dentro de B e em contacto com a sua fronteira.

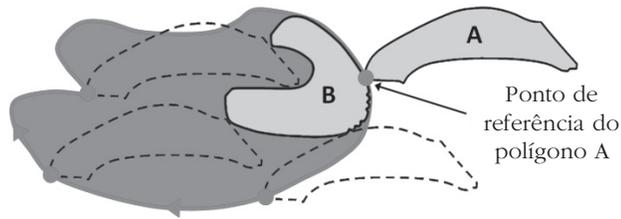


Figura 6: Invólucro de posicionamento entre dois polígonos

Para garantir a validade dos planos de corte, é necessário calcular os NFP entre todos os pares de peças e todos os IFP entre o contorno das peças e a área útil das peles. Além disso, é necessário também calcular os NFP entre as zonas de qualidade das peças e todas as zonas de qualidade inferior das peles.

5. Abordagens da literatura

O problema genérico de corte com figuras irregulares foi abordado por diversos autores. O problema é designado na literatura anglo-saxónica por *nesting problem*. Devido à sua complexidade, a maior parte dos métodos propostos assentam em procedimentos heurísticos (Babu & Babu, 2001; Bennell & Dowsland, 1999; Heckmann & Lengauer, 1995). O problema de corte em peles de couro é uma das variantes desse problema, e é seguramente um dos mais complexos no grupo dos problemas a duas dimensões devido às características que foram descritas acima.

Existem poucas abordagens descritas na literatura para o problema de corte em peles de couro, e a maior parte delas são aplicadas a problemas com restrições adicionais que não existem no problema de corte do couro da Coindu. É o caso das restrições ao nível da orientação das peças nas peles que ocorrem na indústria do calçado. Por esse motivo, passaremos a referir-nos ao problema da Coindu como o problema genérico de corte em peles de couro.

O primeiro algoritmo para a resolução do problema genérico de corte em peles de couro foi proposto por Heistermann e Lengauer (1995). Estes autores

desenvolveram uma heurística construtiva que pretende reproduzir os passos seguidos por operadores humanos. Em cada iteração, uma peça é colocada numa determinada zona (restrita) da pele que é designada por *foco*. A localização desse foco na pele pode ser fixa se se mantiver aproximadamente constante, ou variável se for alterada a cada iteração do algoritmo. Numa primeira fase, são selecionadas as peças cujos contornos melhor se ajustam ao contorno desse foco. Para facilitar essa escolha, as peças são previamente agrupadas em classes de acordo com a forma do seu contorno. O posicionamento das peças na pele é feito tendo em conta a área da peça e a distância entre o bordo da peça e os bordos da pele e do plano de corte construído até ao momento.

Heistermann e Lengauer (1995) descrevem algumas estratégias para melhorar a qualidade das soluções. Propõem a criação de figuras agregadas compostas por duas ou mais peças originais. O objetivo é tirar proveito de encaixes previamente estudados que poderão conduzir a uma diminuição do desperdício de couro que ocorre naturalmente quando se tenta juntar várias peças. Os autores usam também um procedimento para compactar as peças e eliminar assim os espaços vazios entre elas. Apresentam resultados computacionais para instâncias em que as peças correspondem a partes de um sofá. O algoritmo demora entre 60 a 140 segundos a construir planos de corte válidos com níveis de aproveitamento compreendidos entre os 56% e 67% (valores médios aproximados).

Yuping, Shouwei e Chunli (2005) descrevem um algoritmo de arrefecimento simulado para um problema de corte em peles de couro sem zonas de qualidade. Para gerar posicionamentos válidos, são efetuados movimentos de translação horizontal ou vertical e rotações das peças à superfície das peles. Os autores compararam os resultados da sua abordagem com os resultados obtidos por operadores manuais. Constataram que os operadores demoravam em média entre 15 a 30 minutos para preencher completamente uma pele. Nesse espaço de tempo, o algoritmo de arrefecimento simulado produz soluções com níveis de aproveitamento comparáveis aos dos operadores manuais.

Crispin *et al.* (2005) propuseram dois algoritmos genéticos para um problema de corte em peles de couro na indústria do calçado. Nesse caso, as peças devem ser colocadas na pele segundo uma determinada direção o que reduz de forma significativa os graus de liberdade do problema. O primeiro algoritmo consiste em colocar as peças em zonas restritas da pele de modo a maximizar o aproveitamento local nessa zona. A segunda abordagem é baseada em grafos de conectividade em que os arcos representam as peças que poderão estar em contacto num plano de corte válido. À semelhança de Yuping, Shouwei & Chunli (2005), os autores defendem que essas abordagens permitem aproximar os resultados obtidos pelos operadores humanos sem contudo os melhorar.

Yuping e Caijun (2009) descrevem um procedimento baseado em algoritmos genéticos e pesquisa por arrefecimento simulado para o problema de corte em peles de couro sem zonas de qualidade. As peças são colocadas inicialmente na pele usando uma estratégia do tipo *bottom-left*. Para melhorar a qualidade do plano de corte, recorrem a uma combinação entre um algoritmo genético e um procedimento de pesquisa por arrefecimento simulado. O esquema de arrefecimento controla a taxa de mutação do algoritmo genético, o que permite melhorar a convergência do algoritmo. Os resultados computacionais descritos nesse artigo mostram que o algoritmo é capaz de fornecer em uma hora soluções com níveis de aproveitamento da ordem dos 70%.

Entre todas estas contribuições, apenas o artigo de Heistermann e Lengauer (1995) trata de um problema similar ao problema de corte da Coindu. Contudo, só apresenta resultados para instâncias da indústria do mobiliário onde as peças são tipicamente grandes, o que favorece a construção de planos de corte com elevados níveis de aproveitamento. Nas secções seguintes, apresentamos duas classes de métodos que foram desenvolvidos especificamente para o problema de corte de couro da Coindu. O primeiro consiste num conjunto de regras que permitem definir diferentes heurísticas construtivas. O segundo foi desenvolvido para melhorar as soluções obtidas a partir dessas heurísticas construtivas, e baseia-se em

pesquisa de vizinhança variável. Os dois algoritmos que são descritos neste artigo foram apresentados originalmente em (Alves *et al.*, 2012a) e (Alves *et al.*, 2012b).

6. Heurísticas construtivas

O primeiro grupo de algoritmos que foi desenvolvido para o problema de corte em peles de couro da Coindu assenta num conjunto de estratégias que se confundem com os passos de uma heurística construtiva e que incidem nos seguintes aspetos: o agrupamento de peças, a seleção da próxima peça a posicionar na pele, a seleção da região de posicionamento admissível, e a avaliação dos possíveis posicionamentos.

As peças começam por ser agrupadas de acordo com o valor de um determinado atributo (área, concavidades, por exemplo). Os grupos reúnem as peças cujo valor do atributo escolhido se encontra dentro de um determinado intervalo. Em cada iteração do algoritmo, é selecionada a próxima peça a ser colocada na pele. A seleção pode ser feita considerando todas as peças ainda por colocar, ou apenas aquelas que pertencem a um determinado grupo. O passo seguinte consiste em identificar uma região de posicionamento admissível na pele para a peça escolhida. Uma vez escolhida essa região, são avaliados os pontos de posicionamento válido no interior dessa região. Foram considerados vários critérios de avaliação. Os mais simples baseiam-se, por exemplo, na distância entre a peça e o bordo da pele, ou entre a peça e o centro da pele. Os mais sofisticados assentam, por exemplo, na qualidade do ajuste entre a peça e o bordo da pele e/ou do plano de corte construído até ao momento. Nas próximas secções, descrevemos os detalhes das diferentes estratégias.

6.1 Estratégias para o agrupamento de peças

As estratégias de agrupamento de peças são usadas para garantir um tratamento indiferenciado às peças do mesmo grupo que apresentam características muito próximas. As características das peças são representadas pelos atributos seguintes:

- (G1) área;
- (G2) grau de irregularidade;
- (G3) grau de concavidade;
- (G4) razão entre altura e largura do retângulo envolvente;
- (G5) valor das peças baseado nas suas zonas de qualidade e respetivas áreas;
- (G6) homogeneidade das zonas de qualidade.

Iremos designar respetivamente por A_j , I_j , C_j , R_j , V_j e H_j os valores dos atributos (G1) a (G6) associados a uma peça j . Além destes atributos, considerámos ainda um sétimo (G7) cujo valor corresponde a uma combinação linear dos outros atributos (G1) a (G6).

A separação das peças em grupos definidos a partir destes atributos permite evitar que seja dada uma prioridade maior a uma peça que é apenas ligeiramente diferente de outra. O número de peças num grupo depende da instância e também do número máximo de grupos que são considerados. Seja n o número máximo de grupos admitidos, e sejam min e max os valores mínimo e máximo dos atributos de todas as peças de uma dada instância, respetivamente. O grupo m , com $m=1, \dots, n-1$, inclui as peças cujos valores dos atributos estão no seguinte intervalo:

$$\left[min + \frac{max - min}{n} \times (m - 1); min + \frac{max - min}{n} \times m \right]$$

No caso do n -ésimo grupo, o intervalo é definido da seguinte forma:

$$\left[max - \frac{max - min}{n}; max \right]$$

Os grupos são ordenados por ordem crescente do valor do atributo. Assim, o valor de uma peça no grupo $i+1$ será sempre maior que o valor do atributo de uma peça do grupo i . O valor de n tem um impacto no número

de peças em cada grupo. Quando o valor de n é pequeno, o número de peças por grupo tende a ser elevado. À medida que n aumenta, o número de peças por grupo tende a diminuir.

O grau de irregularidade I_j de uma peça j é calculado com base no número de pontos do polígono que representa o contorno da peça. O grau de concavidade C_j consiste na diferença entre a área do invólucro convexo do polígono que representa o contorno da peça e a área total da peça.

A razão R_j entre a altura e a largura do retângulo envolvente da peça j permite distinguir as peças compridas das peças estreitas. Assumimos que a orientação original das peças é tal que o respetivo retângulo envolvente tem a sua maior aresta paralela ao eixo dos x ou ao dos y num sistema de coordenadas Cartesiano. As peças para as quais o valor R_j se aproxima da unidade estão associadas a retângulos envolventes que se aproximam de um quadrado.

Os atributos anteriores não consideram a existência de zonas de qualidade nas peças. No entanto, na fase de posicionamento, poderão existir vantagens em dar primazia às peças com uma maior distribuição de zonas de qualidade, por exemplo. Para lidar com estes casos, definimos o valor V_j do atributo (G5) da peça j como sendo o quociente entre a soma das áreas de cada uma das zonas de qualidade, multiplicada por um determinado fator, e a área da peça. Na nossa implementação, usámos um fator v_k para uma zona de qualidade k com valor igual respetivamente a 4, 3, 2 e 1 para as zonas de qualidade A, B, C e D. Seja a_j^k a área da zona de qualidade k de uma peça j . Temos que:

$$V_j = \frac{\sum_{k=1}^q (v_k a_j^k)}{A_j},$$

sendo q o número total de zonas de qualidade da peça j .

Outra característica de uma peça com potencial impacto no seu posicionamento é o seu grau de homogeneidade. Por exemplo, peças com muitas zonas de qualidade poderão dificultar o seu posicionamento, uma vez que é necessário fazer corresponder as zonas de qualidade da peça com as da pele. Usar o número de zonas de qualidade de uma peça como medida da

sua homogeneidade não é adequado, uma vez que uma peça com uma grande zona de qualidade de um tipo e várias outras zonas de pequenas dimensões pode ser considerada erradamente como sendo fortemente heterogénea. Para medir a homogeneidade de uma peça j (H_j), usámos a relação entre a área total das zonas de qualidade da peça (ponderadas através de um fator h_k que decresce com a área de cada zona) e a área total da peça. Assumimos que as zonas de qualidade das peças estão ordenadas por ordem decrescente da sua área. Para uma zona de qualidade k , h_k toma o valor $\frac{1}{i}$, sendo i o índice da i -ésima zona de qualidade da peça. O valor H_j de uma peça j é dado por:

$$\frac{\sum_{k=1}^q (h_k a_j^k)}{A_j}.$$

Para peças com uma única zona de qualidade, esse valor é igual a 1.

Por fim, considerámos um agrupamento baseado na combinação de todos os atributos anteriores. Para uma dada instância do problema com p peças, sejam A^{max} , I^{max} , C^{max} , R^{max} , V^{max} e H^{max} os valores máximos dos atributos (G1) a (G6), respetivamente. Uma peça j será agregada a um grupo de acordo com o valor do atributo dado pela seguinte expressão:

$$\alpha_1 \times \frac{A_j}{A^{max}} + \alpha_2 \times \frac{I_j}{I^{max}} + \alpha_3 \times \frac{C_j}{C^{max}} + \alpha_4 \times \frac{R_j}{R^{max}} + \alpha_5 \times \frac{V_j}{V^{max}} + \alpha_6 \times \frac{H_j}{H^{max}},$$

em que α_i , $i = 1, \dots, 6$ representa o peso atribuído a cada atributo.

6.2 Estratégias para a seleção da próxima peça

As estratégias de seleção da próxima peça a colocar na pele dividem-se em dois grupos. A primeira é também a mais simples do ponto de vista computacional. Consiste em escolher uma peça por ordem crescente ou decrescente do valor de um dos seus atributos (G1) a (G7). Essa estratégia é designada abaixo através da sigla (S1.I/D). A segunda estratégia restringe a escolha da próxima peça a um dos grupos de peças definidos na secção anterior. Trata-se de uma estratégia genérica designada abaixo através da sigla (S2.I/D). O grupo de peças são escolhidas por ordem crescente (S2.I) ou

decrecente (S2.D) do valor do seu índice. A título de exemplo, se as peças tiverem sido agrupadas com base na sua área, e se for escolhida uma estratégia do tipo (S2.D), as primeiras peças a serem posicionadas na pele serão as peças de maior área.

A seleção de uma peça dentro do grupo que foi previamente escolhido pode ser feita de duas formas distintas: com base nas características dos IFP das peças relativamente à pele (estratégias (S2.I/D.1)), ou com base no valor da função usada para avaliar a qualidade dos pontos válidos de posicionamento (estratégias (S2.I/D.2)). No primeiro caso, foram exploradas diferentes alternativas que são resumidas no final desta secção. Na estratégia (S2.D.1.a) e assumindo que as peças foram agrupadas com base no valor da sua área, por exemplo, o grupo das peças maiores é escolhido em primeiro lugar. Cada uma das peças desse grupo possui um conjunto de IFP que determinam os pontos válidos de posicionamento dentro da pele. Nessa estratégia, as peças desse grupo são escolhidas por ordem crescente da área do menor dos seus IFP. O objetivo é tentar encontrar uma peça cuja qualidade de encaixe numa determinada zona da pele é (previsivelmente) o melhor possível. No caso das estratégias (S2.I/D.2), o critério usado para escolher uma peça do grupo é o valor que é dado pela função que avalia a qualidade dos pontos de posicionamento. Essas funções são introduzidas na Secção 6.4.

As estratégias de seleção da próxima peça podem ser resumidas da forma seguinte:

(S1.I/D) seleção de uma peça a partir do conjunto completo de peças ordenadas por ordem crescente (S1.I) ou decrescente (S1.D) do valor de um determinado atributo;

(S2.I/D) seleção de um grupo de peças por ordem crescente (S2.I) ou decrescente (S2.D) do valor do seu índice, e seleção de uma peça desse grupo com base:

(S2.I/D.1) nas características dos IFP;

(S2.I/D.2) no valor da função utilizada para avaliar os pontos de posicionamento.

As características dos IFP foram escolhidas como critério de seleção da peça porque, em alguns casos, os IFP podem efetivamente fornecer informação sobre a qualidade do ajuste de uma peça numa determinada zona da pele. Como já referimos, se o IFP de uma peça de área reduzida tiver ele também uma área pequena, é previsível que essa peça se ajuste bem nessa região da pele. Com base nesse princípio, foram exploradas as seguintes estratégias para selecionar uma peça dentro do grupo de peças que foi previamente escolhido:

- (S2.I/D.1.a) seleção da peça que possui o IFP com menor área;
- (S2.I/D.1.b) seleção da peça que possui o IFP com maior área;
- (S2.I/D.1.c) seleção da peça com o maior ou o menor IFP em função do índice do grupo de peças selecionado.

É importante notar que ao aplicar uma destas estratégias, a região da pele de posicionamento admissível é selecionada ao mesmo tempo que a peça.

A aplicação da estratégia (S2.I/D.2) implica avaliar os pontos de posicionamento para cada uma das peças do grupo usando uma das funções de avaliação que serão discutidas mais abaixo. No grupo de peças que foi escolhido, o par peça/ponto que produz o melhor resultado é aquele que é escolhido. Essa estratégia implica a seleção simultânea da próxima peça a colocar e do ponto exato na pele onde essa peça será colocada. Os pontos que são efetivamente avaliados devem pertencer a uma determinada região da pele que é previamente escolhida. As estratégias usadas para selecionar essas regiões são descritas na secção seguinte.

6.3 Estratégias para a seleção da região de posicionamento admissível

A área da região da pele na qual se procura uma posição válida para colocar a próxima peça tem um impacto evidente no desempenho dos

algoritmos. Para que seja mais eficiente, a procura é limitada a uma região da pele. A seleção dessa região permite também controlar o preenchimento da pele dando prioridade, por exemplo, a regiões com determinadas características.

Algumas estratégias para a seleção da próxima peça a colocar na pele obrigam à seleção da região de posicionamento. É o caso das estratégias que dependem das características dos IFP. Para os outros casos, as regiões selecionadas são as seguintes:

- (P1) todas as zonas livres da pele;
- (P2) níveis verticais da direita para a esquerda da pele;
- (P3) níveis verticais da esquerda para a direita da pele;
- (P4) menor IFP da peça;
- (P5) maior IFP da peça;
- (P6) maior ou menor IFP da peça, dependendo do grupo da peça selecionada;
- (P7) zona livre mais pequena da pele;
- (P8) maior zona livre da pele;
- (P9) zona livre da pele com o menor índice de qualidade;
- (P10) zona livre da pele com o maior índice de qualidade;
- (P11) zona livre da pele com o contorno menos irregular;
- (P12) zona livre da pele com o contorno mais irregular.

A estratégia (P1) corresponde ao caso extremo em que a região escolhida é na realidade a totalidade da pele.

As estratégias (P2) e (P3) inspiram-se nas estratégias de corte do couro usados pelos operadores da Coindu. Consistem em preencher a pele colocando as peças disponíveis de forma a ocupar o maior espaço possível em cada um dos níveis. Os operadores só começam a preencher o nível seguinte quando não existem mais peças que possam ser colocadas no nível atual.

As estratégias (P4) a (P6) restringem o posicionamento do ponto de referência de uma peça a um determinado IFP dessa peça com a pele. A título de exemplo, se for usada a estratégia de agrupamento baseada na área das peças (G1) em conjunto com a estratégia (S1.D) e (P4), a primeira peça a ser colocada será a maior das peças, e será colocada numa zona da pele que é delimitada pelo IFP mais pequeno dessa peça com a pele. A posição exata dessa peça nessa região será determinada através das funções de avaliação de pontos de posicionamento que são descritas na próxima secção.

As zonas livres da pele referidas nas estratégias (P7) a (P12) referem-se a espaços vazios e disjuntos na pele onde possa ser colocada a peça que foi escolhida nos passos anteriores. Explorámos também a possibilidade de escolher uma zona livre da pele usando um critério baseado na sua qualidade. A qualidade de uma zona livre é medida com base na percentagem da sua superfície coberta por zonas de qualidade A. Se nenhuma zona livre é de qualidade A, o índice de qualidade é medido a partir das zonas de qualidade B e assim sucessivamente. Finalmente, a irregularidade de uma zona livre usada como critério nas estratégias (P11) e (P12) é medida a partir do número de pontos do polígono que definem o contorno dessa zona.

6.4 Estratégias de avaliação dos pontos de posicionamento

Após a seleção de uma peça e de uma região de posicionamento admissível, a fase seguinte consiste em determinar a posição exata da peça na pele. Essa escolha é feita com base no valor de uma função de avaliação dos pontos onde a peça poderá ser colocada. Várias funções foram consideradas. Algumas baseiam-se em critérios simples como a distância da peça ao bordo da pele, enquanto outras, mais complexas, procuram medir a qualidade do ajuste da peça ao plano de corte atual, ao bordo da pele ou às zonas de qualidade da pele. Alguns critérios baseiam-se na área da interseção de um *offset* da peça com a região exterior da pele e com o plano de corte atual. A Figura 7 ilustra esse conceito.

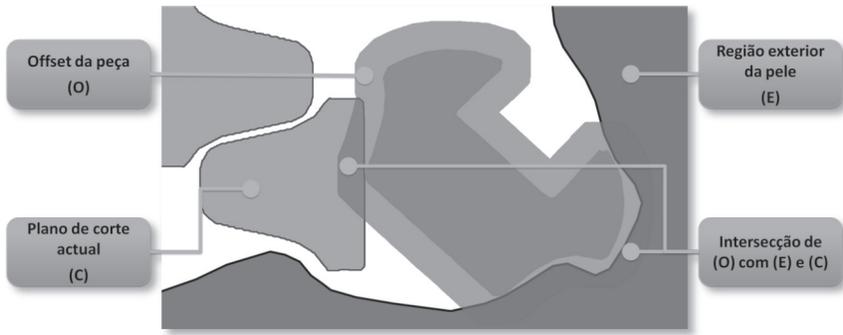


Figura 7: Interseção entre o *offset* de uma peça, o exterior da pele e o plano de corte atual

Seja I o conjunto dos polígonos que resultam da interseção do *offset* O de uma peça p com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele, e seja $area(I_i)$ a área do i -ésimo polígono de I . Foram consideradas as seguintes funções para avaliar o posicionamento de uma dada peça p :

(E1) $\sum_{i=1}^{|I|} area(I_i)$: área total da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele;

(E2) $\sum_{i=1}^{|I|} area(I_i)/(area(O) - area(p))$: área relativa da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele;

(E3) $max_{i=1, \dots, |I|} area(I_i)$: área do maior polígono resultante da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele;

(E4) $max_{i=1, \dots, |I|} area(I_i)/(area(O) - area(p))$: área relativa do maior polígono resultante da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele;

(E5) área da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele mais a área das zonas de qualidade de p que estão sobre zonas de qualidade da pele equivalente;

(E6) área relativa da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele mais a área das zonas de qualidade de p que estão sobre zonas de qualidade da pele equivalente;

(E7) área da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele mais a área das zonas de qualidade de p que estão sobre zonas de qualidade B, C ou D da pele;

(E8) área relativa da interseção de O com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele mais a área das zonas de qualidade de p que estão sobre zonas de qualidade B, C ou D da pele;

(E9) número de espaços vazios gerados ao colocar a peça p ;

(E10) área total do desperdício gerado ao colocar a peça p ;

(E11) distância de p ao bordo da pele;

(E12) distância de p ao centro da pele;

(E13) distância de p à região com menor nível de qualidade da pele;

(E14) distância de p à região com maior nível de qualidade da pele.

Na Figura 7, a interseção do *offset* da peça com a região exterior da pele e com as peças do plano de corte atual dá origem a dois polígonos disjuntos. A função (E1) corresponde à soma de todas as áreas dos polígonos resultantes dessa interseção. A função (E3) procura privilegiar as posições em que grande parte da peça está em contacto com o contorno da pele ou com o plano de corte atual. As funções (E5) a (E8) privilegiam as posições em que a peça tem ao mesmo tempo um bom ajuste ao contorno da pele e ao plano atual, e um bom aproveitamento das zonas de qualidade da pele. As funções (E5) e (E6) favorecem as posições em que há uma correspondência perfeita entre as zonas de qualidade da peça e as da pele. Por seu lado, as funções (E7) e (E8) valorizam as posições em que se consegue um melhor aproveitamento das zonas de qualidade inferior.

A função (E9) contabiliza o número dos espaços vazios que seriam gerados se a peça fosse colocada no ponto de posicionamento em análise. Nessa função, não são considerados os espaços vazios em que não seja possível colocar qualquer uma das peças disponíveis. Esses espaços são considerados como desperdício na função (E10).

A região com menor ou maior nível de qualidade da pele usada nas funções (E13) e (E14), respetivamente, é determinada através da divisão da

pele em secções quadrangulares. O nível de qualidade dessas secções é avaliado pela estratégia de agrupamento de peças (G5).

Em alguns casos, é possível optar por um ponto de posicionamento que minimize ou maximize uma determinada função de avaliação, como são os casos de (E12) a (E14). No caso de (E12), por exemplo, designaremos por (E12.MIN) e (E12.MAX), respetivamente, os casos em que se procura um ponto de posicionamento que minimiza ou maximiza essa função de avaliação. Para as outras funções apenas faz sentido procurar o ponto que maximiza o valor da função (funções (E1) a (E8)), ou que minimiza o seu valor (funções (E9) a (E11)).

6.5 Síntese e avaliação da qualidade das soluções

A partir destes quatro grupos de estratégias, é possível definir três grandes variantes para o algoritmo construtivo. As principais diferenças entre essas variantes resultam da estratégia que é usada para selecionar a próxima peça a colocar na pele:

- se for utilizada a estratégia (S1.I/D), a próxima peça a colocar na pele, a região de posicionamento admissível e a posição da peça nessa região são selecionadas sequencialmente e de forma independente;
- se for utilizada a estratégia (S2.I/D.1), a próxima peça é selecionada com base nas características dos seus IFP. A escolha da peça implica a seleção de uma região de posicionamento admissível. Para as variantes que usam a estratégia (S2.I/D.1), não é necessário especificar uma estratégia de seleção das regiões de posicionamento admissível na pele;
- se for utilizada a estratégia (S2.I/D.2), a peça que é selecionada é aquela que resultar no maior valor da função de avaliação do posicionamento num dos pontos da região de posicionamento admissível. A próxima peça a ser colocada na pele, a região de posicionamento admissível e a posição final da peça são determinadas simultaneamente.

A eficiência dos planos de corte criados para uma determinada ordem de fabrico é avaliada com base em dois critérios. Para todas as peles exceto a última a ser cortada, essa eficiência é medida com base na percentagem de área da pele que é coberta pelas peças do plano de corte (nível de aproveitamento). Na última pele, a qualidade do plano de corte é medido com base na área não utilizada que ainda pode ser aproveitada para cortar peças de outras ordens de fabrico. Para medir o valor dessa área, a Coindu usa um procedimento que consiste em colocar um quadrado com uma determinada dimensão nas zonas livres da última pele. Os espaços onde esse quadrado não entra são considerados desperdícios. Ao longo desse procedimento, o quadrado mantém a sua orientação e não é feita qualquer distinção entre zonas de qualidade.

7. Um algoritmo de pesquisa por vizinhança variável

Além das heurísticas construtivas descritas na secção anterior, foi desenvolvido um algoritmo de melhoria baseado num procedimento de pesquisa por vizinhança variável. Foram exploradas novas funções de vizinhança a partir de uma representação das soluções baseada essencialmente em sequências de peças.

O plano de corte inicial é obtido a partir da heurística construtiva que resulta da aplicação das estratégias (G1), (S2.D.1.c), (P6) e (E11). A heurística determina a sequência pela qual as peças são colocadas e a posição exata de cada peça na pele. Um plano de corte pode ser completamente definido por um conjunto de peças, as suas orientações e correspondentes posições na pele. Em alternativa, um plano pode ser representado através de uma sequência de peças e por um procedimento de colocação dessas peças baseado na aplicação das estratégias de seleção da região de posicionamento admissível e de avaliação dos pontos de posicionamento apresentados na secção anterior (as peças são seleccionadas e colocadas na pele uma após a outra segundo a ordem definida pela sequência, e o processo é repetido até não haver mais peças na sequência). No algoritmo de pesquisa por

vizinhança variável que foi desenvolvido, consideramos esta última representação.

Foram definidos quatro tipos de movimentos a partir dessa representação:

1. substituição de uma peça p da sequência por outra que não está na sequência, eliminação da subsequência de peças desde a peça p até ao final da sequência original, e aplicação da heurística construtiva para preencher o resto da pele;
2. substituição de uma peça p da sequência por uma peça p' que não está na sequência, colocação das peças desde p' até ao final da sequência original aplicando as estratégias (P6) e (E11) da heurística construtiva, e aplicação da heurística construtiva completa para preencher o resto da pele;
3. permutação de duas peças p e p' da sequência, se a colocação da peça p' resultar num valor da função de avaliação dos pontos de posicionamento superior ao da peça p , colocação das restantes peças da sequência aplicando as estratégias (P6) e (E11) da heurística construtiva, e aplicação da heurística construtiva completa para preencher o resto da pele;
4. eliminação de uma peça p da sequência, colocação das restantes peças da sequência aplicando as estratégias (P6) e (E11) da heurística construtiva, e aplicação da heurística construtiva completa para preencher o resto da pele.

A peça p é selecionada com base na qualidade do seu encaixe na pele que é medido a partir da área relativa de interseção do *offset* da peça com o plano de corte atual e com a zona exterior da pele (estratégia (E2)). Seja P o conjunto de peças candidatas a partir do qual é selecionada a peça p . O conjunto de peças que são candidatas à substituição de peça p na sequência é designado por P' , enquanto p' representa a peça que é selecionada nesse conjunto. A sequência de peças associada ao atual plano de corte é designada por S .

As peças do conjunto P são escolhidas a partir de uma determinada parte da sequência associada ao plano de corte atual. Essa subsequência de peças é escolhida com base na percentagem de aproveitamento da pele que se verifica imediatamente após ter colocado as respectivas peças. O conjunto P pode ser definido, por exemplo, como um subconjunto de peças da sequência original cuja colocação gera aproveitamentos da pele compreendidos entre 50% e 70%. Apenas serão escolhidas as peças que, após terem sido colocadas na pele, gerarem aproveitamentos nesse intervalo. Seja U o vetor composto pelos valores dos aproveitamentos obtidos após colocar uma peça da sequência S :

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_{|S|})$$

com $u_k < u_{k+1}, k = 1, \dots, |S| - 1$. O vetor U representa a evolução do aproveitamento de uma pele à medida que as peças de S vão sendo colocadas. Para identificar uma subsequência da sequência inicial de peças, usam-se os valores u_{min} e u_{max} que designam respetivamente o limite inferior e superior para o aproveitamento da pele. Para o exemplo anterior, teríamos $u_{min} = 50\%$ e $u_{max} = 70\%$.

A definição das vizinhanças depende dos movimentos que foram descritos acima e dos seguintes parâmetros:

- q : número de peças candidatas a serem substituídas, permutadas com outra peça ou eliminadas da sequência ($q=|P|$);
- r : número de peças candidatas à substituição da peça p ($r=|P'|$);
- subsequência (s_i, \dots, s_j) da sequência de peças inicial, a partir da qual são selecionadas as peças de P , com

$$i = \arg \min_{l \in \{1, \dots, |S|\}} \{u_l : u_l \geq u_{min}, u_l \in U\},$$

e

$$j = \arg \max_{l \in \{1, \dots, |S|\}} \{u_l : u_l \leq u_{max}, u_l \in U\}.$$

Quando $q = 1$, a peça p que é substituída, permutada ou eliminada é a peça da subsequência que resulta no menor valor da função de avaliação dos pontos de posicionamento de uma dada sequência. Por seu lado, quando $r = 1$, a peça p é substituída por uma peça p' que resulta no maior valor da função de avaliação dos pontos de posicionamento. Variando os valores desses parâmetros, é possível definir diferentes vizinhanças.

A exploração destas classes de vizinhanças é feita através de um algoritmo baseado na versão básica do método de pesquisa por vizinhança variável descrito em (Hansen, Mladenovic & Pérez, 2010). A pesquisa é efetuada em vizinhanças específicas definidas a partir dos parâmetros apresentados acima. A cada iteração do algoritmo, a pesquisa de uma solução numa vizinhança diferente pode permitir melhorar a qualidade do plano de corte atual uma vez que o ótimo local numa vizinhança não é necessariamente o mesmo que o ótimo local da vizinhança que foi previamente explorada.

8. Experiências computacionais

Para avaliar o desempenho dos algoritmos, foram conduzidas uma série de experiências computacionais realizadas a partir de instâncias reais que correspondem a modelos de automóveis em produção na Coindu. Os algoritmos foram implementados em C++, e integrados na aplicação *COINDUNester* desenvolvida para o efeito e que possui funcionalidades adicionais de tratamento de peles, peças e planos de corte. Para implementar algumas funções geométricas da aplicação, recorreremos à versão 3.7 da biblioteca *CGAL (Computational Geometry Algorithms Library)*. Os testes foram executados num PC com um processador *Intel Core i3* com 2.27 GHz e 4GB de RAM.

Na Coindu, o tempo médio necessário para construir um plano de corte numa pele de couro é de 600 segundos por pele. Essa operação é efetuada por dois operadores manuais. Esse valor foi usado como referência para avaliar o desempenho dos algoritmos e também como um parâmetro para limitar o tempo máximo de execução.

Para avaliar o desempenho das heurísticas construtivas, foram realizados dois conjuntos de experiências. No primeiro, comparou-se o desempenho das diferentes estratégias descritas na Seção 6. No segundo conjunto de experiências, usamos as estratégias que foram identificadas como sendo as mais rápidas e as mais promissoras em termos de qualidade dos planos de corte gerados, e aplicamos essas estratégias a um conjunto de várias instâncias diferentes.

Os testes foram realizados a partir de dois conjuntos de dados diferentes que correspondem cada um a um modelo de automóvel atualmente em produção na Coindu. Cada conjunto corresponde a um dos estofos de um carro completo (assentos e encostos da frente e de trás) dos referidos modelos. A instância associada ao primeiro modelo é composta por 23 peças diferentes. A do segundo modelo tem 22 peças. Esses conjuntos serão designados por modelo 1 e modelo 2, respectivamente.

A diversidade de peças entre os dois modelos é grande. No modelo 1, a peça de maior dimensão é cerca de 28 vezes maior que a peça mais pequena (10 vezes no caso do modelo 2). Uma análise comparativa entre as áreas (A), perímetros (P) e áreas dos retângulos envolventes (R) das peças de cada um dos modelos permite ter uma ideia sobre o grau de irregularidade das peças envolvidas. Em ambos os modelos, a razão entre (A) e (R) varia entre 41% e 99%. Valores mais baixos indicam uma maior irregularidade da peça em causa enquanto que valores mais elevados apontam para uma peça com contornos mais regulares. As tabelas 1 e 2 apresentam os dados para as peças dos modelos 1 e 2.

Na nossa implementação, consideramos um número limitado de rotações para cada peça. Para que uma peça rodada resulte numa peça significativamente diferente da figura original, foi aplicado um conjunto de regras de rotação para diferentes tipos de peças. Para as peças grandes e médias com várias concavidades, foram aplicadas 7 rotações múltiplas de 45°. Para as peças com poucas concavidades, foram aplicadas apenas rotações múltiplas de 90°. Para as peças com dois eixos de simetria (horizontal e vertical), foram considerados dois casos: se a razão entre a largura e o

comprimento do retângulo envolvente for muito diferente de 1, então são consideradas 3 rotações (45°, 90° e 135°). Caso contrário, é considerada apenas uma rotação de 45°. As peças de pequenas dimensões são rodadas apenas em 90°. No final, essas regras dão origem a 75 rotações para o modelo 1 e a 68 rotações para o modelo 2. Contando com a representação original (não rodada) das peças, os modelos 1 e 2 acabam por ter respectivamente 98 e 90 peças diferentes.

Tabela 1: Caracterização das peças do modelo 1

Peças	Zonas de qualidade	Área (cm ²) (A)	Perímetro (cm) (P)	Área do retângulo envolv. (cm ²) (R)	Razão A/R
1	B, D	337.21	85.81	342.19	0.99
2	B, D	598.55	116.66	869.19	0.69
3	A, D	858.80	165.21	1311.78	0.65
4	A, D	648.54	117.60	1038.15	0.62
5	B, D	983.56	137.66	1425.91	0.69
6	B, D	804.93	173.76	1356.72	0.59
7	B, D	598.79	114.68	914.06	0.66
8	A, D	1607.4 4	216.60	2138.60	0.75
9	A, D	92.55	39.68	119.52	0.77
10	A, D	70.06	37.36	110.92	0.63
11	A, D	70.06	37.36	110.92	0.63
12	A, D	92.55	39.68	119.52	0.77
13	A, D	58.15	38.44	115.51	0.50
14	A, D	58.15	38.44	115.51	0.50
15	A, D	778.61	118.91	1165.80	0.67
16	B, D	469.46	90.33	498.32	0.94
17	A, D	417.73	97.43	521.01	0.80
18	A, D	115.04	49.62	149.58	0.77
19	A, D	778.61	118.91	1165.80	0.67
20	A, D	417.73	97.43	519.26	0.80
21	A, D	1607.4 4	216.60	2135.64	0.75
22	B, D	835.62	169.54	1378.87	0.61
23	B, D	851.76	123.40	1242.99	0.69

Tabela 2: Caracterização das peças do modelo 2

Peças	Zonas de qualidade	Área (cm ²) (A)	Perímetro (cm) (P)	Área do retângulo envolv. (cm ²) (R)	Razão A/R
1	A, B, C	426.81	80.00	503.44	0.85
2	A, C	205.79	70.39	265.41	0.78
3	A, C	377.01	105.72	678.03	0.56
4	A, C	205.79	70.39	265.41	0.78
5	A, C	377.01	105.72	678.03	0.56
6	A, B, C	660.46	109.24	717.43	0.92
7	A, B, C	660.46	109.24	718.87	0.92
8	A, B, C	872.18	132.02	1082.06	0.81
9	A, C	362.35	83.23	504.35	0.72
10	A, C	418.77	125.73	1013.83	0.41
11	A, C	362.35	83.23	504.35	0.72
12	A, C	418.22	122.02	987.18	0.42
13	A, B, C	1878.19	206.64	2391.15	0.79
14	A, C	489.57	94.11	637.26	0.77
15	A, C	489.57	94.11	637.26	0.77
16	A, B, C	795.16	123.98	1082.79	0.73
17	A, B, C	766.67	122.66	1019.66	0.75
18	A, B, C	593.51	121.87	974.66	0.61
19	A, B, C	593.54	121.82	974.83	0.61
20	A, C	279.84	68.01	362.98	0.77
21	A, C	499.28	95.36	696.01	0.72
22	A, B, C	529.91	148.37	993.97	0.53

Para cada modelo, foram criadas várias instâncias a partir de diferentes combinações de peças que correspondem a ordens de fabrico. O número de peças usadas para cortar essas ordens é igual a 3. A Tabela 3 descreve os detalhes de cada uma dessas ordens de fabrico: o número de peças diferentes é indicado na coluna DPeças e o número total de peças na coluna NPeças.

O primeiro conjunto de experiências foi realizado com a ordem de fabrico 1 do modelo 1. Cada uma das classes de estratégias foi avaliada de forma individual. Uma vez que a combinação de todas as estratégias origina um número elevado de algoritmos diferentes, a avaliação de uma determinada

categoria de estratégias é efetuada restringindo o conjunto de estratégias pertencentes às outras categorias. As estratégias foram avaliadas com base no número de peças colocadas nas peles, na percentagem de aproveitamento de cada uma das peles, no tempo de computação necessário para gerar cada um dos planos de corte, e na área útil da última pele. A descrição exaustiva dos resultados obtidos pode ser consultada em (Alves *et al.*, 2012a).

Tabela 3: Instâncias (ordens de fabrico)

MODELO	ORDEM	DPeças	NPeças
1	1	23	60
	2	8	80
	3	23	80
	4	8	100
	5	23	100
	6	8	120
	7	23	120
2	1	22	60
	2	9	80
	3	22	80
	4	22	100

Essas experiências permitiram identificar as combinações de estratégias que dão origem aos algoritmos mais rápidos (Tabela 4). O critério usado nesse caso foi o tempo necessário para a construção do plano de corte referente à primeira pele. Além disso, foram identificadas também as combinações de estratégias que conduzem às melhores soluções em termos de aproveitamento obtido na primeira pele. Na Tabela 4, o índice de cada uma dessas combinações é indicado na coluna IND. As heurísticas mais rápidas correspondem às combinações 1 a 10. As heurísticas que geram as melhores soluções correspondem às combinações 11 a 20. Na Tabela 4, são indicados os casos em que se procuram pontos de posicionamento que maximizam ou minimizam as funções de avaliação (para os casos em que possam existir ambiguidades).

Tabela 4: Combinações de estratégias que resultam nas heurísticas mais rápidas (1-10) e nas heurísticas que geram os melhores planos de corte (11-20)

IND	Agrupamento	Próxima peça	Região de posicionamento admissível	Avaliação dos pontos de posicionamento
1	(G1)	(S2.D.1.a)	-	(E1)
2	(G5)	(S2.D.1.a)	-	(E1)
3	(G6)	(S2.D.1.a)	-	(E1)
4	(G1)	(S2.D.1.c)	-	(E1)
5	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E1)
6	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E12.MAX)
7	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E14.MIN)
8	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E14.MAX)
9	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E13.MIN)
10	(G5)	(S2.D.1.c)	-	(E13.MAX)
11	(G5)	(S1.D)	(P1)	(E1)
12	(G5)	(S1.D)	(P6)	(E1)
13	(G1)	(S1.D)	(P7)	(E1)
14	(G5)	(S1.D)	(P7)	(E1)
15	(G6)	(S1.D)	(P7)	(E1)
16	(G5)	(S1.D)	(P9)	(E1)
17	(G5)	(S1.D)	(P12)	(E1)
18	(G2)	(S2.D.2)	(P2)	(E1)
19	(G1)	(S2.D.2)	(P7)	(E1)
20	(G1)	(S2.D.2)	(P12)	(E1)

Na segunda série de experiências computacionais, foram usadas todas as ordens de fabrico descritas na Tabela 3. Uma descrição exhaustiva dos resultados obtidos pode ser consultada em (Alves *et al.*, 2012a). Todos os algoritmos mais rápidos (1 a 10) geraram planos de corte dentro do limite de 600 segundos. O tempo de computação mais elevado para a geração de um plano de corte na primeira pele foi de 148,36 segundos. O tempo de computação dos algoritmos depende do número de peças diferentes na ordem de fabrico, e do número de NFP e IFP que têm de ser calculados entre cada par de peças e entre as peças e a pele.

Para algumas ordens de fabrico do modelo 1 com 8 peças diferentes, esses algoritmos geraram planos de corte para a primeira pele em menos de 20 segundos. O algoritmo 7 é o mais rápido em 3 (de 11) ordens. Para as restantes instâncias, o algoritmo mais rápido foi o algoritmo 9. Os algoritmos

1 a 5 demoram geralmente mais tempo a completar as ordens do que os algoritmos 6 a 10 devido ao peso computacional envolvido no cálculo dos *offsets*.

Entre os algoritmos mais rápidos (1 a 10), o algoritmo 5 é o que gera os planos de corte com os melhores aproveitamentos na maior parte dos casos. Esse algoritmo combina as estratégias (G5) com (S2.D.1.c) e (E1). Para 7 ordens de fabrico, esse algoritmo conduz à melhor solução quer em termos de aproveitamento na primeira pele, quer em termos de percentagem de área útil que sobra na última pele. Para a ordem 2 do modelo 1, esse algoritmo necessita apenas de duas peles para completar a ordem, enquanto os restantes (do conjunto dos algoritmos mais rápidos) necessitam das três peles. O tempo máximo de computação requerido por este algoritmo para gerar um plano de corte para a primeira pele foi de 126.80 segundos (ordem 7 do modelo 1).

Os resultados obtidos para os algoritmos 11 a 20 mostram que a maioria destes algoritmos não é capaz de gerar planos de corte em menos de 600 segundos. A exceção é o algoritmo 12 que combina as estratégias (G5), (S1.D), (P6) e (E1), e que consegue gerar planos de corte dentro do limite de tempo definido para todas as ordens exceto uma. A utilização da estratégia (P6) para a seleção da região de posicionamento admissível permite restringir o conjunto de pontos de posicionamento que têm de ser inspecionados. O critério usado para a seleção dessa região baseia-se nas características dos IFP entre a peça e a pele. Quando combinada com a estratégia (S1.D) de seleção da próxima peça a colocar, essa estratégia permite obter soluções de boa qualidade sem comprometer o tempo de computação.

O algoritmo 12 conduz às melhores soluções em termos de aproveitamento da primeira pele em 7 ordens de fabrico. Para além disso, para 4 ordens de fabrico, esse algoritmo gera também as melhores soluções em termos de percentagem de área útil que sobra na última pele.

Para avaliar o desempenho do algoritmo de pesquisa por vizinhança variável, foram realizadas também duas séries de experiências computacionais: a primeira teve por objetivo a afinação dos parâmetros do

algoritmo e a comparação de estratégias alternativas, enquanto que o segundo conjunto de experiências consistiu na avaliação do desempenho das melhores abordagens identificadas na fase de afinação do algoritmo.

Os objetivos específicos da primeira série de experiências computacionais foram os seguintes:

- a) avaliar o impacto de cada vizinhança na qualidade dos planos de corte gerados;
- b) comparar diferentes estratégias para a definição dos intervalos de aproveitamento (u_{min}, u_{max}) com base nos quais as peças de P são selecionadas;
- c) avaliar valores alternativos para os parâmetros associados ao tamanho dos conjuntos P a partir dos quais são selecionadas as peças p que irão ser substituídas, permutadas ou eliminadas da sequência;
- d) avaliar valores alternativos para os parâmetros associados ao tamanho dos conjuntos P' a partir dos quais são selecionadas as peças a serem inseridas na sequência;
- e) comparar a qualidade dos planos de corte obtidos através da exploração de diferentes sequências de vizinhanças.

Foram usadas 24 instâncias definidas a partir dos modelos 1 e 2 descritos acima. Para o modelo 1, foram criadas 4 ordens de fabrico com diferentes combinações das 23 peças disponíveis. O número de peças diferentes em cada ordem foi de 8, 12, 15 e 23, respetivamente, enquanto que o número total de peças nessas ordens foi igual a 100. Para cada ordem, o algoritmo foi repetido com 3 peles diferentes. No total, são assim 12 instâncias que foram definidas a partir do modelo 1. Para o modelo 2, foram criadas 12 ordens distintas a partir de um conjunto de 22 peças disponíveis. O número de peças diferentes em cada ordem varia entre 5 e 22 (5,7,8,9,12,14,20,22). O número total de peças por ordem foi igual a 100. Foi usada a mesma pele para todas essas ordens de fabrico. A execução do algoritmo foi limitada a 600 segundos.

Os resultados obtidos nessa fase de afinação podem ser consultados em detalhe em (Alves *et al.*, 2012b). Essas experiências permitiram identificar as

estratégias promissoras para o algoritmo de pesquisa por vizinhança variável. Essas estratégias passam por usar as 4 estruturas (gerais) de vizinhança que é possível definir a partir dos movimentos descritos na Seção 7. Para cada uma dessas estruturas gerais, foram identificadas estruturas de vizinhança promissoras que são definidas a partir dos parâmetros seguintes: $q = 1, r = 3, (u_{min}, u_{max}) = (10\%, 50\%)$; $q = 3, r = 3, (u_{min}, u_{max}) = (10\%, 50\%)$.

Esses parâmetros e estratégias foram usados na segunda série de experiências computacionais num conjunto de 107 instâncias descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Instâncias

MODELO	Ordem de fabrico	N.º de peças diferentes
1	1,..., 5	5
	6,...,10	8
	11,...,15	10
	16,...,18	12
	19,...,21	15
	22	23
2	1,...,10	5
	11,...,20	8
	21,...,30	10
	31,...,35	12
	36,...,40	15
	41	22

A lista exhaustiva de resultados é descrita em (Alves *et al.*, 2012b). Lembramos que o plano de corte inicial é gerado usando a heurística construtiva apresentada neste artigo com as estratégias (G1), (S2.D.1.c), (P6) e (E11). O algoritmo de pesquisa por vizinhança variável conseguiu melhorar na grande maioria dos casos a solução gerada inicialmente por essa heurística construtiva. Após 600 segundos de computação, o algoritmo permitiu uma melhoria da solução inicial em cerca de 2.74% em termos de aproveitamentos. Em cerca de metade das instâncias, o algoritmo gerou um plano de corte de melhor qualidade do que o inicial nos primeiros 200 segundos de computação. Após 400 e 600 segundos, foram registradas melhorias

relativamente à solução inicial em cerca de 84% e 96% dos casos, respetivamente. A Figura 8 mostra a evolução do nível médio de aproveitamento ao longo da execução do algoritmo.

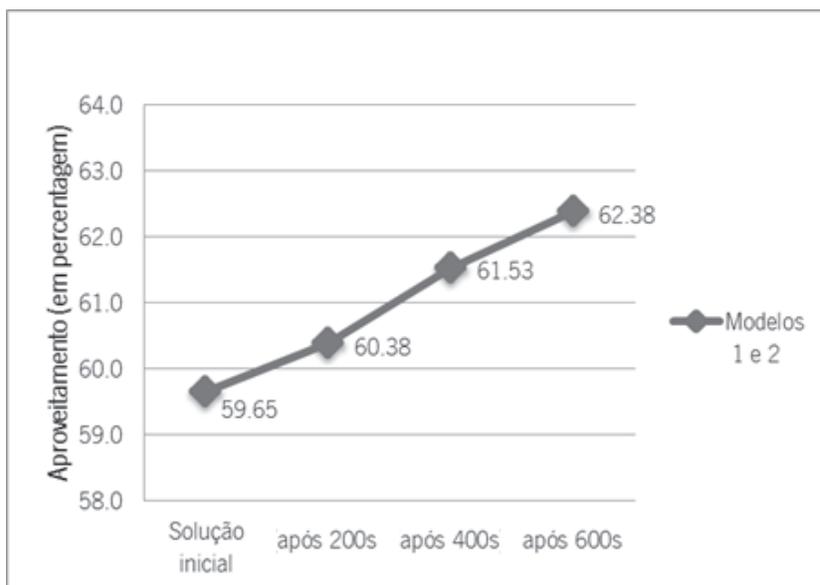


Figura 8: Evolução dos níveis médios de aproveitamento ao longo da execução do algoritmo de pesquisa por vizinhança variável

Os níveis de aproveitamento das peles assim como as melhorias que o algoritmo de pesquisa por vizinhança variável permite alcançar dependem do modelo de carro que é considerado. A Figura 9 apresenta a evolução das soluções em termos de percentagem de aproveitamento para os dois modelos. Os gráficos ilustram a qualidade das soluções iniciais e a capacidade do algoritmo em melhorar essas soluções.

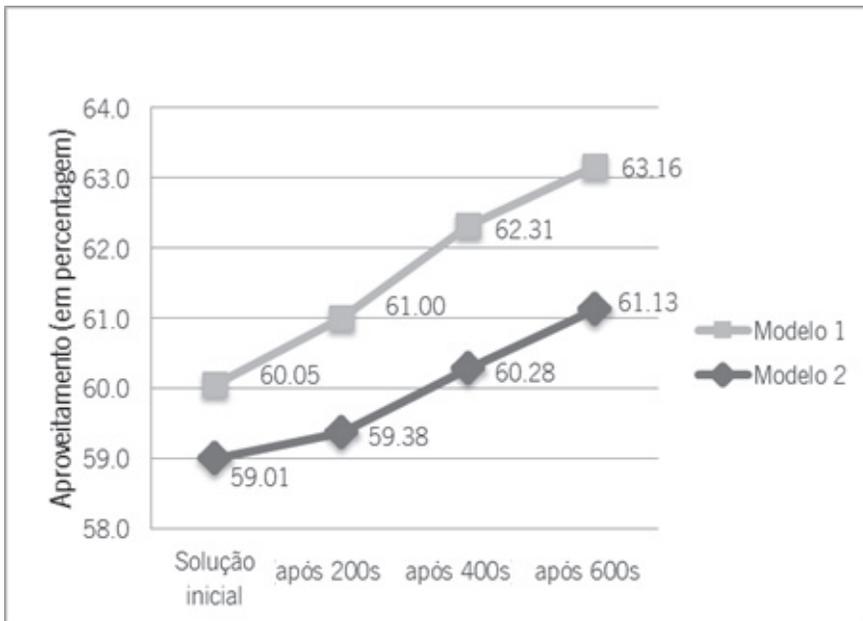


Figura 9: Evolução dos níveis de aproveitamento para os modelos 1 e 2

É importante salientar que os níveis de aproveitamento do couro que são alcançados por estes algoritmos são competitivos com os resultados obtidos pelos operadores manuais da Coindu. Além disso, os resultados são obtidos no mesmo intervalo de tempo que é necessário a dois operadores para montarem um plano de corte de forma manual. Na Coindu, o tempo médio de ciclo para o corte manual de couro é de aproximadamente 15 minutos por pele. Esse valor inclui a fase de revista da pele (5 minutos em média), e poderá variar consideravelmente, dependendo do tipo de couro, tamanho das peles, nível de qualidade e ordem de fabrico. O processo de colocação dos cortantes é executado, em média, nos 10 minutos restantes. Um único operador necessitaria do dobro do tempo (1200 segundos) para construir planos de corte com os mesmos níveis de eficiência.

9. Conclusões

O problema de corte em peles de couro é claramente um dos problemas de corte e empacotamento a duas dimensões mais difíceis que pode ser encontrado na indústria. Apesar da sua relevância prática, poucas abordagens foram propostas na literatura, e mesmo aquelas que tratam de problemas similares assentam na realidade em pressupostos e restrições que resultam numa simplificação do problema.

O valor financeiro desta matéria-prima e a dimensão económica do setor de mercado que a comercializa confere uma grande importância ao problema de corte em peles de couro. Para uma empresa como a Coindu cujo setor de corte de couro tem elevados níveis de produção, pequenos ganhos no aproveitamento desta matéria-prima convertem-se numa redução significativa dos custos totais. No ano de 2010, por exemplo, no conjunto das três unidades fabris, os níveis de produção da Coindu implicaram um consumo anual que superou o milhão de metros quadrados de couro, o que se traduziu num investimento de algumas dezenas de milhões de euros.

Neste trabalho, procurámos avaliar o potencial de duas famílias de algoritmos heurísticos para a elaboração automática de planos de corte. Analisámos um conjunto de heurísticas construtivas e um algoritmo de pesquisa por vizinhança variável. Para avaliar o desempenho desses algoritmos, foram conduzidos extensos conjuntos de experiências computacionais em instâncias reais da empresa.

Dois tipos de testes foram realizados para identificar e explorar as estratégias da heurística construtiva com melhor desempenho. Numa primeira fase, comparámos o desempenho das diferentes estratégias. A partir dos resultados destes testes, concluiu-se que a área e as zonas de qualidade das peças são fatores importantes para o agrupamento de peças. As estratégias de seleção da próxima peça a posicionar e da região de posicionamento admissível que geram os melhores resultados são aquelas que consideram os IFP das peças. Por fim, os testes computacionais revelam que as funções de avaliação dos pontos de posicionamento que envolvem o cálculo de *offsets* estão na origem de alguns dos melhores resultados obtidos.

A segunda fase de testes consistiu na aplicação das melhores e mais rápidas combinações de estratégias a todas as instâncias. Dos resultados obtidos, destacam-se os algoritmos 5 e 12 (Tabela 4). O algoritmo 5, que inclui algumas das estratégias mais rápidas, apresenta níveis competitivos de aproveitamento na generalidade dos testes realizados e envolve tempos de computação muito reduzidos. O algoritmo 12, apesar de requerer tempos de computação mais elevados, consegue alcançar níveis de aproveitamento que são na sua generalidade os mais elevados de todos os resultados apresentados. Importa também destacar o conjunto de algoritmos 6 a 10 pela sua rapidez na geração de planos de corte e pelos níveis de aproveitamento razoáveis. Este conjunto de algoritmos são uma boa alternativa para a inicialização de métodos de melhoria.

O algoritmo de pesquisa por vizinhança variável foi testado com base num conjunto significativo de instâncias com peças provenientes de modelos de carros que se encontram em produção na Coindu. As experiências realizadas mostram que o algoritmo foi capaz de melhorar a solução inicial em 96% das instâncias testadas. Em cerca de 48% dos casos, foi encontrada uma solução melhor do que a inicial nos primeiros 200 segundos de execução. Em todos os testes foi considerado um limite no tempo de computação de 600 segundos. Esse valor corresponde ao tempo médio necessário para uma equipa de dois operadores preencher uma pele de forma manual. Em termos globais, os testes confirmaram a qualidade dos planos de corte quando comparados com os resultados médios alcançados pelos operadores manuais da empresa.

BIBLIOGRAFIA

Alves, C., Brás, P., Valério de Carvalho, J., & Pinto, T. (2012). New constructive algorithms for leather nesting in the automotive industry. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1487-1505.

Alves, C., Brás, P., Valério de Carvalho, J. M., & Pinto, T. (2012). A variable neighborhood search algorithm for the leather nesting problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1-28.

Babu, A., & Babu, N. (2001). A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms. *Computer-Aided Design*, 33(12), 879-891.

Bennell, J. A., & Dowsland, K. A. (1999). A tabu thresholding implementation for the irregular stock cutting problem. *International Journal of Production Research*, 37(18), 4259-4275.

Bennell, J. A., & Oliveira, J. F. (2008). The geometry of nesting problems: A tutorial. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 397-415.

Crispin, A., Clay, P., Taylor, G., Bayes, T., & Reedman, D. (2005). Genetic algorithm coding methods for leather nesting. *Applied Intelligence*, 23(1), 9-20.

Hansen, P., Mladenović, N., & Pérez, J. A. M. (2010). Variable neighbourhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, 175(1), 367-407.

Heckmann, R., & Lengauer, T. (1995). A simulated annealing approach to the nesting problem in the textile manufacturing industry. *Annals of Operations Research*, 57(1), 103-133.

Heistermann, J., & Lengauer, T. (1995). The nesting problem in the leather manufacturing industry. *Annals of Operations Research*, 57(1), 147-173.

Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1109-1130.

Yuping, Z., Shouwei, J., & Chunli, Z. (2005). A very fast simulated re-annealing algorithm for the leather nesting problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(11-12), 1113-1118.

Yuping, Z., & Caijun, Y. (2009). A generic approach for leather nesting. *Proceedings of the Fifth International Conference on Natural Computation*, 5, 303-307.