

## REUTILIZAÇÃO DE CHAPAS DE MATERIAL BRUTO PÓS SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DE PEÇAS EM CHAPAS

**Felipe Rodrigues Ferrary**

PIPCA - Unisinos

Av. Unisinos, 950 - São Leopoldo - RS

feliperferrary@gmail.com

**Raul Gerhardt**

Fundação Escola Técnica Liberato S. V. da Cunha

Rua Inconfidentes, 395 - Novo Hamburgo - RS

raul\_rag@hotmail.com

**José Vicente Canto dos Santos**

PIPCA - Unisinos

Av. Unisinos, 950 - São Leopoldo - RS

jvcanto@unisinos.br

### RESUMO

O trabalho a seguir tem por objetivo a implementação de uma ferramenta automatizada com a finalidade de reutilizar chapas de material bruto após serem submetidas ao processo de *nesting*, processo onde peças são alocadas dentro de uma chapa plana visando minimizar a perda de matéria prima, seguido de um processo de usinagem. É calculada de forma automatizada a porção de material da chapa que não foi utilizada durante o processo e será possivelmente descartada em forma de sucata. Como resultado, é oferecida ao usuário a possibilidade de utilizar dois métodos de extração: um método envolvendo menor processamento e resultados aproximados e outro com alto nível de processamento, porém com resultados precisos. Após a extração do perfil que representa a chapa de sucata é possível reutilizar e gerenciar o estoque de chapas, dessa forma, uma vez que essa chapa se encaixe ao projeto é possível ao programador CAM reutilizá-la.

**Palavras-chave.** *Nesting*; Reutilização de Chapas; CAM.

**Área Principal.** AD&GP - PO na Administração & Gestão da Produção

### ABSTRACT

The following study aims implementing a feature that saves the scrap area of raw material sheets submitting them to a nesting process, process used in order to minimize the amount of scrap in a flat raw material sheet, followed by a machining process. In this study the part of the material in a raw sheet that was not used during the nesting process is calculated and defined as scrap. Users can choose between two different methods to extract the scrap profile. One method involves a low processing level and outputs approximate results. The other involves a high processing level, however the method outputs truthful results. After finishing the profile extraction that represents the new scrap sheet, it is possible to reuse these sheets and manage the sheet inventory. Once one of the sheets in the inventory fits in a new project, it is possible for the CAM programmer to reuse it.

**Key words.** *Nesting*; Save Off-Cut/Scrap; CAM;

**Main area.** AD & GP - OR in Administration & Production Management

## 1. Introdução

Uma questão conhecida pelos administradores dos processos estratégicos da manufatura, a perda de matéria prima, é um problema que atinge diretamente o custo da produção de um produto. Segundo Brinson (1996), perdas e desperdícios são constituídos pelas atividades que não agregam valor e que resultam em gastos de tempo e recursos, além de adicionarem custos desnecessários aos produtos. Atividades que não agregam valor são as que podem ser eliminadas sem que haja deterioração no desempenho da empresa (custo, função, qualidade e valor agregado). Empresas que buscam manterem-se líderes de mercado necessitam de sistemas automatizados e eficazes para evitar perdas, assim produzindo mais com um custo reduzido.

Quando as perdas são relacionadas à manufatura assistida por computador, pode-se claramente afirmar que empresas de grande porte investem em ferramentas automatizadas que evitam essas perdas. No processo de manufatura de peças que possuem chapas de metal ou madeira como matéria prima, o processo de *nesting* é o comumente adotado para se reduzir a quantidade de matéria prima utilizada e, por conseguinte o custo do processo como um todo. Este processo pode ser descrito como um problema clássico, onde peças são alocadas em uma chapa plana visando minimizar a perda de matéria prima (Rajasekhar e Ramesh, 2013). Este é um problema conhecido (Wascher, 2007) e pode frequentemente ser encontrado nas indústrias de metal-mecânica, vidro, construção naval, fabricação de móveis (Xie, 2007) ou até mesmo na indústria têxtil (Chryssolouris, 2000) com a finalidade de evitar perdas devido à sua eficácia em alocar o maior número ou a quantidade desejada de peças dentro de uma chapa utilizando a menor quantidade de material possível.

Devido à importância desse processo, ao longo dos anos muitos artigos estudaram algoritmos em busca da forma ótima de se alocar as peças em uma chapa. Todavia, em muitos processos, de acordo com as características do projeto, a chapa não é totalmente populada e poucos artigos abordam a análise da chapa após a otimização. Sendo assim, é necessário um sistema que eficientemente extraia a porção de material determinada como sucata e administre o estoque de chapas de uma linha de produção. Seguindo o conceito de Brinson (1996), a implementação de uma ferramenta automatizada de reconhecimento e reutilização de chapas proporciona ao usuário, não só a economia de tempo do programador CAM, mas também a economia de matéria prima; por conseguinte, evita o aumento dos custos de produção.

Ao longo das últimas décadas, muitas análises e propostas já foram realizadas para minimizar as perdas no processo de *nesting*. Os estudos vão das análises mais breves e simplificadas, onde apenas formas retangulares são analisadas (Chryssolouris, 2010) até as análises mais complexas, utilizando meta-heurísticas em conjunto com algoritmos conhecidos como o algoritmo genético (Hopper, 2001).

Embora pesquisas sejam comumente encontradas na área de otimização para alocação de peças, as pesquisas na análise de pós-otimização, por se tratar de uma área de pesquisa recente, deixam a desejar. Na bibliografia atual, encontramos estudos relacionados à área que abordam os mais distintos ramos, tais como: o caráter econômico da minimização da sucata (Lee, 2000); auxílio na escolha da matéria prima (Jayavel, 1993) ou ainda propostas de modelos para determinar a melhor estratégia maximizando o lucro em indústrias que reutilizam a sucata gerada (Tang, 2009). Todavia, estudos que analisem e viabilizem a reutilização da porção que não foi utilizada em processos de manufatura envolvendo chapas como matéria prima não são comumente encontrados, sendo esta uma das motivações deste trabalho.

## 2. Problema Enfocado

Neste trabalho trata-se principalmente da reutilização do material após o processo de usinagem, o que não é frequente na área, automatizando a extração do perfil de material bruto considerado sucata ou sobra. Além disso, em muitos casos reais, como no *software* Alphacam® utilizado na etapa de testes, o banco de dados onde os perfis de sucata são armazenados aceitam apenas materiais retangulares e não perfis com diferentes formatos geométricos. Portanto, buscando uma interface que melhor represente ao usuário os resultados obtidos após o processo

de *nesting*, a pesquisa busca obter resultados reais de material bruto que restariam em uma chapa – independentemente do tipo do material - após esse ser submetido ao processo de *nesting*.

*Nesting* pode ser definido como o processo que busca agrupar o maior número ou o número desejado de peças dentro de uma chapa plana de material bruto. Esta é uma etapa importante no processo de manufatura, uma vez que o sistema é responsável por otimizar matematicamente diversas distribuições possíveis das peças selecionadas, inserindo-as da forma mais eficiente dentro dessa chapa a fim de escolher a distribuição que melhor represente os valores pré selecionados pelo usuário. O sistema de *nesting* pode reduzir o tempo de configuração de máquina, reposição de chapas e reduzir os custos com materiais. O operador realiza apenas uma configuração ao invés de duas ou mais (Herrmann, 2001). O sistema utiliza como base os contornos de peças, de forma que seja possível através desses contornos delimitar os limites máximos da peça e também a melhor forma de alocá-las na chapa para a redução de perdas de material. Após a parametrização do mesmo, o processo de *nesting* é iniciado e assim que finalizado o cálculo de alocação das peças o resultado é apresentado ao usuário, a figura 1 ilustra a aplicação de um sistema de *nesting*.

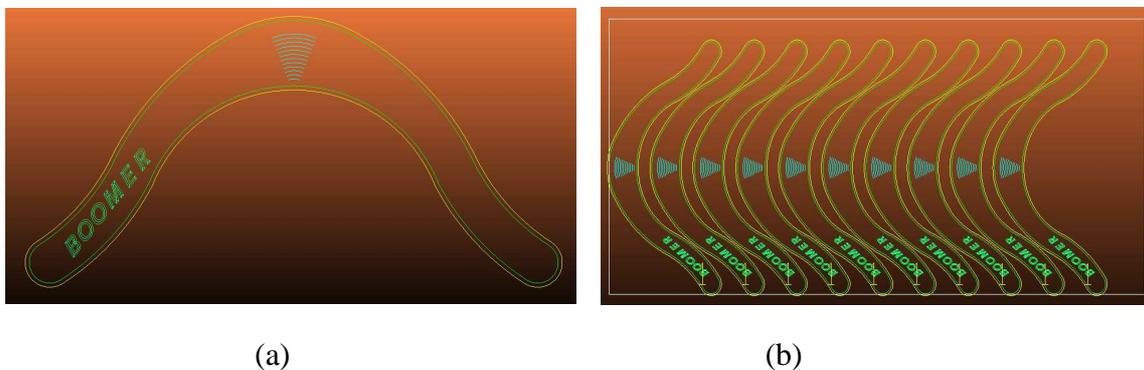


Figura 1. Peça submetida ao processo de *nesting* (a) e seu respectivo resultado (b).

Neste estudo, serão ignoradas as sobras internas de materiais devido à complexidade de seu cálculo. Além disso, a terceira dimensão (plano Z) nos desenhos criados através de *softwares* de desenho assistido por computador (CAD) será ignorada tendo em mente que o sistema de *nesting* se trata basicamente de uma alocação de peças criadas a partir de duas dimensões (2D) nos planos X e Y.

### 3. Sistema proposto

O sistema de reutilização de sobras de chapas tem como objetivo identificar, de forma automática, os segmentos de chapas classificados como sucata e separá-los para uma possível reutilização criando um perfil 2D que represente a sucata. Dessa forma, boa parte da matéria prima é salva, facilitando o processo de reutilização.

Assim como na problemática de alocação de peças, a complexidade computacional envolvida na busca pela porção de sucata no material também pode ser determinada como um problema NP-difícil (Garey, 1979), uma vez que a complexidade computacional envolvida na análise das infinitas possibilidades de peças alocadas é alta. Usualmente, *softwares* recebem um algoritmo de baixa complexidade e retornam resultados que extraem apenas restos de material em formato retangular, sendo boa parcela dos resultados apresentados errôneos, visto que os algoritmos consistem apenas em encontrar o maior ponto onde não há caminhos de ferramenta no eixo X e criar um retângulo até o ponto superior direito da chapa. A Figura 2 apresenta resultados obtidos, consecutivamente, por um algoritmo de baixa complexidade (a) e outro de alta complexidade (b). Pode-se notar claramente que o resultado de baixa complexidade, ignora completamente a área superior aos caminhos de ferramenta – canto superior esquerdo. O resultado esperado deveria considerar toda a área por onde o inserto ou *laser* não extraiu material,

ou seja, a área onde o material continua intacto e habilitado para ser reutilizado. Os resultados esperados devem levar em consideração o perfil 2D de todas as peças e não apenas o perfil da peça mais próxima à borda direita, apresentando a área resultante sem ignorar porções relevantes do material.

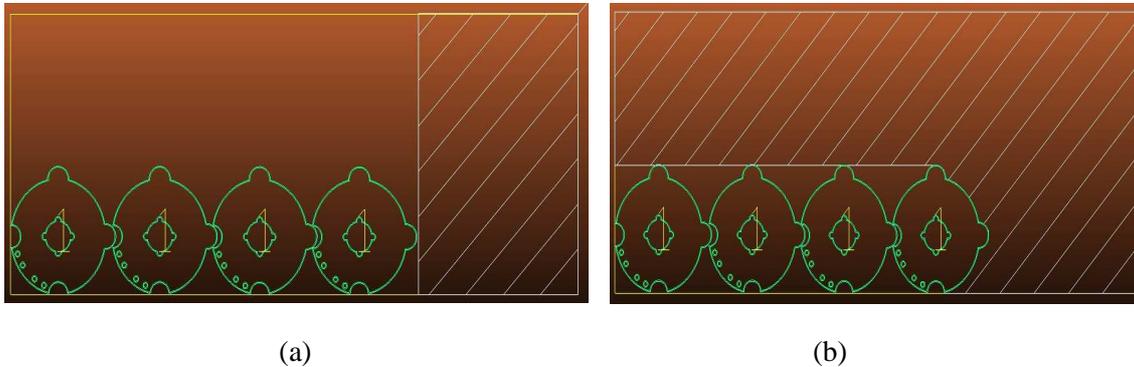


Figura 2 - Resultados obtidos com algoritmos de baixa e alta complexidades

Para a obtenção dos perfis de sucata esperados foram desenvolvidos dois métodos de cálculo: Retangular e de Varredura. O primeiro, Método Retangular, consiste em criar um retângulo na parte externa de cada caminho de ferramenta. Esses retângulos representam os pontos máximos e mínimos de X e Y no plano cartesiano por onde essa ferramenta passou. Assim, esses pontos serão adotados como pontos aproximados a área de usinagem. O segundo, Método de Varredura, consiste em criar 2 coleções de pontos e com base em uma tolerância selecionada pelo usuário, realizar um busca ponto a ponto dentro da chapa previamente otimizada pelo sistema de *nesting*.

### 3.1 Método Retangular

O Algoritmo consiste em encontrar os pontos máximos e mínimos ao longo dos eixos X e Y por onde a ferramenta irá remover material com base nos caminhos de ferramenta aplicados a uma chapa. Para tanto, o aplicativo faz uma análise de todos os elementos a fim de armazenar os valores máximos e mínimos no sistema de coordenadas X e Y no plano cartesiano por onde a chapa foi cortada. Contudo, os pontos de máximo e mínimo desses caminhos de ferramenta não necessariamente representam o local exato onde o material foi extraído e sim, um ponto aproximado, visto que os pontos de máximo e mínimo apenas criam virtualmente um retângulo que engloba o caminho de ferramenta externamente. Os pontos de máximo e mínimo extraídos das peças contidas nessa chapa são representados por circunferências brancas na Figura 3.

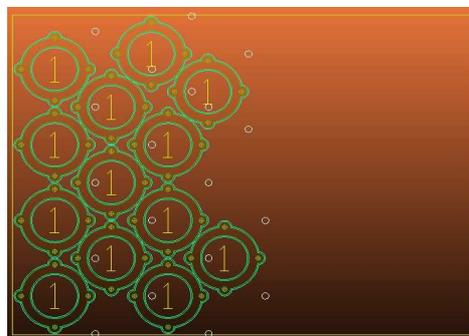


Figura 3 - Pontos de máximo e mínimo de cada geometria

Todavia, após a extração dos pontos em questão, os mesmos precisam passar por um processamento de filtragem, eliminando pontos considerados como indesejáveis. Pontos serão

determinados como indesejáveis para o processo caso os mesmos sejam pertencentes a uma peça que possui outra peça localizada entre ela e o limite entre peças e sucata. Após esta etapa, restarão apenas os pontos localizados entre a peça e a porção de material considerada sucata. Para isso, foi criado um algoritmo que lê todos os pontos criados nas peças e elimina os mesmos caso não sejam relevantes (pontos que não pertencem a fronteira entre peças e sucata) para o processo de extração do perfil de sucata. No processo, são analisados dois parâmetros, sendo que, caso ambos sejam verdadeiros o ponto é eliminado do conjunto. O primeiro parâmetro a ser verificado é a existência de outra peça alocada entre o ponto e extremidade da chapa onde a sucata está localizada. Caso esse parâmetro seja falso é suficiente para concluir que o ponto pertence à fronteira entre a porção de material que será desperdiçado e as peças alocadas na chapa. No entanto, caso essa afirmação seja verdadeira, e haja uma peça alocada entre a extremidade da chapa e o ponto, uma segunda verificação será realizada a fim de verificar se o ponto se encontra entre o valor máximo e mínimo de Y da peça em análise. Caso o ponto esteja alocado acima ou abaixo dos valores citados acima, o mesmo é considerado válido e é utilizado na criação do perfil da sucata. Em posse dos vetores contendo as coordenadas dos pontos filtrados é possível iniciar a rotina responsável por criar o perfil da sucata. Considerando que no algoritmo o perfil é criado a partir do ponto que possui menor valor em Y (parte inferior da chapa), é necessário ainda ordenar os vetores de forma que os índices apresentem-se em ordem crescente em relação aos valores de Y. Contudo, mesmo após ordenar os valores em ordem crescente para iniciar o desenho do perfil da sucata, é necessário verificar se o ponto inicial está alocado fora das extremidades da chapa, caso esteja, o algoritmo mantém o valor ponto inicial no eixo X e projeta o ponto inicial em Y para coincidir com a parte inferior da chapa. Após definido o ponto inicial, o mesmo é interligado aos demais pontos criando como resultante o perfil aproximado que define as fronteiras entre as peças e a sucata. Com a obtenção desse perfil, o último passo é interliga-lo à extremidade superior do material que, por conseguinte deve ser interligada às arestas inferior e superior da chapa e por último, ao ponto inicial seguindo o perfil da chapa bruta. Resultando, por exemplo, no perfil apresentado em branco na Figura 4.

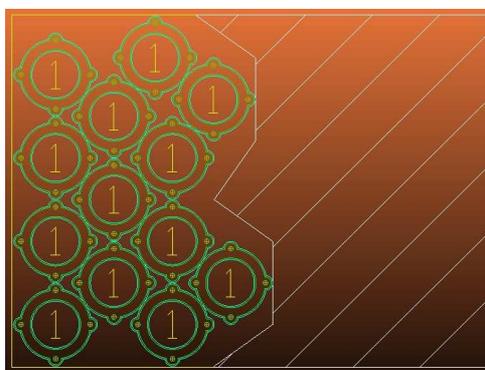


Figura 4 - Perfil final obtido utilizando o método retangular

É importante ressaltar que no sistema retangular, embora os resultados apresentados não sejam fielmente o perfil de sucata real, o processamento é realizado de forma rápida, dando ao usuário uma resposta imediata.

Os caminhos de ferramenta contidos nas chapas são criados a partir de diversos elementos, sendo tais elementos arcos e linhas. A análise realizada pelo método retangular diferencia arcos de linhas para extrair o ponto com maior valor em Y e X. A análise em linhas basicamente consiste em analisar todos os elementos, partindo do primeiro elemento do caminho de ferramenta e comparar os pontos inicial e final de cada elemento ao maior valor já obtido, armazenando assim sempre o maior valor. Dessa forma, após a análise ser finalizada, a combinação das coordenadas de maior valor em X e Y no plano cartesiano é utilizada para obter os pontos máximos. O processo para obter os menores valores é o mesmo, todavia durante o

processo onde os elementos são comparados, o menor valor é armazenado ao contrário do processo descrito acima. As quatro arestas do retângulo que engloba virtualmente o caminho de ferramenta podem ser obtidas utilizando as combinações de coordenadas.

Quando a análise é realizada em arcos, cálculos trigonométricos e vetoriais devem ser realizados para que seja possível fracionar o arco em diversas porções e analisar seus pontos individualmente, tornando assim a análise desses elementos mais complexa e exigindo maior tempo de processamento de dados. O algoritmo consiste em alocar o arco a ser analisado em um círculo trigonométrico de raio e centro iguais aos do arco em questão e dessa forma criar dois vetores, sendo que o primeiro vetor tenha como origem o centro do círculo trigonométrico e seu ponto final seja o ângulo inicial do círculo trigonométrico (zero grau). O segundo vetor assim como o primeiro possui sua origem no centro do círculo trigonométrico, porém seu ponto final é análogo ao ponto inicial do arco.

Após a criação desses vetores é possível calcular o ângulo interno entre ambos através do produto escalar dos mesmos. O ângulo obtido representa não só o ângulo inicial do arco a ser analisado em relação ao ângulo zero do círculo trigonométrico, mas também o ponto inicial onde o arco deve começar a ser fracionado pelo algoritmo. O ângulo é obtido utilizando a equação contida na Figura 5, considerando que U e V são vetores não nulos em  $R^2$  ou  $R^3$  e  $\theta$  é o ângulo entre estes vetores. (Anton, 2008).

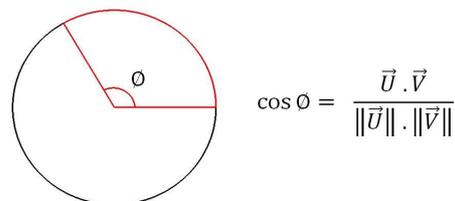


Figura 5 - Obtenção do ângulo entre dois vetores

Através do ângulo encontrado, inicia-se o processo de fracionamento do arco tendo como incremento o valor selecionado pelo usuário no início do processo. Após o final de cada incremento, os pontos final e inicial dessa seção de arco são calculados utilizando as identidades triangulares em conjunto com aplicações de trigonometria. Uma vez que esses pontos sejam obtidos é possível analisar os pontos inicial e final da seção do arco, e assim, de forma similar ao processo aplicado na análise de linhas, comparar esses valores aos demais pontos inicial e final de todas as seções de arco, tendo como produto final o maior ou menor ponto em X e Y de acordo com a comparação aplicada no algoritmo.

### 3.2 Método de Varredura

Diferentemente do método retangular, no método de varredura o algoritmo não busca apenas pelos pontos de máximo e mínimo, mas todos os pontos exatos por onde o caminho de ferramenta percorreu. Para realizar essa análise, é necessário segmentar todos os caminhos de ferramenta com base em uma tolerância pré-selecionada pelo usuário no início do processo. Esse método é afetado diretamente pela tolerância e de acordo com esses valores são criados milhares ou até mesmo milhões de segmentos de caminho de ferramenta, que por sua vez, exigem um grande nível de processamento e que por ventura podem criar problemas relacionados à sobrecarga de variáveis de programação (*Overflow*). A fim de evitar essa espécie de problemas, o algoritmo de varredura é iniciado coletando todos os caminhos de ferramenta contidos na chapa e analisando seus pontos máximos e mínimos.

Depois de finalizado o processo descrito acima, todas as peças são analisadas novamente para verificar se atendem a dois parâmetros. Caso ambos os parâmetros sejam verdadeiros, o caminho de ferramenta será eliminado não afetando o processo. O primeiro parâmetro consiste em analisar se há outro caminho de ferramenta alocado entre a peça em análise e a extremidade da chapa ao longo do eixo X. Caso esse parâmetro seja verdadeiro, o

caminho de ferramenta possui uma grande possibilidade de não afetar o processamento já que pode estar alocada entre outras peças e não entre a porção de material entre peças e sucata.

Com base na peça que teve o primeiro parâmetro verdadeiro, o segundo parâmetro consiste em analisar se:

- O ponto **mínimo** no eixo Y do caminho de ferramenta em análise é **superior ou igual ao ponto mínimo** no eixo Y da peça que passou pelo primeiro parâmetro.
- O ponto **mínimo** no eixo Y do caminho de ferramenta em análise é **inferior ou igual ao ponto mínimo** no eixo Y da peça que passou pelo primeiro parâmetro.
- O ponto **máximo** no eixo Y do caminho de ferramenta em análise é **superior ou igual ao ponto mínimo** no eixo Y da peça que passou pelo primeiro parâmetro.
- O ponto **máximo** no eixo Y do caminho de ferramenta em análise é **inferior ou igual ao ponto de máximo** no eixo Y da peça que passou pelo primeiro parâmetro.

Caso todos os parâmetros acima sejam atendidos, a peça sendo analisada será eliminada da coleção, uma vez que o caminho de ferramenta está localizado em uma posição que não influenciará no cálculo, evitando assim processamento desnecessário. Depois de eliminados os caminhos de ferramenta desnecessários, os elementos contidos nos caminhos de ferramentas devem ser seccionados com base na tolerância pré-selecionada pelo usuário. Diferente do método retangular, onde apenas arcos precisam ser rigorosamente analisados e linhas possuem uma análise superficial já que apenas são coletados os valores máximos e mínimos dos caminhos de ferramenta, no método de varredura arcos e linhas devem ser seccionados e analisados ponto a ponto.

Com base na equação da reta obtida, primeiramente é analisado o tipo de reta e então a reta é classificada como reta horizontal, vertical e reta inclinada. Determinar o tipo da reta é necessário, uma vez que o algoritmo utilizado para o seccionamento da reta percorre a linha do seu ponto inicial até o seu ponto final e o tipo de incremento utilizado para percorrer a reta é distinto para os três tipos de reta. O tipo de reta é determinado através do seu coeficiente angular e de seu termo independente. Retas do tipo horizontais são incrementadas e seccionadas ao longo do eixo X já que seu valor de Y é constante. Por outro lado, retas do tipo vertical tem apenas o valor de Y incrementado e seccionado uma vez que o valor X é constante. Retas do tipo inclinado tem o valor incrementado ao longo de X, todavia seu valor de Y será alterado de acordo com a equação da reta. A análise realizada em elementos do tipo arco é similar à esplanada no método retangular.

Após todos os pontos serem seccionados e as informações de todos os pontos serem armazenadas, a varredura é iniciada. A varredura se inicia na parte inferior da chapa e é realizada de forma que a busca se prolongue até a parte superior da chapa. Para cada vez que a busca é incrementada em direção à extremidade superior da chapa e o valor de Y é incrementado com a tolerância selecionada pelo usuário, uma busca longitudinal ao longo do eixo X é realizada. Essa busca tem início no ponto no eixo X correspondente à extremidade da peça mais próxima onde a sucata está localizada (já que não é necessário analisar a área já conhecida como sucata, assim evitando um grande número desnecessário de interações e por conseguinte diminuindo os índices de *overflow*). Iniciando a análise nesse ponto, cada ciclo é incrementado de forma que o ponto a ser analisado seja projetado em direção das peças aplicadas a chapa.

Prosseguindo, depois de cada incremento ao longo do eixo X é verificado se o ponto atual coincide com algum dos segmentos de caminho de ferramenta criados previamente. Caso o ponto em análise possua o valor de Y entre o valor inicial e final do segmento do caminho de ferramenta, então uma segunda verificação é realizada. A segunda verificação irá certificar-se de que o ponto em análise não apenas coincide ao longo do eixo Y com o segmento de caminho de ferramenta, mas também coincide com a posição em X. Para ser considerado o ponto desejado, o valor do ponto no eixo X deve ser superior ou igual ao ponto inicial do segmento - subtraindo o valor da tolerância pré-estabelecida pelo usuário e também o ponto deve ser inferior ou igual ao

ponto final do segmento somado ao valor da tolerância pré-estabelecida pelo usuário. O valor de tolerância selecionado pelo usuário influencia diretamente o resultado obtido, além disso, evita que o ponto próximo ao caminho de ferramenta não seja encontrado. Em casos onde nenhum segmento de caminho de ferramenta se encaixa nos parâmetros acima, é determinado que não existem peças ao longo do trecho de X e portanto o ponto para criação da sucata é a extremidade da chapa. As circunferências brancas na Figura 6 (a) representam cada ponto que já foi processado e a Figura 6 (b) o resultado obtido através desse método.

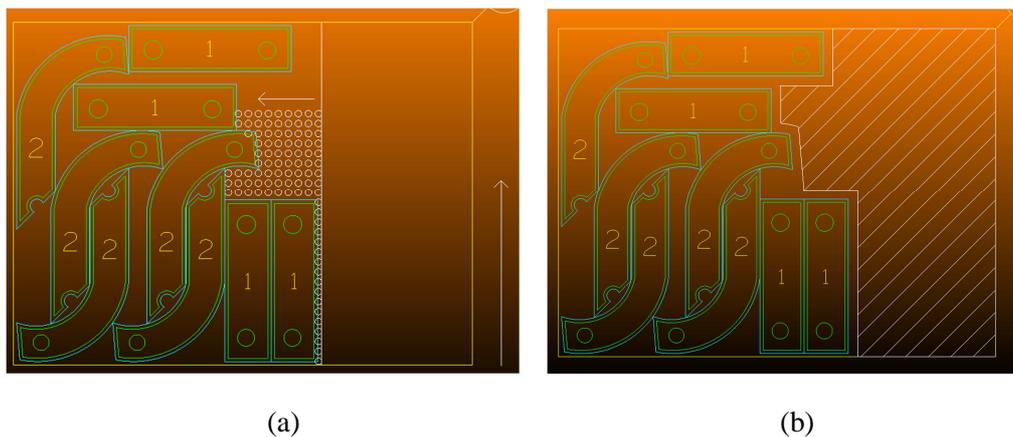


Figura 6 – Representação gráfica da busca e resultado obtido pelo método de varredura

Uma vez que seja encontrado o ponto que coincide com os demais, os pontos inicial e final do segmento do caminho de ferramenta são armazenados para serem posteriormente utilizados na criação do perfil que representa a sucata. Depois de concluída a análise de todos os pontos, os mesmos são interligados aos demais pontos e as extremidades da chapa, dessa forma criando o perfil de sucata que pode ser reutilizado para um processo futuro.

#### 4. Testes e resultados

Para analisar ambos os métodos foram utilizados um número total de 150 chapas de *nesting* com tipos distintos de caminho de ferramenta. Como ferramenta de teste, ambos os algoritmos foram aplicados ao *software* de manufatura assistida por computador Alphacam®.

Os resultados obtidos foram classificados de acordo com a qualidade do perfil de sucata obtido. Os níveis de qualidade foram classificados como: Excelente; Bom; Regular e Insatisfatório; descritos a seguir.

- Excelente: Perfil de sucata é extraído completamente, incluindo pequenas áreas.
- Bom: Perfil de sucata é extraído completamente, todavia pequenas porções de material são ignoradas.
- Regular: Perfil de sucata é extraído parcialmente, perdendo parte relevante do material.
- Insatisfatório: Perfil é extraído de forma mecanicamente impossível ou erro é causado durante a execução do algoritmo.

A fim de testar a eficiência do método retangular, o mesmo foi aplicado as 150 chapas criadas para teste. Após todas as chapas serem submetidas ao método, os resultados foram classificados em níveis de desempenho. Os resultados obtidos através dos testes podem ser observados na Tabela 1. Assim como esperado, peças que possuem formas livres fazem com que o resultado do método retangular ignore uma porção relevante de material, por outro lado o método se mostrou muito eficaz e com tempo de resposta excelente para peças simétricas ou de natureza retangular assim como portas, janelas e degraus de escada. Além disso, assim como

demonstrado pela Figura 7, o método se mostrou eficaz quando a chapa possui uma grande quantidade de caminhos de ferramenta pequenos em relação à chapa.

Tabela 1 – Avaliação dos resultados obtidos através do método retangular

Excelente	85.71%
Bom	9.52%
Regular	2.86%
Insatisfatório	1.90%

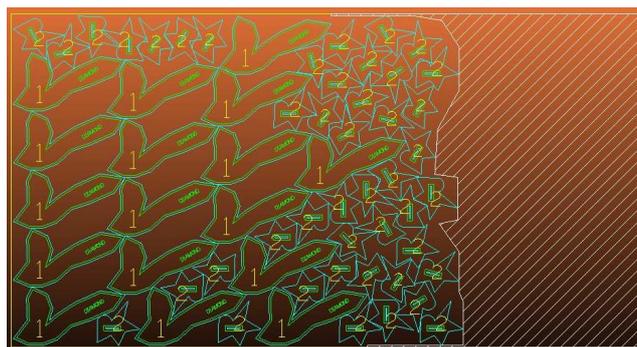


Figura 7 - Método retangular aplicado a chapa com peças pequenas

Finalizada a rotina de testes utilizando as mesmas chapas aplicadas ao método retangular, os resultados obtidos com o Método de Varredura foram classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Avaliação dos resultados obtidos através do método de varredura

Excelente	85.45%
Bom	7.29%
Regular	1.81%
Insatisfatório	5.45%

O nível de resultados insatisfatórios está diretamente ligado ao alto nível de processamento exigido por esse método, já que muitas vezes erros ligados ao sistema operacional do usuário causam problemas de memória que são dificilmente tratados utilizando, nesse caso, *Visual Basic for Application*. Embora ainda seja necessário reduzir ao máximo o nível de erros, os mesmos foram tratados de forma que uma mensagem de erro é mostrada ao usuário solicitando que entre em contato com o suporte técnico. Esse tipo de erro pode ser facilmente corrigido restringindo que o usuário insira valores de tolerância muito pequenos em relação ao tamanho da chapa. Além disso, durante os testes foi observado que o tempo de processamento é elevado de forma significativa quando o caminho de ferramenta contém um número elevado de elementos do tipo arco. Todavia, elementos do tipo linha possuem um resultado preciso e são processados com mais velocidade. O método se mostrou extremamente eficaz para peças que possuem formas livres, criando um perfil de sucata real ou muito próximo quando comparado à chapa que será usinada. Além disso, foi constatado que o método possui grande eficácia para chapas que possuem peças grandes ou uma pequena quantidade de peças.

Durante a rotina de testes aplicados ao algoritmo de remoção de caminhos de ferramenta desnecessários, o principal elemento a ser analisado foi o número de peças que foram eliminados para evitar processamento desnecessário. Aplicando o algoritmo a 21 chapas com características distintas foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do algoritmo de remoção de peças

Redução de peças feita pelo algoritmo								
Antes	Depois	% removido	Antes	Depois	% removido	Antes	Depois	% removido
15	9	40.00%	120	55	54.16%	33	24	27.27%
15	11	26.66%	52	10	80.76%	14	12	14.28%
52	48	7.69%	5	5	0.00%	6	5	16.66%
44	30	31.81%	7	5	28.57%	3	3	0.00%
30	6	80.00%	10	3	70.00%	44	33	25.00%
151	61	59.60%	14	13	7.14%	7	3	57.14%
56	20	64.28%	37	7	81.08%	20	6	70.00%

Os resultados variaram de 0% de peças removidas até 81.08% de peças removidas obtendo uma média de 40,10% de peças removidas do processo. Além disso, pode-se observar que quanto maior o número de peças distintas na chapa, menor é o número de peças removidas, uma vez que as peças diferentes tendem a não ser alocadas na chapa pelo processo de *nesting* de uma forma regular. Portanto, processos de *nesting* realizados utilizando apenas um modelo de peça, assim como o apresentado na Figura 8, devem ser os mais afetados pelo algoritmo de redução de caminhos de ferramenta desnecessários.

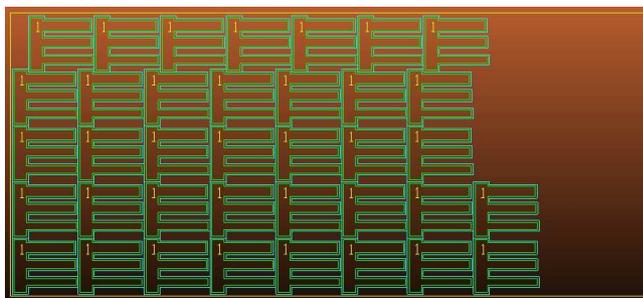


Figura 8 - Chapa que obteve maior índice de remoção de caminhos de ferramenta

Ao longo da análise, foi possível concluir que os algoritmos irão atender necessidades diferentes uma vez que o método Retangular se mostrou eficaz quando aplicado a peças de natureza retangular. Por outro lado, o método de varredura apresentou eficácia quando aplicado a peças com formato livre. Outro contraste importante quando os dois métodos são comparados é que o método Retangular é capaz de analisar uma grande quantidade de caminhos de ferramenta em milissegundos, por outro lado o método de varredura pode levar cerca de minutos para apresentar o resultado quando aplicado a esse tipo de chapa. Portanto, o método mais indicado a ser utilizado para chapas com grande quantidade de peças é o método Retangular. Contudo, embora o método retangular seja mais estável e proporcione ao usuário um resultado mais rápido, o método de varredura continua sendo o mais indicado já que sempre apresenta o resultado condizente com a chapa real. Uma amostra comparativa entre ambos é apresentada na figura 9.

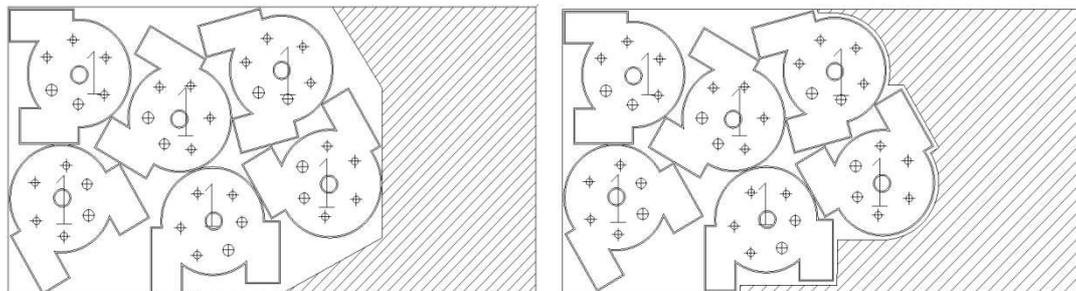


Figura 9 - Consecutivamente, resultados obtidos no método retangular e de varredura

Embora a obtenção dos resultados seja a parte mais complexa deste trabalho, a reutilização das geometrias obtidas utilizando os algoritmos descritos de maior relevância, no aspecto prático, é de maior importância. Independentemente do método utilizado para a obtenção do perfil de sucata, ao final do método, é criado um arquivo de desenho do *software* compatível com o módulo que o usuário possui e esse arquivo é automaticamente armazenado na pasta padrão de informações do *software*. Em conjunto ao arquivo de desenho, também é armazenado uma imagem no formato .jpeg que será utilizada para a representação gráfica do perfil. Além disso, todas as informações mecânicas dessa chapa tais como: espessura, material, comprimento, largura entre outras são armazenadas em um banco de dados. Para reutilizar a chapa, o usuário deve utilizar o visualizador de chapas, ferramenta criada especificamente para essa finalidade.

Utilizando a plataforma de desenvolvimento .NET, a ferramenta de visualização de chapas foi desenvolvida não apenas com o propósito de apresentar visualmente as possibilidades de chapas que o programador CAM possui para serem utilizadas no processo de usinagem, mas também com o propósito de ser a ferramenta onde o usuário pode gerenciar e administrar o seu estoque de chapas. A ferramenta de visualização do banco de dados oferece não só a possibilidade de reutilizar as chapas obtidas através da sucata, mas também a possibilidade adicionar e modificar chapas novas, retangulares, nunca antes utilizadas. Na tela principal, os tipos de chapas são separados de acordo com a sua origem em duas categorias “Novas chapas” e “chapas extraídas de sucata”. Assim que o usuário optar por expandir o nó de visualização selecionando o tipo de chapa que gostaria de utilizar, uma nova lista será apresentada. Essa lista é ordenada de forma que o mesmo material não seja demonstrado duas vezes, já que por questões logísticas o usuário normalmente procura primeiro pelo tipo de material estipulado previamente no projeto a ser realizado no *software* CAM e então procura quais as chapas que melhor se adaptam ao processo. Como representado pela Figura 10, assim que selecionado o material desejado, a listagem completa de chapas disponíveis é apresentada em conjunto com todas as suas características. A imagem de amostra do perfil também é apresentada, ao lado direito, no momento em que o usuário seleciona a chapa.

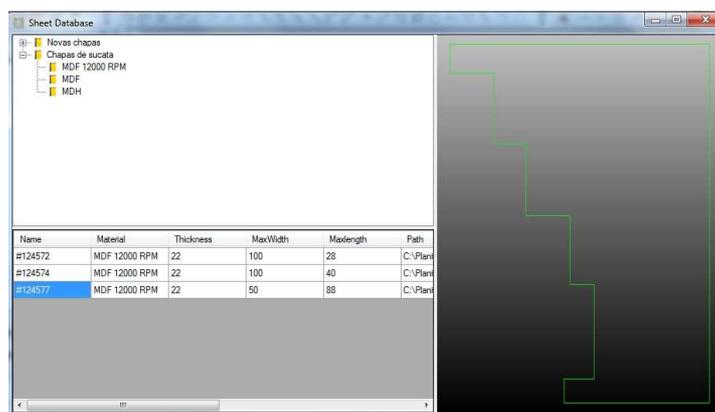


Figura 10 - Interface da ferramenta de reutilização de chapas

## 5. Considerações Finais

Com este trabalho percebeu-se que embora para chegar ao objetivo de extrair os mais distintos contornos de sucata seja necessário realizar a complexa tarefa de analisar as infinitas possibilidades de combinações de geometrias e peças que podem ser criadas pela mente humana, os resultados alcançados foram satisfatórios e economizam importante quantidade de matéria prima e tempo de processo. Além de tornar possível a gestão sobre as chapas de sucata em estoque, cabe lembrar que buscar a redução dos custos do processo de manufatura é um objetivo de todo administrador. No caso deste trabalho houve um avanço importante no sentido de agregar valor aos sistemas computacionais habitualmente utilizados para a gestão de chapas na indústria.

Melhorias futuras devem ser implementadas, tornando mais amigável e eficaz a experiência de utilizar a ferramenta. Além disso, o código deve ser aprimorado a fim de reduzir os erros causados pelo alto processamento do método de varredura, o mesmo deve ser transcrito para a plataforma “C# .NET”, abandonando assim a plataforma *Visual Basic for Application*.

### Referências

- Anton, H., Busby, R.** Álgebra Linear Contemporânea. Porto Alegre: Bookman, 2006. Cap. 1.
- Brinson, J.** Contabilidade por atividades: uma abordagem de custeio baseado em atividades. São Paulo: Atlas, 1996.
- Chryssolouris, G., Papakostas, Mourtzis, D.,** A decision-making approach for nesting scheduling: A textile case, *International Journal of Production Research*, 38:17, 4555-4564, 2000.
- Garey, M.R., Johnson, D.,** Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, Freeman, San Francisco, CA, 1979.
- Herrmann, J.W., Delalio, D.R.,** Algorithms for sheet metal nesting, *IEEE transactions on robotics and automation*, 2001.
- Hopper, E., Turton, B.,** An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem, *European Journal of Operational Research* 128, 2001.
- Jayavel, S., Dileep, G. D.,** Scrap minimization in production processes with stochastic outputs, *International Journal of Production Economics* 29, 1993.
- Lee, Y., Wei, C., Chen C., Tsaia C.,** Minimization of scrap and rework costs by process tolerances allocation, *Engineering Optimization*, DOI:10.1080/03052150008941315 (2000)
- Rajasekhar A., Ramesh, N.,** A semi-discrete geometric representation for nesting problems, *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2012.751508 (2013)
- Tang J., Liua Y., Fung R. Y.K., Luo X.,** Industrial waste recycling strategies optimization problem: mixed integer programming model and heuristics, *Engineering Optimization*, DOI:10.1080/03052150802294573 (2008)
- Wascher, G., H. Hauber, and H. Schumann.** “An improved typology of cutting and packing problems.” *European Journal of Operational Research* 183: 1109–1130, 2007.
- Xie, S. Q. , G. G. Wang, Y. Liu,** Nesting of two-dimensional irregular parts: an integrated approach, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20:8, 741-756, 2007.