

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

SAMUEL SIRTOLI

**PROJETO DE MATRIZES DE CORTE POR CISALHAMENTO TRANSVERSAL
APLICADO AO CORTE DE PERFIS DE AÇO**

CAXIAS DO SUL

2013

SAMUEL SIRTOLI

**PROJETO DE MATRIZES DE CORTE POR CISALHAMENTO TRANSVERSAL
APLICADO AO CORTE DE PERFIS DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Viecelli

CAXIAS DO SUL

2013

SAMUEL SIRTOLI

**PROJETO DE MATRIZES DE CORTE POR CISALHAMENTO TRANSVERSAL
APLICADO AO CORTE DE PERFIS DE AÇO**

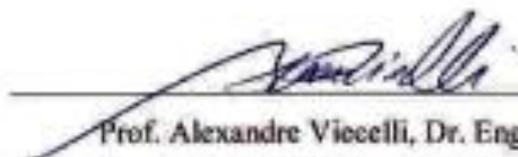
Trabalho de Conclusão de Curso de
Engenharia Mecânica na Universidade de
Caxias do Sul

Aprovado em 18 de junho de 2013.

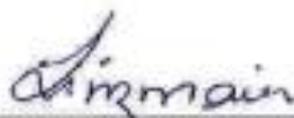
Banca Examinadora:



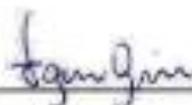
Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng. Produção
Coordenador de Estágio II em Engenharia Mecânica



Prof. Alexandre Viecelli, Dr. Eng. Civil
Supervisor de Estágio / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Paulo Roberto Linzmaier, MSc. Eng. Mecânico.
Professor Convidado



Prof. Vagner Grison, MSc. Eng. Mecânico.
Professor Convidado

RESUMO

O processo de perfilação possibilita a fabricação de perfis com seções transversais especiais. Por se tratar de um processo altamente produtivo, é muito utilizado para a fabricação de perfis utilizados em diversos segmentos, como a construção civil e de armazenagem. Em linhas de perfilação contínua onde o corte do perfil é realizado após a obtenção da seção transversal, o processo de corte por cisalhamento é a primeira escolha devido à simplicidade do seu mecanismo e por não gerar perdas de matéria-prima. Durante o projeto das matrizes de corte, o projetista pode se deparar com problemas estruturais em determinados pontos da matriz, devido a seções transversais que geram regiões concentradoras de tensão de tração. Baseado nessa situação, este trabalho de desenvolvimento visou prover critérios para o projeto das matrizes de corte, bem como resolver um caso crítico de corte em um perfil com seção transversal do tipo sigma [Σ], usando para isso, a análise não linear pelo método de elementos finitos com auxílio do *software* CAE Abaqus. A partir dos requisitos do projeto e da definição dos parâmetros fixos do pré-processamento, fez-se progressivamente análises em ângulos de corte previamente selecionados, tendo como critério a teoria da tensão normal máxima. Com a análise dos resultados de tensão, observou-se que a alteração do ângulo de corte original pode resultar em uma matriz com menor concentração de tensão de tração nas regiões críticas. Este procedimento permitiu a definição de um ângulo adequado para o corte do perfil. Por sua vez, a análise dos resultados finais apresentou maiores tensões compressivas nas arestas de corte, as quais tendem ao desgaste prematuro da matriz. Um tratamento superficial adicional de nitretação a plasma sem camada branca foi proposto para melhorar a dureza superficial da aresta de corte da matriz e melhorar a resistência a compressão.

Palavras chave: Abaqus MEF. Perfilação contínua. Perfis especiais. Corte por cisalhamento transversal. Análise não linear.

Áreas de conhecimento: Engenharia mecânica. Conformação mecânica. Projeto de matrizes de corte. Método de elementos finitos.

ABSTRACT

The roll forming process enables the manufacture of profiles with special cross sections. Because it's a highly productive, this process is widely used in various sectors, such as construction and warehousing system. In cold roll forming, where cutting is performed after obtaining the cross section, the flying shear process is the first choice due to the mechanism simplicity, and not generate raw material losses. On cutting die design, the designer may be faced with structural problems at certain points of the die, because the cross sections profile can generate stress at some regions. Based on this situation, this work aimed to provide rules for the cutting dies design as well as solved a case to shear a critical cross-section sigma [Σ] profile, using it for the nonlinear analysis by finite element method with Abaqus CAE software. From the project requirements and the previous defined fixed parameters of the preprocessing, the jobs were progressively analyzed using different cutting angles previously selected, applying the criterion the maximum normal main stress theory. With the stress results analysis, it was observed that changing the original cutting angle can result in a tool with lower tensile stress concentration in the critical regions. This procedure allows the definition of a suitable angle for cutting the profile. By the way, the results showed higher compressive stress on the tool cutting edges, which tend premature tool damage. An additional surface treatment by plasma nitriding without the white layer was added, to improve the surface hardness of the tool cutting edge and improve the compressive strength.

Key words: Abaqus FEA. Roll forming. Special steel profiles. Shear cutting. Nonlinear finite element analyses.

Knowledge area: Mechanical Engineering. Forming. Shear die design. Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamento de perfilação	12
Figura 2 – O processo de perfilação	13
Figura 3 – Equipamentos de corte comerciais.....	14
Figura 4 – Seções com geometrias comerciais.....	15
Figura 5 – Seções com geometrias especiais.....	15
Figura 6 – Região crítica de projeto.....	16
Figura 7 – Sequência de conformação do processo de perfilação.....	19
Figura 8 – Equipamentos mínimos para perfilação contínua	19
Figura 9 – Carro de corte.....	20
Figura 10 – Fases do corte por cisalhamento	21
Figura 11 – Esboço do processo de corte por cisalhamento.....	22
Figura 12 – Corte por faca.....	23
Figura 13 – Sistema de Corte por faca.....	23
Figura 14 – Usinagem por serra circular.....	24
Figura 15 – Equipamento de corte por meio de usinagem por serra	25
Figura 16 – Borda de corte mostrando várias regiões.....	27
Figura 17 – Comparativo entre folgas de corte	29
Figura 18 – Redução da força de corte por meio da inclinação da aresta de corte.....	31
Figura 19 – Corte de chapas por guilhotina.	32
Figura 20 – Dureza adequada para ferramentas de corte fabricadas em aços AISI D2 e AISI D6 em função da espessura do material a ser cortado.	34
Figura 21 – Família de elementos comumente utilizados	37
Figura 22 – Tensores tridimensionais em um elemento	38
Figura 23 – Fluxograma da Simulação CAD/CAE	47
Figura 24 – Discretização do contato e interação entre superfícies.....	48
Figura 25 – Elemento linear C3D8R (a) e C3D4 (b).....	49
Figura 26 – Aplicação do perfil sigma.....	49
Figura 27 – Medidas e tolerâncias do perfil sigma.....	50
Figura 28 – curva tensão x deformação real para o aço Docol 350YP.....	50
Figura 29 – Prensa de corte	51
Figura 30 – Folga em matrizes de corte.....	52
Figura 31 – Ângulo de corte.....	53

Figura 32 – Ângulos presentes no perfil sigma	53
Figura 33 – Folga passagem mínima	54
Figura 34 – Espessura da matriz	55
Figura 35 – Fluxograma do projeto.	56
Figura 36 – Regiões de tensão crítica.	57
Figura 37 – Progressão das tensões nas regiões críticas da matriz de corte.....	58
Figura 38 – Estado de tensões da matriz móvel no ângulo de 21°	59
Figura 39 – Propagação da tensão na matriz móvel.	60
Figura 40 – tensões compressivas na matriz móvel no ângulo de 21°	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Referência orientativa para a seleção de aços para o corte de chapa metálica. 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os processos de corte.....	26
Tabela 2 - Folgas de corte de acordo com o material a ser cortado.....	30
Tabela 3 - Chapas utilizadas em processos de perfilação.	35
Tabela 4 – Comparativo entre o método implícito e explícito.	46
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do Aço AISI D2 com 60 HRC.....	55
Tabela 6 – Valores de tensão normal máxima para diferentes ângulos de corte.....	58

LISTA DE SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> - Instituto Americano de Ferro e Aço
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Auxiliado por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> - Engenharia Auxiliada por Computador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo Geral.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PERFIS DE AÇO.....	18
2.2 PROCESSO DE PERFILAÇÃO	18
2.3 PROCESSO DE CORTE DE PERFIS.....	20
2.3.1 Linha de corte por cisalhamento	21
2.3.2 Linha de corte por faca	22
2.3.3 Linha de corte por meio de usinagem por serra.....	24
2.4 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE CORTE.....	25
2.5 CISALHAMENTO DE PRODUTOS PLANOS.....	26
2.5.1 Fenômeno do corte por cisalhamento	26
2.5.2 Parâmetros do processo de corte	27
2.5.2.1 Força de corte.....	28
2.5.2.2 Folga de corte.....	29
2.5.2.3 Ângulo de corte.....	30
2.6 FERRAMENTAL PARA O CORTE DE PERFIS	32
2.6.1 Materiais aplicados em matrizes de corte	33
2.6.2 Critérios para o projeto de matrizes de corte.....	35
2.6.3 Características dos materiais do produto a ser cortado	35
2.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	36
2.7.1 O método de elementos finitos	36
2.7.2 Tensão e deformação tridimensional.....	38
2.7.3 Plasticidade.....	40
2.7.4 Critérios de falha.....	43
2.7.4.1 Teoria da energia de distorção	43
2.7.4.2 Teoria da tensão normal máxima	44
3 METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO.....	45

3.1 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	45
3.1.1 Contato entre superfícies	48
3.1.2 Tipo de elementos	48
3.2 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE AÇO	49
3.2.1 Dimensões do perfil sigma.....	49
3.2.2 Matéria-prima do perfil sigma.....	50
3.3 PRENSA DE CORTE	51
3.4 VARIÁVEIS DO PROJETO	52
3.4.1 Folga de corte	52
3.4.2 Ângulo de corte.....	53
3.4.3 Variação da folga de passagem entre o perfil e a matriz	54
3.4.4 Espessura da matriz	54
3.4.5 Propriedades mecânicas das matrizes	55
3.4.6 Plano de trabalho	55
4 RESULTADOS	57
5. CONCLUSÃO	62
GLOSSÁRIO	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

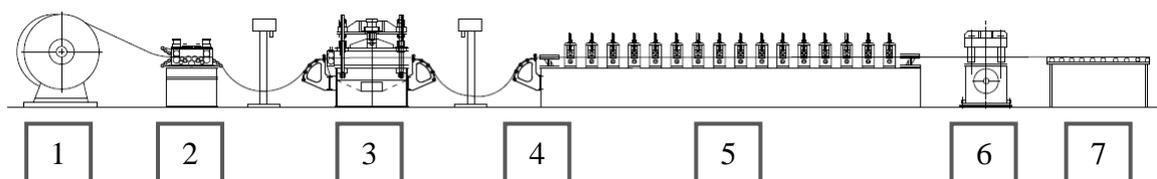
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Frutos do sistema capitalista, a concorrência e a competitividade global têm gerado motivos incessantes para a busca de novas tecnologias e conseqüentemente novos produtos. Componentes personalizados com nível de complexidade cada vez mais intenso vêm impondo as empresas o investimento contínuo em novos processos de fabricação, focando sempre no alto nível de qualidade dos seus produtos, exigindo cronogramas reduzidos, redução nos custos produtivos e também minimizar o custo de manutenção por motivo de falhas.

Diante desse cenário, faz-se essencial que as empresas do segmento mantenham-se competitivas no mercado. Na indústria de perfis de aço, o diferencial tecnológico associado com o desenvolvimento de geometrias especiais, os quais são projetados para atender aplicações específicas, torna o processo de fabricação do produto complexo. Esse desafio acaba por garantir a competitividade da empresa no seu segmento de atuação.

O processo de perfilação contínua conforme Wood *et al.* (1996), é ideal para a fabricação de grandes quantidades assim como para longos comprimentos. Esse processo também provê pequenas tolerâncias de fabricação ao produto e requer baixo nível de manipulação durante o processo. Em muitos casos, determinados produtos que possuem operações auxiliares como perfuração, estampos, marcações, recortes e soldas podem vir a se tornar um produto acabado direto do processo de perfilação, sem a necessidade de um processo posterior adicional. Em geral, um maquinário para o processo citado é composto de desbobinador de tiras (1), endireitador (2), prensa de perfuração (3), guia de entrada (4), perfiladeira (5), prensa de corte (6) e mesa de descarga (7), conforme mostrado na figura 1.

Figura 1 – Equipamento de perfilação

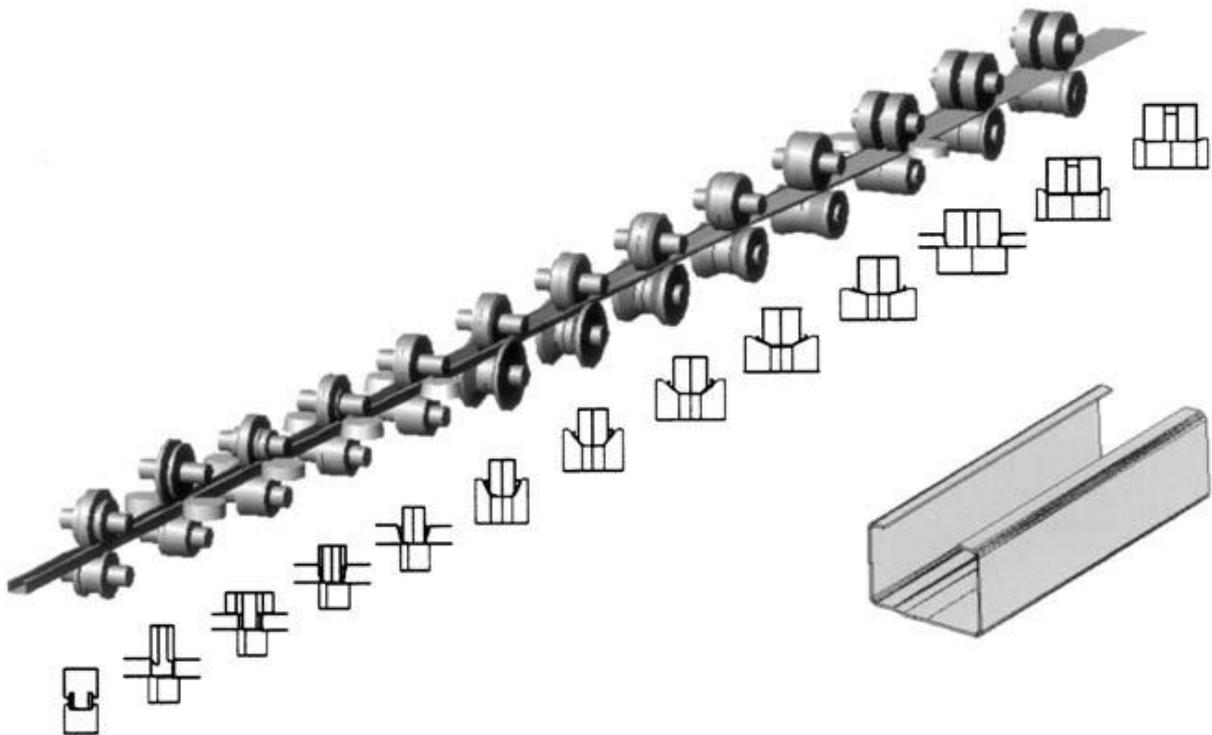


Fonte: Adaptado de Halmos, 2006.

De acordo com Halmos (2006), praticamente todos os metais que são formados por outros processos podem ser perfilados. Tipicamente, ligas de cobre, latão, estanho, zinco,

zircônio, titânio, níquel, alumínio, assim como as diversas ligas aços dentre os quais os aços inoxidáveis ou até mesmo os aços de alta resistência, são conformados neste processo. Para o presente trabalho será abordado como matéria-prima as ligas de aço, as quais passam por etapas distintas até tomar seu formato final. Neste caso, após ter passado por processos de laminação na usina e ser armazenado em forma de bobinas, o material é recortado em tiras com uma largura pré-determinada em função do perfil que se deseja obter. Uma vez em forma de tiras longas, dá-se o início ao processo de perfilação, aonde a mesma vai sendo gradativamente dobrada no seu sentido transversal à medida que vai avançando longitudinalmente através dos estágios de conformação, os quais são formados por ferramentas rotativas denominadas rolos, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2 – O processo de perfilação



Fonte: Halmos, 2006.

Após estar com a geometria transversal definida, o produto então é cortado no comprimento especificado. Esse processo de corte será o assunto em questão deste trabalho de conclusão.

Diferentes tipos de equipamentos são aplicados na execução do corte do produto em linhas de perfilamento. Conforme Dreistern (2012), há três tipos de processos de corte

aplicáveis, o corte por cisalhamento (1), corte por faca (2) e o corte por meio de usinagem por serra (3), os quais são apresentados na figura 3.

Figura 3 – Equipamentos de corte comerciais



Fonte: Adaptado de Dreistern, 2012.

Tradicionalmente, o equipamento de corte por cisalhamento é priorizado nas linhas de perfilação devido a simplicidade de construção de seu mecanismo. O processo de corte por cisalhamento é constituído de uma espécie de prensa hidráulica que possui dois portamatrizes, sendo um deles fixo e o outro móvel. Uma vez que as matrizes estejam instaladas e o perfil estiver passando entre elas, a prensa é acionada promovendo o deslocamento transversal das matrizes, cisalhando o perfil.

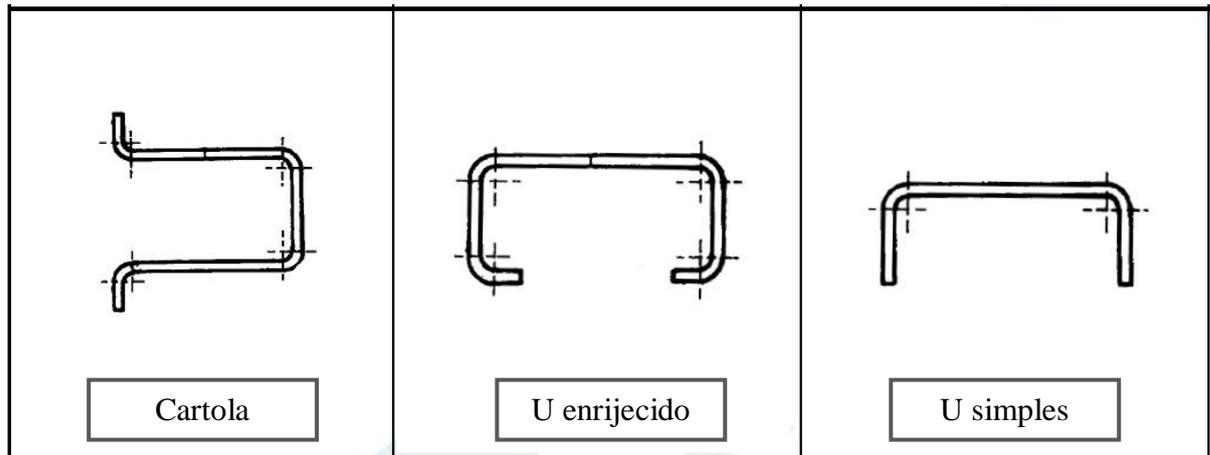
O presente trabalho se propõe a analisar as variáveis de projeto destas matrizes, visando obter um embasamento técnico suficiente para o projeto e execução das mesmas, de modo a prever possíveis falhas, evitando então prejuízos financeiros e atrasos no processo fabril, assim como prover maior confiabilidade no mesmo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Indústrias dos diversos segmentos, como o automotivo, agrícola, moveleiro, ou até mesmo da construção civil, desenvolvem constantemente novas tecnologias, equipamentos e consequentemente novos produtos, necessitando cada vez mais de soluções personalizadas.

Perfis de aço com seções transversais comerciais, como por exemplo, seções em formato U simples, U enrijecido ou cartola, são tradicionalmente comercializados conforme pode ser visualizado na figura 4.

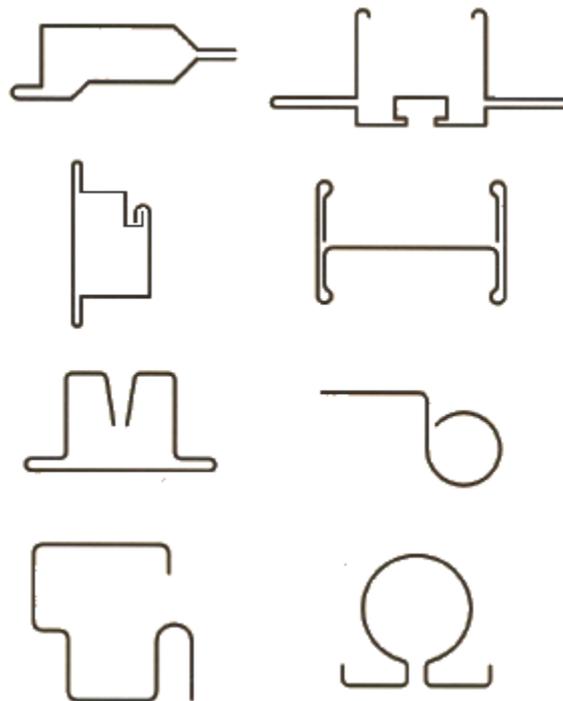
Figura 4 – Seções com geometrias comerciais



Fonte: Adaptado de ABNT/NBR 6355 (2003)

De acordo com a necessidade do cliente, geometrias especiais podem ser obtidas por meio do processo de perfilação. Alguns exemplos como as mostradas na figura 5, representam algumas seções com geometria especial.

Figura 5 – Seções com geometrias especiais



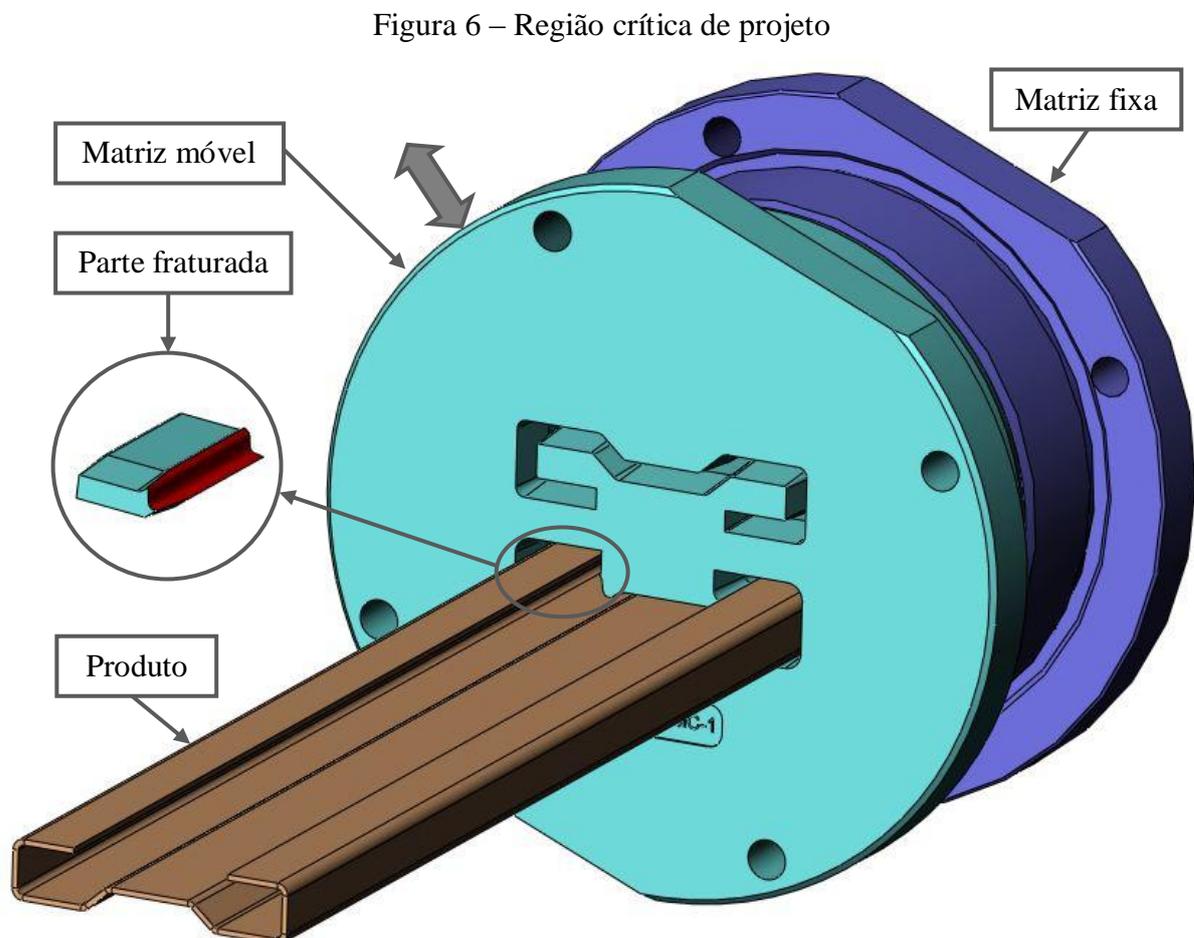
Fonte: Hellborg (2007).

Uma vez que existindo a necessidade de fabricar novas seções, a escolha e o desenvolvimento do equipamento e ferramental para fabricação destes perfis, tornam-se

produto de um complexo trabalho de engenharia. Ao longo deste processo, encontra-se uma fase de projeto do sistema de corte.

Conforme já apresentado por Dreistern (2012), diferentes processos de corte podem ser utilizados no processo de fabricação de perfis de aço, portanto uma análise de engenharia se faz necessária para a escolha da melhor alternativa, assim como para o projeto das matrizes contidas no equipamento. Cada sistema de corte possui vantagens e desvantagens que relacionam desde perdas de matéria-prima, tempo de processo, precisão dimensional, acabamento superficial, custo de fabricação do ferramental, capacidade de corte, entre outros.

Na escolha e, conseqüentemente, no projeto das matrizes de corte por cisalhamento transversal, identifica-se uma dificuldade na afirmação técnica do seu projeto e da sua funcionabilidade, uma vez que algumas seções com geometria transversal especial são complexas e podem resultar na impossibilidade de corte pelo sistema proposto. A figura 6 é exemplo desse problema de engenharia, na qual se observa que há uma região crítica passível de falha mecânica.



De face ao problema de engenharia identificado, o presente trabalho justifica-se no sentido de estabelecer uma metodologia para o projeto e validação das matrizes de corte por cisalhamento transversal, de modo a prever possíveis falhas e então, a partir disto, realizar as alterações necessárias ainda na fase de projeto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral investigar o projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis, a fim de definir a viabilidade ou não do uso deste sistema ao processo de fabricação de perfis de seção com geometria especial.

1.3.2 Objetivos Específicos

A fim de se atingir o objetivo geral proposto, sugere-se como objetivos específicos para o trabalho:

- a) comparar os sistemas de corte tradicionalmente aplicáveis;
- b) investigar a fundamentação teórica relativa ao processo de corte por cisalhamento;
- c) realizar análise computacional de modo a resolver o problema proposto;
- d) especificar critérios para o projeto de novas matrizes de corte;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PERFIS DE AÇO

Os perfis de aço formados a frio podem ser projetados para cada aplicação específica, com dimensões adequadas às necessidades de projeto de elementos estruturais leves, tais como terças, montantes, diagonais de treliças, travamentos, etc. (SILVA, SILVA, 2008).

Wood *et al.* (1996), afirma que os perfis de aço são utilizados em aplicações que o componente é projetado para ter uma espessura de parede constante. Perfis de aço são utilizados por empresas do ramo automotivo, da construção civil, do mobiliário de escritório, de eletrodomésticos, da construção ferroviária, de aeronaves, de sistemas de aquecimento, de ventilação e ar condicionado.

2.2 PROCESSO DE PERFILAÇÃO

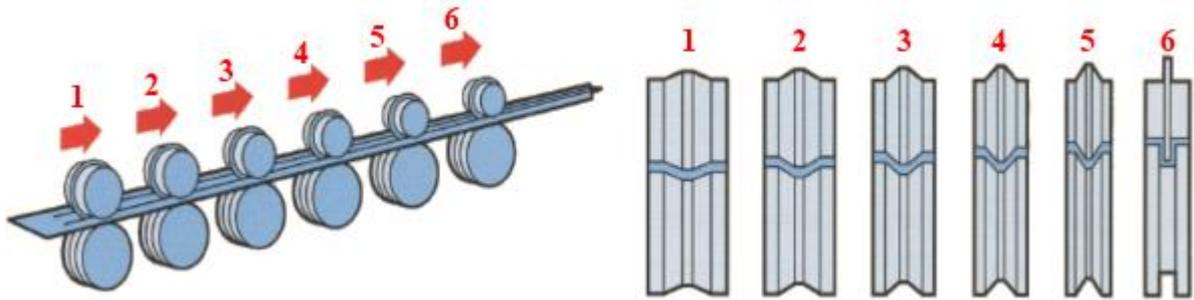
Conforme Silva e Silva (2008), dois são os processos de fabricação dos perfis formados a frio: contínuo e descontínuo. O processo descontínuo, adequado a pequenas quantidades de perfis, é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. Várias operações similares a essa, sobre a mesma chapa, fornecem à seção do perfil a geometria exigida no projeto. O comprimento do perfil está limitado à largura da prensa.

O processo contínuo, adequado à fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os rolos de uma linha de perfilação. Os rolos vão dobrando gradativamente a chapa até a forma definitiva do perfil. Quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento indicado no projeto.

Para Bui e Ponthot (2008), a perfilação é descrita como um processo de conformação a frio por rolos, e trata-se de um processo industrial para a fabricação de produtos oriundos de tiras metálicas longas e com seção constante, as quais são transformadas em determinados perfis, sem mudança considerável na sua espessura. Este tipo de processo de alta velocidade de produção é bem adequado para a fabricação de perfis longos e com tolerâncias restritas.

O processo de perfilação pode ser melhor compreendido através da figura 7 que exemplifica a sequência de conformação ao longo de uma linha de perfilação.

Figura 7 – Sequência de conformação do processo de perfilação



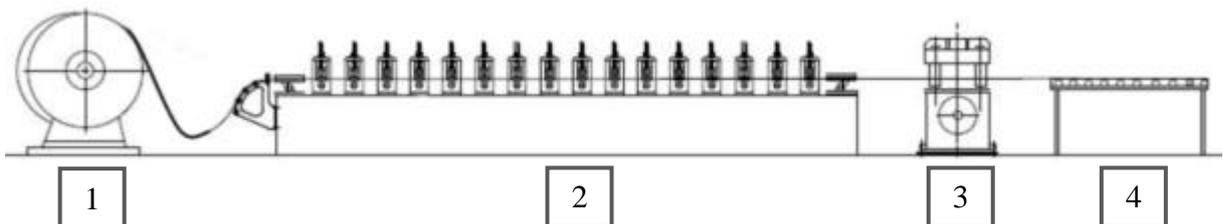
Fonte: Adaptado de Hellborg (2007).

Segundo Wood *et al.* (1996), o processo de perfilação pode ser dividido em duas categorias: uma usando tiras de aço, também conhecidas como *blanks*, com comprimentos pré-cortados, e a outra onde a bobina de aço é cortada em tiras, as quais são perfiladas continuamente, sendo o produto cortado após a conformação.

Nas operações que utilizam *blanks*, o equipamento geralmente é dotado de um sistema alimentação na entrada da máquina e de um sistema de empilhamento do produto conformado na saída da linha de perfilação. Este método é tradicionalmente aplicado a um baixo volume de peças.

O processo de perfilação contínuo é mais eficiente e produtivo, porém o maquinário requer uma configuração mínima composta de um desbobinador de tiras (1), perfiladeira (2), sistema de corte (3) e uma mesa de descarga (4), a qual destina o produto para o empilhamento e embalagem, conforme mostrado na figura 8. Este processo pode receber operações intermediárias como perfurações, recortes, estampos e marcações.

Figura 8 – Equipamentos mínimos para perfilação contínua



Fonte: Adaptado de Halmos, 2006.

O sistema de corte de *blanks* é relativamente simples, pois requer apenas um par de facas planas, entretanto, as operações de corte do sistema de perfilação contínua exigem a construção de sistemas mais complexos de corte, onde normalmente são construídas matrizes de corte específicas para cada geometria conformada.

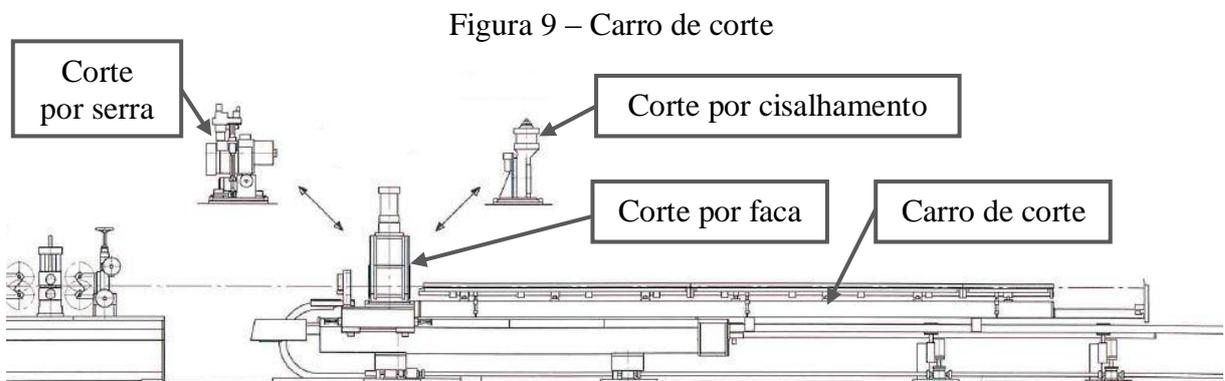
2.3 PROCESSO DE CORTE DE PERFIS

Segundo Halmos (2006), as linhas de perfilação, com exceção das linhas alimentadas por *blanks*, exigem um equipamento para o corte do produto. Comumente, são utilizadas prensas para efetuar o corte. Cita-se também o uso de serras, laser, plasma, entre outros métodos para a execução do corte do produto.

Os fabricantes de máquinas perfiladeiras comercializam alguns modelos de equipamentos de corte para uso nas linhas de perfilação como as linhas de corte por cisalhamento (1), corte por faca (2) ou corte por meio de usinagem por serra (3), conforme ilustrado anteriormente na figura 3.

Conforme a empresa Kent Corporation (2012), tradicional fabricante de máquinas e acessórios para linhas de fabricação de tubos e perfis, situada nos Estados Unidos, oferece linhas de corte por serra e corte por faca. Por sua vez, a empresa alemã Dreistern (2012), oferece os três modelos de corte citados anteriormente. Da mesma forma, a empresa Zikeli (2012b), uma das tradicionais fabricantes nacionais de máquinas perfiladeiras, também oferece os três modelos de sistemas de corte para seus clientes.

Uma característica importante dos sistemas de corte citados, é que todos são instalados sobre uma mesa móvel chamada carro de corte, que tem por função manter a linha de perfilação em movimento durante o processo de corte. Dessa forma, no momento do corte, o carro de corte iguala a velocidade da linha de perfilação e então o corte pode ser realizado sem prejuízo à velocidade de perfilação. A figura 9 ilustra o carro de corte com as possíveis configurações de corte.

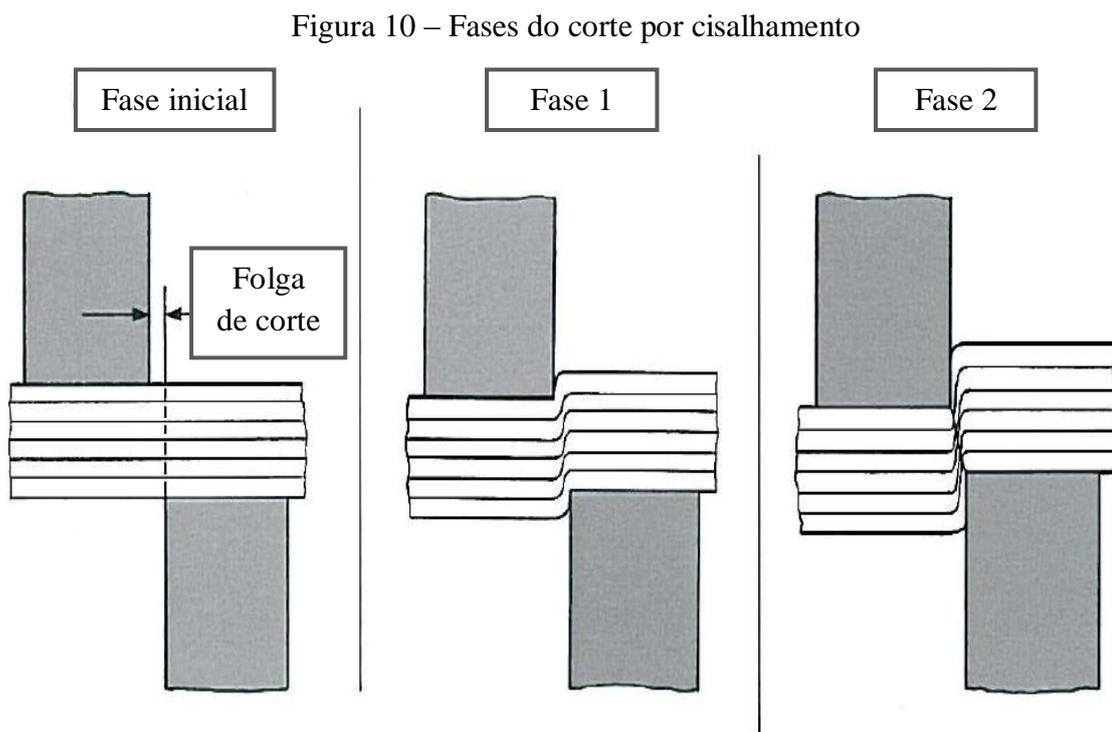


Fonte: Adaptador de Dreistern, 2012

A escolha do sistema pode ser influenciada pela geometria que se deseja cortar. No processo de perfilação contínuo, o corte do produto após o mesmo ter obtido a sua geometria transversal final, se torna um processo complexo em função das diferentes geometrias transversais que podem ser obtidas pelo processo de perfilação.

2.3.1 Linha de corte por cisalhamento

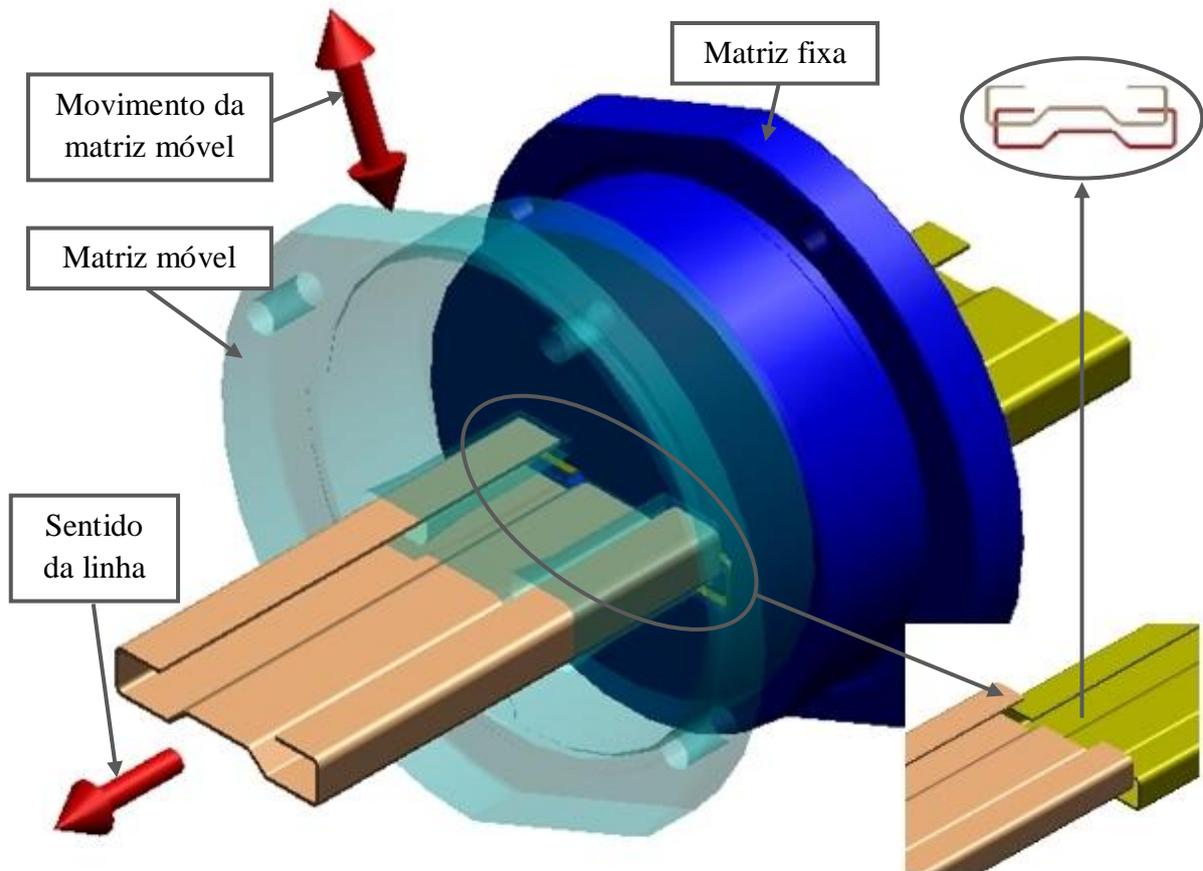
Para Wood *et al.* (1996), no corte por cisalhamento, o produto está colocado entre uma lâmina estacionária inferior e uma lâmina superior móvel. À medida que a lâmina superior é forçada para baixo, o produto é penetrado a uma fração específica da sua espessura. A fração não penetrada sofre o rompimento e então, o material é separado. A figura 10 ilustra as fases de corte por cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Neuenkamp (2008).

No corte de perfis, duas matrizes, uma fixa e a outra móvel, são instaladas em uma prensa hidráulica. Quando a matriz móvel é acionada, o cisalhamento do perfil ocorre de forma muito similar ao corte realizado por uma guilhotina de chapas planas. A figura 11 ilustra o processo de corte por cisalhamento aplicado ao corte de perfis.

Figura 11 – Esboço do processo de corte por cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

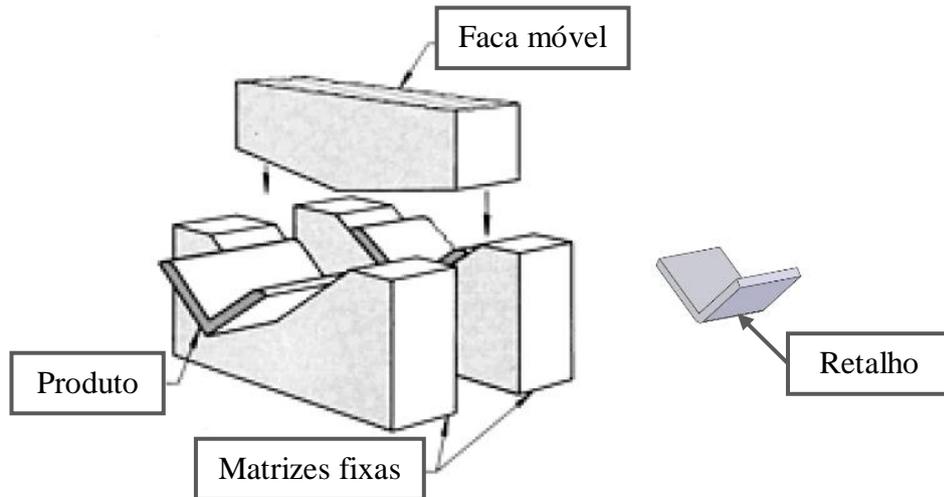
Conforme Dreistern (2012) e Williams (2005), o sistema de corte por cisalhamento aplicado ao corte de perfis possui as seguintes características:

- a) curso de trabalho pequeno;
- b) possibilidade de regulação do ângulo de corte;
- c) não há geração de cavacos (perda de matéria prima);
- d) tempo de *setup* reduzido;
- e) longa vida útil devido à possibilidade de afiação das matrizes;
- f) aplicável apenas em perfis de seção aberta (impossibilidade para uso em tubos);
- g) tamanho reduzido.

2.3.2 Linha de corte por faca

O corte por faca é caracterizado pela presença de dois planos de corte. Este processo gera um retalho do corte com comprimento igual à espessura da faca, conforme figura 12.

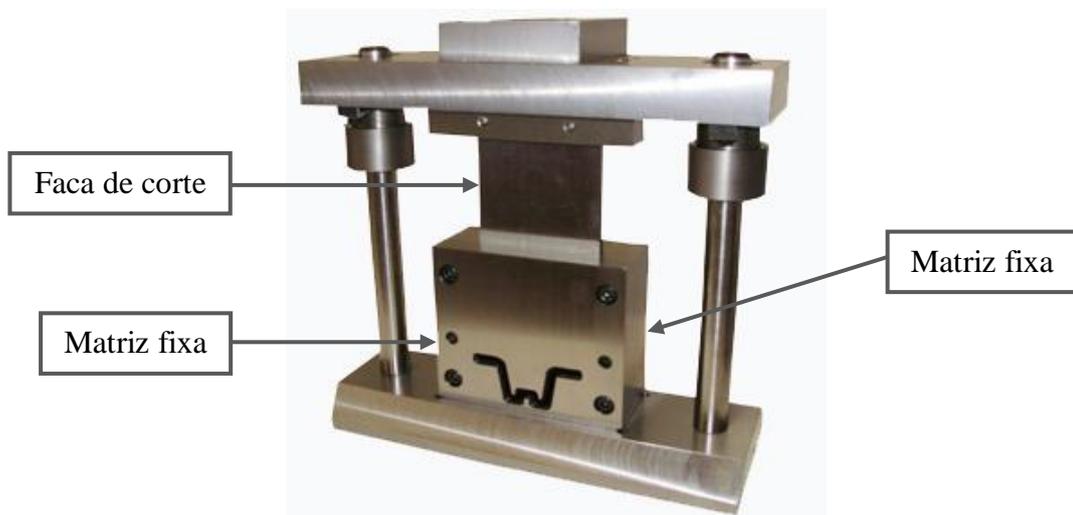
Figura 12 – Corte por faca



Fonte: Adaptado de Wood *at al.* 1996.

A linha de corte por faca aplicado ao corte de perfis é caracterizada pela presença de duas matrizes fixas e uma faca de corte montados sob uma prensa hidráulica, onde a faca ao se deslocar ao longo das matrizes promove o cisalhamento do perfil que passa por elas. A figura 13 apresenta o sistema de corte por faca.

Figura 13 – Sistema de Corte por faca



Fonte: Adaptado de Camasi, 2012.

Conforme Dreistern (2012) e Fiorentini (2012), o processo de corte por faca aplicado ao corte de perfis é caracterizado por:

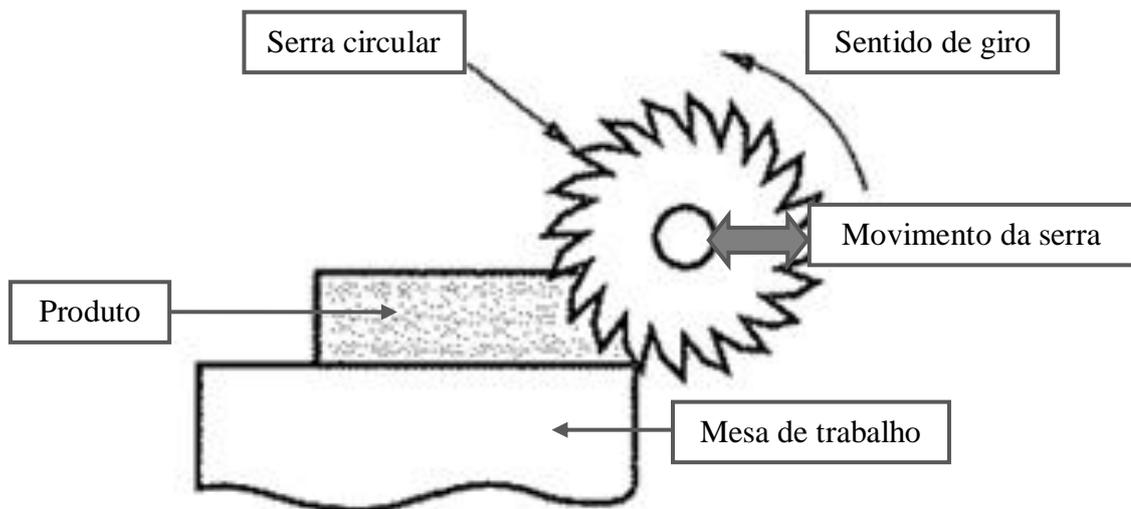
- a) presença de cavaco com comprimento igual a espessura da faca;
- b) forças de corte reduzidas se comparada ao sistema de corte por cisalhamento;

- c) curso de corte proporcional a altura do perfil;
- d) longa vida útil devido à possibilidade de afiação das matrizes e da faca de corte;
- e) aplicável em perfis de seção aberta e em algumas seções fechadas;

2.3.3 Linha de corte por meio de usinagem por serra

Conforme Groover (2007), o corte por serra é um processo onde a ferramenta de corte possui uma série de arestas de corte chamadas dentes. Serras circulares geralmente são utilizadas para cortar barras longas, tubos e outros formatos similares em um comprimento específico. A figura 14 exemplifica a usinagem por serra circular.

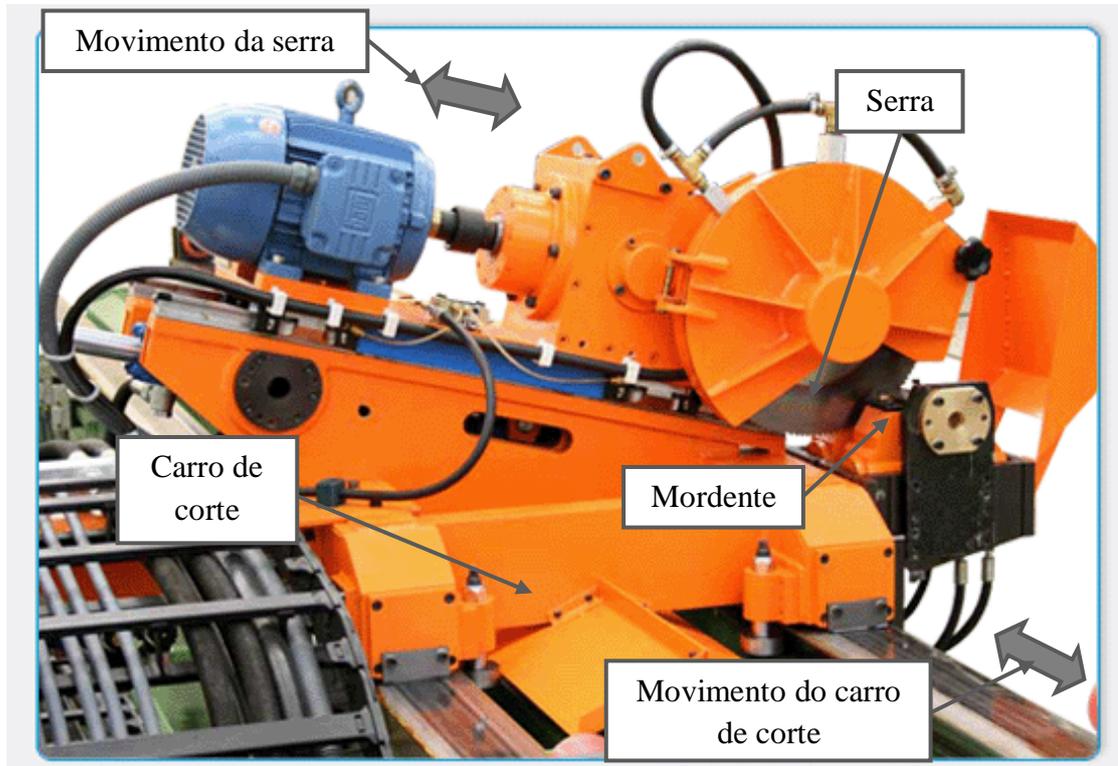
Figura 14 – Usinagem por serra circular



Fonte: Adaptado de Groover, 2007.

O processo de corte por meio de usinagem por serra se dá pela remoção do material do perfil através da rotação da serra. O acionamento da serra é obtido através do motor elétrico. O corte ocorre quando a serra se desloca contra o perfil que se encontra fixado por mordentes. Neste momento, a rotação da serra provoca a usinagem do perfil gerando, além dos cavacos de corte, a separação das peças cortadas. A figura 15 ilustra o equipamento de corte por serra.

Figura 15 – Equipamento de corte por meio de usinagem por serra



Fonte: Adaptado de Zikeli, 2012a.

Segundo Dreistern (2012), Tallyrand (2012) e Zikeli (2012a), o processo de corte por serra possui as seguintes características:

- a) geração de cavaco;
- b) curso de corte proporcional as dimensões do perfil;
- c) permite a afiação das serras;
- d) aplicável em perfis de seção aberta e em seções fechadas;
- e) necessita de refrigeração em função do aquecimento gerado pelo atrito durante a usinagem do corte;
- f) índice de rebarbas reduzido.

2.4 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE CORTE

Uma vez apresentado os sistemas de corte usuais aplicados ao corte de perfis de aço, é possível realizar um comparativo entre os mesmos de modo a prover critérios para a escolha do sistema ideal para o corte de perfis, conforme segue na tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre os processos de corte

Critério	Corte por cisalhamento	Corte por faca	Corte por meio de usinagem por serra
1. Geração de cavaco (sucata)	Não há	Sim	Reduzido
2. Tempo de corte	Baixo	Alto	Alto
3. Admite afiação	Sim	Sim	Sim
4. Perfil aberto	Sim	Sim	Sim
5. Perfil fechado	Não	Com restrição	Sim
6. Fluído de corte	Não	Não	Sim
7. Mecanismo	Simples	Simples	Complexo

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012, com base na bibliografia citada.

O sistema de corte por cisalhamento geralmente é priorizado nas linhas de perfilação em função de suas vantagens. Destaca-se a simplicidade do mecanismo, a não geração de cavaco, o tempo reduzido de corte e a ausência da necessidade de fluido de corte.

2.5 CISALHAMENTO DE PRODUTOS PLANOS

Segundo Santos, Moura e Sappak (2008), o corte é um dos métodos mais utilizados no processo de manufatura de produtos metálicos. O cisalhamento é oriundo de operações realizadas por guilhotinas, tesouras e discos rotativos de vários tipos.

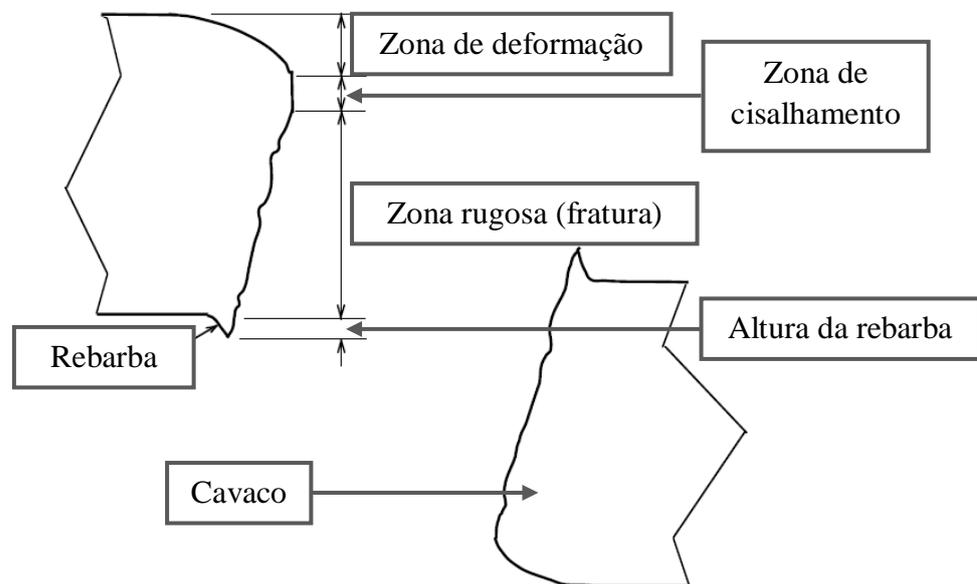
2.5.1 Fenômeno do corte por cisalhamento

Conforme Wick, Benedict e Veilleux (1984), o princípio do corte é simples. As lâminas penetram no material a ser cortado até o limite de resistência ser superado e então a ruptura do material ocorre, conforme mostrado anteriormente na figura 9.

Segundo Morais e Borges (2010), a superfície de uma peça metálica cortada apresenta geralmente quatro regiões conforme ilustrado na figura 16, sendo elas:

- a) uma pequena região de deformação plástica pela compressão da navalha sobre a superfície da chapa;
- b) uma região lisa de cisalhamento, na qual a navalha efetivamente penetra no material;
- c) uma região rugosa, opaca, na qual ocorre a ruptura final e assim também conhecida como região de “explosão”;
- d) eventualmente, uma rebarba de arrancamento final.

Figura 16 – Borda de corte mostrando várias regiões



Fonte: Adaptado de Hosford e Caddell, 2007.

As propriedades mecânicas do material a ser cortado assim como parâmetros do processo de corte, como por exemplo, a folga de corte, influenciam diretamente na formação e na proporção de cada região apresentada.

2.5.2 Parâmetros do processo de corte

Segundo Wick, Benedict e Veilleux (1984), as variáveis que determinam o tipo e o tamanho da lâmina utilizada incluem a espessura e as propriedades do material a ser cortado. O material a ser cortado, por sua vez, tem influência direta na velocidade e na força de corte assim como na folga e na inclinação das lâminas.

2.5.2.1 Força de corte

Wick, Benedict e Veilleux (1984), afirmam que quando uma navalha realiza um corte em uma peça metálica, esta exerce uma força considerável para iniciar o corte e continuar o processo. Num corte convencional, apenas uma fração do material é cortada, o restante do material é fraturado durante o processo de corte.

Segundo Schaeffer e Boff (2011), as forças envolvidas no processo de corte são altas. Isso se deve ao fato de que o material vai encruando devido à deformação plástica crescente, o que faz com que a força de corte aumente gradualmente, até alcançar um valor máximo, iniciando a fissuração.

A força de corte requerida pode ser dada usando as equações 1 e 2:

$$F_c = \tau_c \cdot A_c \quad (1)$$

Onde:

F_c = Força de corte [N];

τ_c = Tensão máxima de cisalhamento do material [MPa];

A_c = Área a ser cisalhada [mm²], calculada por:

$$A_c = l_c \cdot s \quad (2)$$

Onde:

l_c = Perímetro ou comprimento da aresta de corte [mm];

s = Espessura da chapa [mm].

Para Wick, Benedict e Veilleux (1984), a resistência ao cisalhamento para aços com baixo teor de carbono está entre 70 a 80% da resistência a tração.

Schaeffer e Boff (2011) destacam também, alguns fatores que influenciam na força de corte:

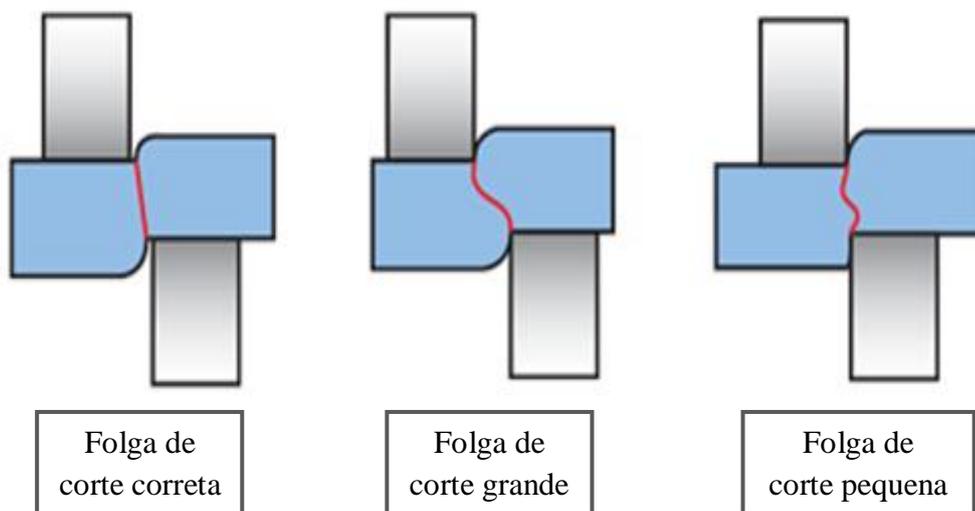
- a) folga entre as matrizes de corte;
- b) desgaste do ferramental;
- c) forma da linha de corte;
- d) espessura da chapa;
- e) qualidade da chapa;

f) lubrificação.

2.5.2.2 Folga de corte

Conforme Wick, Benedict e Veilleux (1984), a folga de corte é a distância entre a lâmina móvel e a lâmina fixa, quando uma passa pela outra. Há duas condições extremas para o projeto de folga de corte: a primeira é o caso de folga excessiva, onde a borda fica com uma aparência de um rasgo e que, por consequência, resulta em forças de corte elevadas devido ao surgimento de esforços de flexão durante o corte. No segundo caso, onde a folga de corte é reduzida, onde não fica visível a região de fratura do material e o corte fica com uma aparência irregular em função de a lâmina ficar raspando no material enquanto o corte é realizado. O autor cita também que, de forma geral, a folga entre lâminas deve ser de 8% da espessura da chapa que se está cortando. A figura 17 exemplifica as diferentes configurações de folgas de corte.

Figura 17 – Comparativo entre folgas de corte



Fonte: Adaptado de Santos, Moura e Sappak, 2008.

Para Schaeffer e Boff (2011), as folgas de corte dependem do material e da superfície de corte a ser obtida. Assim, para a superfície considerada ideal, onde a mesma apresenta um equilíbrio entre as diferentes zonas de corte, as folgas de corte seguem os valores apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Folgas de corte de acordo com o material a ser cortado

Material	Folga (%) (em função da espessura do material)
Aço com elevado teor de carbono	15
Aço macio	9
Aço inoxidável	10
Cobre duro	4
Cobre macio	6
Bronze fosforoso	11
Latão Duro	7
Latão Macio	6
Alumínio duro	10
Alumínio macio	7
Magnésio	4

Fonte: Adaptado de Schaeffer e Boff, 2011.

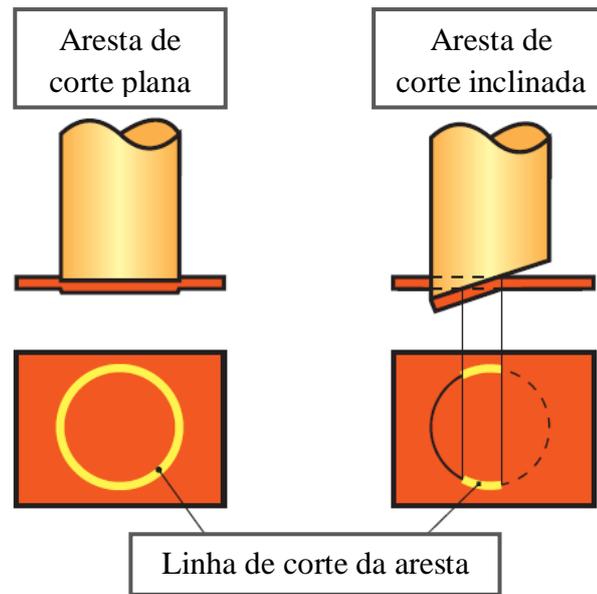
2.5.2.3 Ângulo de corte

Segundo Hosford (2007), as forças necessárias para cisalhar o material, dependem entre outros fatores, do ângulo da aresta de corte entre a lâmina e o material. Se a aresta de corte for paralela ao material, todo o corte ocorre simultaneamente elevando a força de corte total ao seu valor máximo. Ao aumentar o ângulo entre a lâmina e o material a ser cortado, a quantidade de material a ser cortado em qualquer instante diminui.

Da mesma forma, Schuler (1998) e Marcondes (2009), afirmam que é possível reduzir a força necessária para o corte se, em vez de utilizar uma aresta de corte paralela ao material, usar uma aresta de corte com a face inclinada em relação ao material a ser cortado.

A figura 18 ilustra as duas configurações de aresta de corte, sendo a primeira a aresta de corte plana e a segunda a aresta de corte inclinada.

Figura 18 – Redução da força de corte por meio da inclinação da aresta de corte



Fonte: Adaptado de Schuler, 1998.

Conforme Schuler (1998), ao se inclinar a aresta de corte, a força total é reduzida em pelo menos 30% em comparação a uma aresta de corte paralela a superfície plana. No entanto, o trabalho global de corte permanece o mesmo, uma vez que a força reduzida atua sobre um curso mais longo. Este método é utilizado a fim de assegurar um funcionamento suave, reduzindo as tensões residuais sobre as matrizes de corte.

O autor cita que o trabalho de corte é dado pela equação 3:

$$W_c = x \cdot F_c \cdot s \quad (3)$$

Onde:

W_c = Trabalho de corte [N.m];

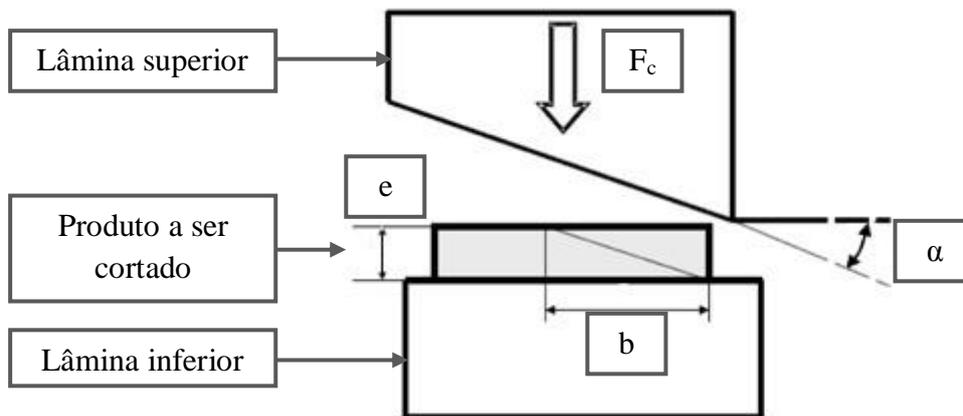
x = Coeficiente da progressão de corte [adimensional]

Segundo Schuler (1998), o coeficiente da progressão de corte (x), depende das propriedades mecânicas do material. De forma geral, o valor de “ x ” fica entre 0,4 a 0,7. Para cálculo aproximado, usa-se a equação 4.

$$W_c = \frac{2}{3} \cdot F_c \cdot s \quad (4)$$

Para Caversan e Junior (2012), o corte de chapas por guilhotinas também pode ser feito com a lâmina inclinada, de modo a diminuir a força de corte, conforme ilustrado na figura 19.

Figura 19 – Corte de chapas por guilhotina.



Fonte: Adaptado de Caversan e Junior, 2012.

O cálculo da área de corte (A_c) e da força de corte (F_c) é obtida pelas equações 5 e 6 respectivamente:

$$A_c = \frac{e \cdot b}{2} \quad (5)$$

$$F_c = \frac{e^2 \cdot \tau_c}{2 \cdot t \cdot g \alpha} \quad (6)$$

Onde:

b = largura da região cortada instantaneamente [mm];

α = ângulo entre a lâmina superior e a lâmina inferior [°].

2.6 FERRAMENTAL PARA O CORTE DE PERFIS

Conforme Silveira e Schaeffer (2008), na elaboração do projeto da ferramenta para a fabricação de uma determinada peça, é indispensável estabelecer uma sequência de etapas de trabalho. Os autores citam que, alguns dos fatores que contribuem para dificultar a solução teórica de determinados problemas no projeto do ferramental são:

- a) a forma geométrica irregular de algumas peças;
- b) as características do material que é utilizado para produção;
- c) o modo como é construída a matriz.

Uma vez que a forma geométrica do produto está definida, é preciso estudar os materiais a serem utilizados na fabricação dos ferramentais, assim como o modo de sua construção, de forma a obter uma configuração de ferramenta apropriada ao material que se deseja cortar.

Segundo Silveira e Schaeffer (2008), a determinação do material a ser utilizado de acordo com a função que a ferramenta irá desempenhar é uma das etapas mais importantes. A escolha mais criteriosa está particularmente nas matrizes de corte, pois estes são os elementos em contato direto com o produto a ser cortado.

2.6.1 Materiais aplicados em matrizes de corte

Os aços para ferramentas e matrizes são projetados para fins especiais. Conforme GGD Metals (2011), estes aços são produzidos e processados para atingir um elevado padrão de qualidade e são utilizados principalmente em: matrizes, moldes, ferramentas de corte intermitente e contínuo, ferramentas de conformação e corte de chapas a frio, componentes de máquina, etc.

Para Rossi (1979), a seleção de aços para a construção de uma ferramenta deve basear-se em:

- a) dimensões das matrizes de corte;
- b) tipo de operação que se deseja utilizar, como corte, dobra, embutimento, etc;
- c) temperatura de trabalho;
- d) tipo de material que se deseja conformar.

Para Silveira e Schaeffer (2008), comumente ferramentas para o corte de chapas metálicas são construídas em aço AISI D6 com dureza de utilização entre 56 a 62 HRC. Os autores citam que este é um aço de extrema estabilidade dimensional, conhecido como indeformável. Tem excepcional resistência à abrasão e máxima estabilidade de gume, sendo recomendado para tal tipo de aplicação por possuir boas propriedades mecânicas como: dureza elevada devido à alta taxa de carbono e alta resistência ao desgaste.

Caversan e Junior (2012), sugerem como material para matrizes de corte:

a) aço para trabalho a frio AISI D6: temperado e revenido com dureza entre 60-62 HRC;

b) aço rápido AISI M2: temperado e revenido com dureza entre 62-64 HRC.

Yoshida (2001) apresenta uma referência orientativa para a seleção de aços ferramenta para o corte de chapas metálicas com as respectivas durezas, conforme o quadro 1.

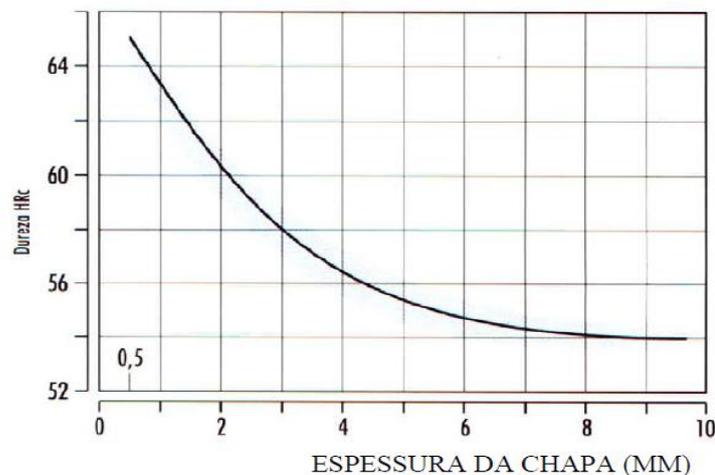
Quadro 1 - Referência orientativa para a seleção de aços para o corte de chapa metálica.

PROCESSO	PRODUÇÃO	AÇO FERRAMENTA	DUREZA RECOMENDADA(HRC)				
			ESPESSURA DA CHAPA (mm)				
			> 1,0	1 - 2	2 - 4	4 - 6	> 6,0
FERRAMENTA GOLPE SIMPLES	BAIXA	AISI D2	58/60			NÃO	
	MÉDIA						
	ALTA	AISI M2	60/62		58/60		
FERRAMENTA PROGRESSIVA	BAIXA	AISI D2	58/60				
	MÉDIA	AISI M2	60/62			58/60	
	ALTA	AISI M2	60/62				
CARACT. DA CHAPA	COMUM	AISI D2	58/60				
	ALTA RESIST.	AISI D2/M2	58/60 ~ 60/62				
	SILICIOSA	AISI M2	60/62 ~ 62/64				

Fonte: Adaptado de Yoshida, 2001.

Yoshida (2003) apresenta uma relação de dureza entre as ferramentas de corte e a espessura do material a ser cortado conforme figura 20.

Figura 20 – Dureza adequada para ferramentas de corte fabricadas em aços AISI D2 e AISI D6 em função da espessura do material a ser cortado.



Fonte: Yoshida 2003.

2.6.2 Critérios para o projeto de matrizes de corte

Conforme Caversan e Junior (2012), há uma série de recomendações para evitar problemas de concentração de tensões durante e depois do tratamento térmico das matrizes de corte, conforme segue:

- a) evitar cantos vivos ou raios de arredondamento muito pequenos;
- b) evitar variações bruscas de secções;
- c) evitar massas com distribuição heterogêneas;
- d) evitar furos cegos, roscas e pinos;
- e) evitar proximidade de furos ocasionando paredes finas.

2.6.3 Características dos materiais do produto a ser cortado

Segundo Caversan e Junior (2012), o material base do produto a ser cortado possui características importantes, que afetam diretamente a capacidade de corte, o acabamento obtido e, também, afetam algumas características do projeto do ferramental.

A seguir, pode-se visualizar a tabela 3, com as características de algumas chapas de aço utilizadas na conformação por perfilação.

Tabela 3 - Chapas utilizadas em processos de perfilação.

Material	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento min. (%)
SAEJ403 - 1008	0,38 - 16,00	*	*	*
USICIVIL 300	1,80 - 16,00	300	400-550	18
ASTM A36	4,57 - 13,00	250	400-550	18
NBR 6650 CF21	1,80 - 5,00	210	340	22
NBR 6650 CF28	2,00 - 5,00	280	440	17
EN 100252 S235 JR	2,00 - 16,00	275	410-580	15

* valores não especificados em norma.

Fonte: Adaptado de Usiminas, 2012.

2.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Segundo Reddy (2006), os modelos matemáticos podem ser definidos por um conjunto de equações que expressam as características físicas do sistema. O modelo matemático é baseado nos princípios das leis da física, como por exemplo, o princípio da conservação de energia, conservação de massa, assim como a conservação de momento linear.

Os modelos matemáticos de um processo são desenvolvidos utilizando hipóteses sobre como funciona o processo, usando normas apropriadas, ou as leis que regem o processo, e, muitas vezes, são caracterizados por equações diferenciais ou integrais muito complexas. Há inúmeros métodos numéricos, muitos dos quais são desenvolvidos para resolver equações diferenciais. Na aproximação finita de uma equação diferencial, as derivadas são divididas pelos quocientes da diferença (ou a função é expandida numa série de Taylor) que envolvem os valores da solução discreta do domínio da malha. As equações algébricas resultantes são resolvidas para os valores da solução de pontos de malha depois de se impor as condições de contorno.

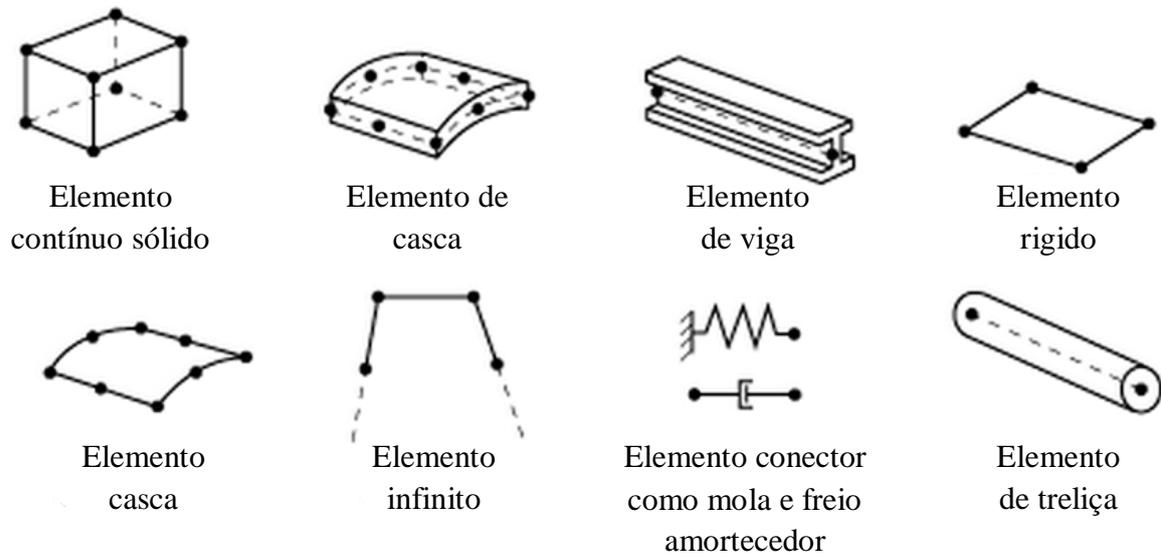
Reddy (2006) acrescenta que, o método de elementos finitos é uma poderosa ferramenta para solucionar problemas do mundo real, os quais envolvem complicadas condições físicas, geométricas e de contorno.

2.7.1 O método de elementos finitos

Conforme Rao (2004), no método de elementos finitos, o modelo é representado por uma montagem de subdivisões chamados elementos finitos. Esses elementos são interconectados por específicas junções chamadas nós. O método propõe a construção de aproximações para as grandezas incógnitas de interesse do problema por interpolação de valores nodais.

Muitas famílias de elementos são caracterizadas na análise de tensão. A grande distinção entre as famílias é o tipo de geometria que cada família usa, bem como o comportamento a ser representado, conforme ilustrado na figura 21.

Figura 21 – Família de elementos comumente utilizados



Fonte: Adaptado de Abaqus, 2012.

Conforme o manual do Abaqus (2012), a família de elementos contínua pode ser utilizada para modelar a mais ampla variedade de componentes. Conceitualmente, os elementos contínuos simplificam o modelo em pequenos blocos de material. Uma vez que os pequenos blocos podem ser ligados a outros elementos em qualquer uma das suas faces, os mesmos podem ser usados para criar modelos com as mais variadas geometrias, submetidos aos mais diferentes tipos de carregamentos. Como exemplo de elementos bidimensionais citam-se os elementos quadriláteros ou triangulares. Para os elementos tridimensionais contínuos podem-se citar hexaedros (tijolos), cunhas, ou tetraedros.

Segundo Bathe (1996), o cálculo das soluções do método de elementos finitos aplicado a corpos sólidos, é obtida por meio do somatório das matrizes de rigidez individuais K_i^e , usando o método da rigidez direta. Neste procedimento, a matriz de rigidez \mathbf{K} estruturada é obtida pela equação matricial 7:

$$K = \sum_i K_i^e \quad (7)$$

Conforme Bathe (1996), o vetor do sistema global de deslocamentos é indicado pelo vetor \mathbf{U} , enquanto que o vetor das forças que atuam na direção do deslocamento é dado por \mathbf{R} .

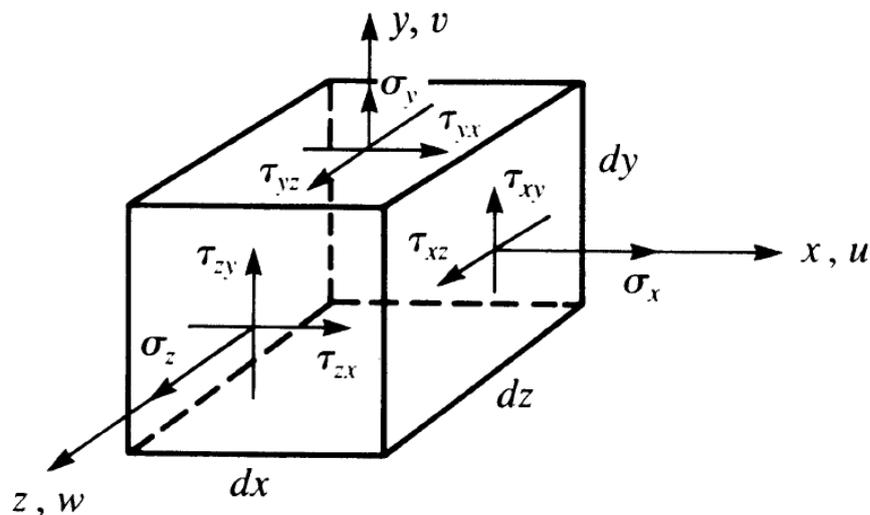
Para obter as soluções dos deslocamentos nodais, Bathe (1996) recorre às condições de contorno, as quais se referem as restrições que atuam em cada nó. Uma vez aplicadas essas

condições de contorno, pode ser obtida a matriz de rigidez. As forças nodais são obtidas pela multiplicação dos elementos da matriz de rigidez K_i^e com os deslocamentos.

2.7.2 Tensão e deformação tridimensional

Conforme Logan (2007), considera-se o elemento tridimensional infinitesimal em coordenadas cartesianas com dimensões dx , dy e dz e tensões normais e de cisalhamento como mostrado na figura 22. Este elemento convenientemente representa o estado de tensões em três planos perpendiculares de um corpo num estado de tensão tridimensional. Como de costume, as tensões normais são perpendiculares às faces do elemento e são representados por σ_x ; σ_y e σ_z . As tensões de cisalhamento agem nas faces do elemento e são representados por τ_{xy} ; τ_{yz} ; τ_{zx} , e assim por diante.

Figura 22 – Tensores tridimensionais em um elemento



Fonte: Logan, 2007.

Segundo Logan (2007), as equações de equilíbrio do modelo são dadas pelas equações 8:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}; \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}; \quad (8)$$

Onde:

τ_{xy} = tensão de cisalhamento na direção xy ;

τ_{yx} = tensão de cisalhamento na direção yx;
 τ_{yz} = tensão de cisalhamento na direção yz;
 τ_{zy} = tensão de cisalhamento na direção zy;
 τ_{zx} = tensão de cisalhamento na direção zx;
 τ_{xz} = tensão de cisalhamento na direção xz.

Logan (2007) cita que a relação de deformação/deslocamento é obtida pelas equações 9:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9)$$

Onde u, v, e w são associados à deformação com as direções x, y, e z.

Segundo Logan (2007), as deformações cisalhantes $[\gamma]$ em suas respectivas direções são dadas por pelas equações 10:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \quad (10)$$

Logan (2007) assume que a deformação no elemento tridimensional é dada por:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

2.7.3 Plasticidade

O modelo elástico-plástico prevê que a deformação pode ser dividida em uma parte elástica e uma parte plástica. Segundo Hosford (2007), durante a fase elástica, um corpo retorna à sua forma original quando o carregamento é removido. O estado de tensão deformação durante a fase elástica está relacionado por meio das leis de Hooke. Qualquer carregamento irá causar alguma tensão. Em contrapartida, não ocorre deformação plástica até que a tensão gerada por algum carregamento atinja o limite de escoamento do material.

O comportamento elástico significa que a deformação é totalmente recuperável, isto é, quando a carga é removida, o material regressa à sua forma original. Uma vez que a carga exceder um certo o limite de escoamento, a deformação não está mais totalmente recuperável. Alguma parte da deformação permanecerá quando a carga é removida, tal como, por exemplo, quando um clipe de papel é dobrada em excesso. As teorias da plasticidade modelam a resposta mecânica do material, uma vez que este sofre uma deformação não recuperável de uma forma dúctil. As teorias têm sido desenvolvidas com maior intensidade para os metais, mas eles também são aplicadas aos solos, concreto, rocha, gelo, espuma deformável, e assim por diante. Esses materiais se comportam de maneiras muito diferentes. Por exemplo, valores elevados de pressão hidrostática pura podem provocar pouca deformação elástica dos metais, mas os valores de pressão hidrostáticos pequenos podem causar uma significativa variação de volume não recuperável em uma amostra de solo. No entanto, os conceitos fundamentais da teoria de plasticidade são suficientemente gerais para que os modelos baseados nestes conceitos tenham sido desenvolvidos com êxito para uma vasta gama de materiais. De forma geral, o manual do Abaqus (2012) descreve o modelo de plasticidade através das equações que seguem:

$$F = F^{el} \cdot F^{pl} \quad (12)$$

Onde:

F = gradiente de deformação total;

F^{el} = parte de deformação retornável;

F^{pl} = parte de deformação permanente.

Esta decomposição pode ser usada diretamente para formular o modelo de plasticidade, que segue pela equação 13.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (13)$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação total;

$\dot{\varepsilon}^{el}$ = taxa de deformação retornável;

$\dot{\varepsilon}^{pl}$ = taxa de deformação permanente.

Logo, a parte elástica da resposta é assumida como sendo deriváveis de uma energia potencial elástica e então, a tensão é definida pela equação 14.

$$\sigma = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon^{el}} \quad (14)$$

Onde:

U = densidade de energia promovida pela tensão;

σ = tensão provocada no material.

A função do escoamento f define o limite para a região de resposta elástica, a qual é dada pela expressão 15.

$$f(\sigma, \theta, H_\alpha) < 0 \quad (15)$$

Onde:

f = limite da região de resposta elástica;

θ = temperatura;

H_α = conjunto de parâmetros de encruamento.

Da mesma forma, a função do escoamento f define o limite para a região de resposta plástica, a qual é dada pela expressão 16.

$$f(\sigma, \theta, H_\alpha) = 0 \quad (16)$$

Quando o material escoar de forma plástica, a parte plástica da deformação é definida pela regra do fluxo, a qual é dada pelas equações 17 e 18.

$$d\varepsilon^{pl} = \sum_i d\lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial \sigma} \quad (17)$$

$$g_i = (\sigma, \theta, H_{i,\alpha}) \quad (18)$$

Onde:

g_i = fluxo potencial do sistema;

$d\lambda_i$ = taxa de variação do tempo;

$H_{i,\alpha}$ = parâmetros do sistema em i ;

A forma em que a regra de fluxo é escrita acima, assume que existe um potencial de fluxo único no sistema de ordem i . Modelos mais gerais de plasticidade podem ter vários potenciais de fluxo de ativos em um ponto.

Em alguns modelos de taxa independentes de plasticidade a direção do fluxo é a mesma que a direção da normal para fora, para a superfície de rendimento, conforme indicado pela equação 19.

$$\frac{\partial g_i}{\partial \sigma} = c_i \frac{\partial f_i}{\partial \sigma} \quad (19)$$

Onde:

c_i = valor escalar.

O parâmetro final em modelos de plasticidade é o conjunto de equações de evolução para os parâmetros de endurecimento, a qual é descrita pela equação 20.

$$dH_{i,\alpha} = d\lambda_i \cdot h_{i,\alpha}(\sigma, \theta, H_{i,\beta}) \quad (20)$$

Onde:

$h_{i,\alpha}$ = taxa de endurecimento para $H_{i,\alpha}$;

2.7.4 Critérios de falha

No projeto de máquinas e ferramentas, constantemente o projetista se depara com uma situação de avaliação e validação de um elemento ou um conjunto de componentes mecânicos. Eventos com deformações permanentes, rachaduras, trincas e rupturas são exemplos de falha em componentes mecânicos.

Segundo Shigley, Mischke e Budynas (2005), infelizmente, não há uma teoria universal de falha para o caso geral de propriedades de materiais e estados de tensão. De forma geral, o comportamento dos metais estruturais é classificado, tipicamente, como dúctil ou frágil.

Conforme Shigley, Mischke e Budynas (2005), os materiais dúcteis são normalmente classificados por terem índice de alongamento $\epsilon_f > 0,05$ e uma resistência ao escoamento identificável. Os materiais frágeis têm índice de alongamento $\epsilon_f < 0,05$, não exibem uma resistência ao escoamento identificável e são tipicamente classificados segundo as resistências à tração e à compressão. As teorias de falha geralmente aceitas são as seguintes:

Materiais dúcteis (critérios de escoamento)

- a. Tensão máxima de cisalhamento;
- b. Energia de distorção;
- c. Coulomb-Mohr dúctil.

Materiais frágeis (critérios de fratura)

- a. Tensão normal máxima;
- b. Coulomb-Mohr frágil.

2.7.4.1 Teoria da energia de distorção

A teoria da energia de distorção, também conhecida por Teoria de Von Mises, prevê que ocorre escoamento quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede à energia de deformação por distorção por unidade de volume, correspondente ao escoamento sob tração ou compressão do mesmo material (Shigley, Mischke e Budynas, 2005).

Segundo Toloui, Firoozabadi e Saidi (2011), o estado geral de tensões pelo critério de Von Mises é fornecido pela equação 21.

$$\sigma_{vM} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (21)$$

Onde:

σ_{vM} = tensão pelo critério de Von Mises (MPa);

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensões principais (MPa).

Conforme Shigley, Mischke e Budynas (2005), a manipulação matemática envolvida no desenvolvimento da teoria da energia de distorção pode tender a obscurecer o valor real e a utilidade do resultado. A equação fornecida permite que a situação mais complexa em termos de tensão seja representada. Esta tensão pode ser comparada com a resistência de escoamento do material por meio da equação 22.

$$\sigma_{vM} = \frac{S_y}{n} \quad (22)$$

Onde:

S_y = resistência de escoamento do material (MPa);

n = fator de segurança.

2.7.4.2 Teoria da tensão normal máxima

Segundo Shigley, Mischke e Budynas, (2005), a teoria da tensão normal máxima afirma que a falha ocorre sempre que uma das três tensões principais iguala-se ou ultrapassa o limite de resistência. Conhecendo as tensões principais $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, a teoria afirma que a falha ocorre sempre que a condição da equação 23 não é respeitada:

$$\sigma_1 \geq S_{ut} \quad \text{ou} \quad \sigma_3 \geq -S_{uc} \quad (23)$$

Onde:

S_{ut} = última resistência à tração (MPa);

S_{uc} = última resistência à compressão (MPa);

3 METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo a solução do problema do projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis de aço. Para isso, utilizou-se o método de elementos finitos para avaliar as variáveis de projeto aplicáveis a este sistema de corte.

3.1 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação por elementos finitos contempla os estágios de pré-processamento, simulação e pós-processamento.

Na etapa de pré-processamento, o modelo do problema é criado de forma gráfica, por meio de *software* de modelamento CAD SolidWorks. Este modelo matemático é utilizado como dado de entrada no *software* CAE Abaqus, junto a outras características físicas do processo, como os dados de materiais, a velocidade e as forças envolvidas no processo de corte, as quais são admitidas como condições de contorno da simulação.

A etapa do processamento envolve a análise não linear do corte do perfil, a qual assume variáveis como plasticidade e contato entre superfícies. É neste passo que o *software* CAE Abaqus resolve o problema numérico definido durante o pré-processamento. Esta etapa pode levar de segundos a dias, dependendo da complexidade do problema numérico. Para o caso proposto, utiliza-se o método explícito do *software* CAE Abaqus, cujo método avança para a solução do método de elementos finitos por meio de um esquema de integração de equações dinâmicas estruturais, simplificando o processo. Este método é indicado, conforme Söderberg (2006), para problemas altamente dinâmicos com comportamento não linear, que é o caso quando se está simulando a fratura de metais.

O método implícito se diferencia do método explícito na direção que, o método implícito ou *standard*, assim também chamado, resolve o sistema de equações implicitamente ao longo de cada incremento obtido. Este método exige maiores recursos computacional, uma vez que o cálculo envolve equações definidas pelo estado atual ($Y(t)$) e posterior do sistema ($Y(t+\Delta t)$), sendo Δt um pequeno espaço de tempo. Este método é ideal para a aplicação em estudos estáticos ou quase estáticos que se resumem em comportamentos lineares. A formulação matemática para o método implícito é dada na equação 24.

$$G(Y(t), Y(t+\Delta t))=0 \quad (24)$$

O método explícito busca a solução por meio de incrementos de tempo suficientemente pequenos (Δt), sem a resolução de um sistema acoplado de equações em cada incremento. Assim, compreende-se que o sistema apenas calcula o estado seguinte ($Y(t+\Delta t)$) ao estado atual ($F(Y(t))$). Este método é eficiente em aplicações dinâmicas que envolvem não linearidade decorrente da plasticidade do material, por exemplo. A formulação matemática para o método explícito é dada na equação 25.

$$Y(t+\Delta t) = F(Y(t)) \quad (25)$$

De modo a exemplificar as diferenças entre a simulação implícita (*standard*) e a simulação explícita, segue a tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo entre o método implícito e explícito.

Característica	Implícito	Explícito
Biblioteca de elementos	Extensa biblioteca de elementos.	Apenas elementos aplicáveis a simulações explícitas.
Procedimento de análise	Análise linear em geral.	Todo tipo de análise linear e não linear
Modelos de materiais	Modelos em geral	Além dos modelos gerais, possível análises em modelos de falhas em materiais.
Formulação de contato	Robusta capacidade de resolver problemas de contato	Robusta capacidade de resolver qualquer problema de contato
Técnica de solução	Baseada em uma matriz de rigidez incondicionalmente estável.	Baseada em uma solução explícita de integração, é condicionalmente estável.
Recursos computacionais	Em grandes simulações, o uso de memória pode ser alto.	O uso de memória é tipicamente bem menor.

Fonte: Adaptado do manual do Abaqus, 2012.

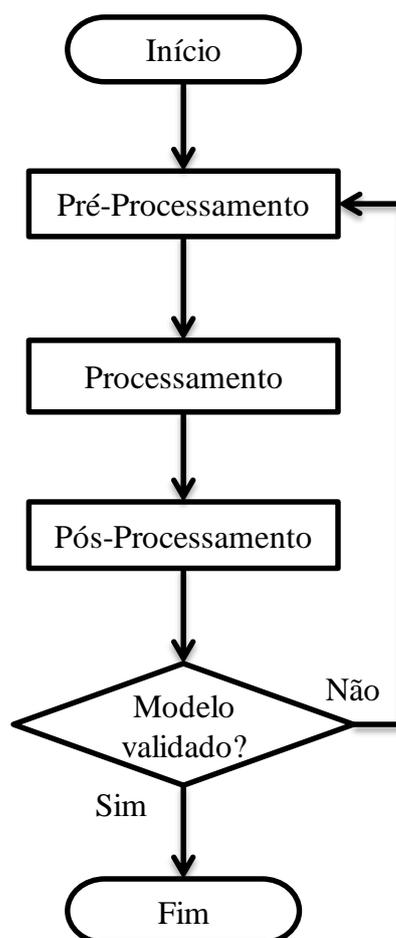
No pós-processamento, é possível avaliar os resultados obtidos pelo processamento após ter sido concluída a simulação. Dados como, deslocamentos, tensões e outras variáveis

fundamentais calculadas anteriormente durante o processamento são visualizados por meio de gráficos, tabelas ou modelos representados por escalas de cores de contorno. O critério de falha utilizado na avaliação das tensões na matriz durante o corte será o critério de Von Mises, conforme abordado no capítulo 2.7.4.1.

Com base nos resultados apresentados no pós-processamento, as variáveis de projeto como, folga de corte, ângulo de corte, variação da folga de passagem entre a matriz e o perfil e espessura da matriz, são ajustadas de modo a melhorar o projeto das matrizes de corte e então, a análise é realizada novamente de forma iterativa, de modo a obter um projeto de matrizes de corte com o coeficiente de segurança satisfatório.

A figura 23 apresenta o fluxograma do processo de simulação proposto, onde podem ser visualizadas as etapas que foram executadas para a obtenção do projeto das matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis de aço.

Figura 23 – Fluxograma da Simulação CAD/CAE

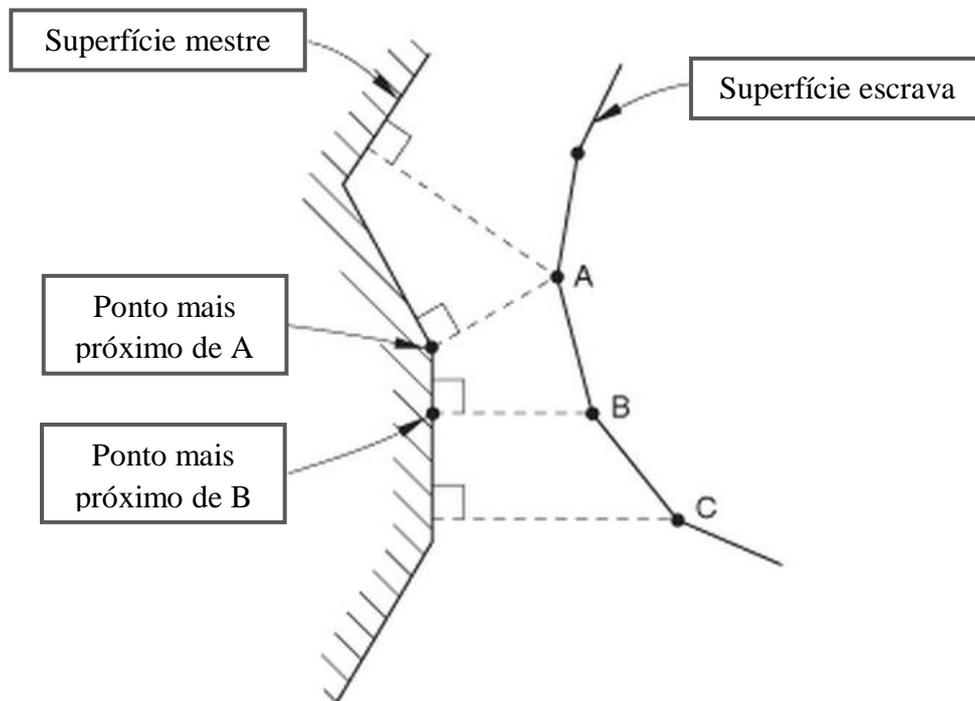


3.1.1 Contato entre superfícies

A forma em que os componentes interagem entre si durante a simulação, é definido pelas superfícies de contato. Dessa forma, é preciso definir uma superfície escrava e outra superfície mestre, as quais interagem entre si durante a análise.

Segundo o manual do Abaqus (2012), cada nó da superfície escrava interage com o ponto mais próximo da superfície mestra do par de contatos, conforme figura 24. Durante a simulação, os nós escravos não penetram na superfície mestra, porém a superfície mestra pode eventualmente penetrar na superfície escrava.

Figura 24 – Discretização do contato e interação entre superfícies

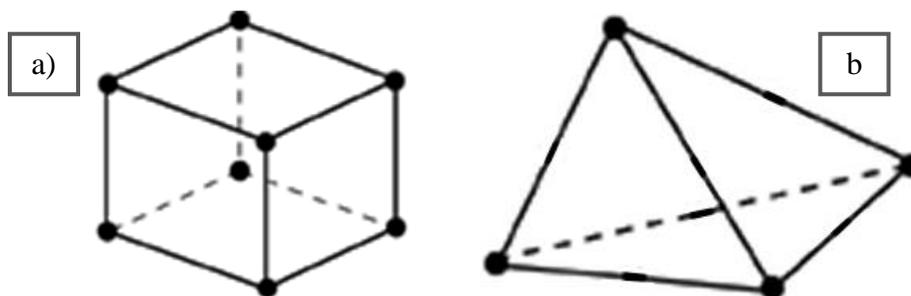


Fonte: Adaptado de Abaqus, 2012.

3.1.2 Tipo de elementos

No caso da simulação deste estudo, a malha dos elementos avaliados foi composta por elementos estruturais contínuos sólidos, lineares de oito nós com integração reduzida (C3D8R) e de quatro nós (C3D4), conforme ilustrado na figura 25. Tendo em vista que a análise está focada na avaliação das matrizes, não utilizou-se a malha adaptativa durante a simulação do processo de corte.

Figura 25 – Elemento linear C3D8R (a) e C3D4 (b)



Fonte: Adaptado de Abaqus, 2012.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE AÇO

O estudo foi baseado no projeto das matrizes de corte para o corte de um perfil de aço do tipo sigma (assim chamado pela semelhança com a letra grega sigma [Σ]). Os perfis de aço do tipo sigma possuem diversas aplicações, destacando-se a aplicação na construção civil e em sistemas de armazenagem industriais e comerciais, conforme figura 26.

Figura 26 – Aplicação do perfil sigma

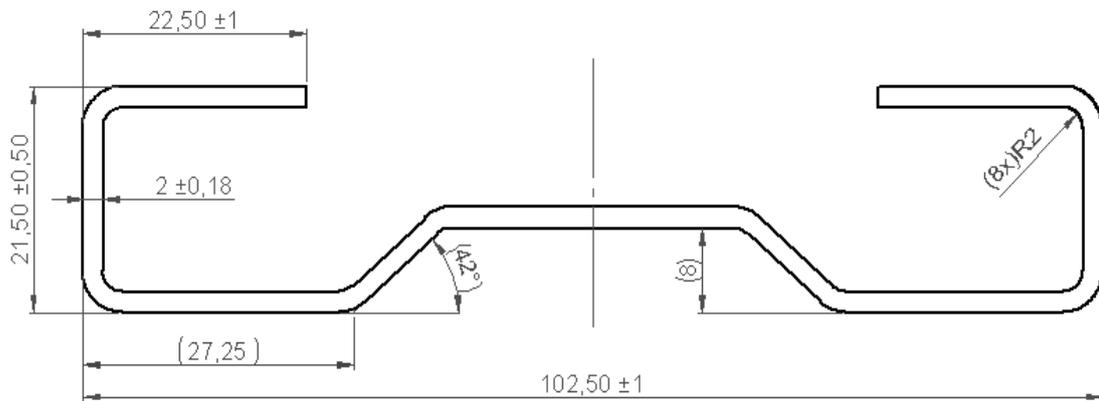


Fonte: Adaptado de Frisomat, 2012.

3.2.1 Dimensões do perfil sigma

As dimensões da seção transversal do perfil sigma, assim como as suas tolerâncias para uso no projeto das matrizes de corte, são apresentadas na figura 27.

Figura 27 – Medidas e tolerâncias do perfil sigma



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

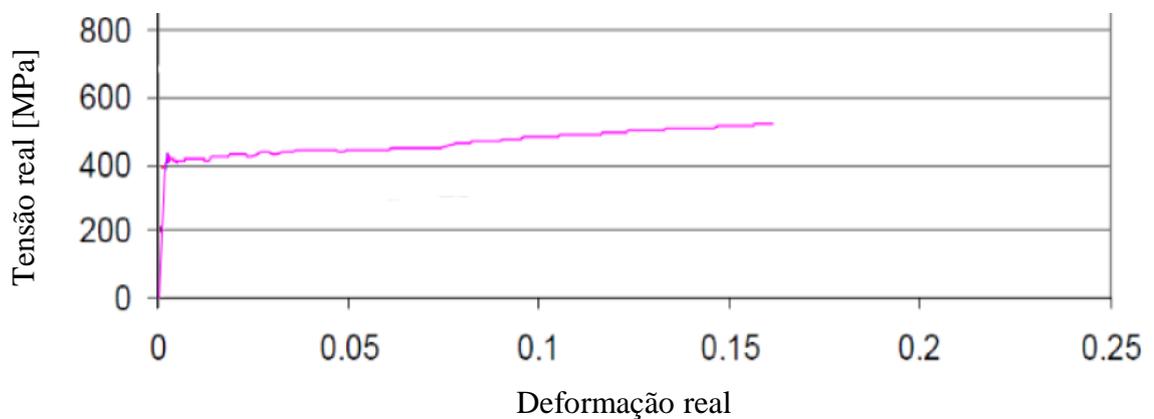
3.2.2 Matéria-prima do perfil sigma

A matéria prima aplicada na construção do perfil sigma é oriunda de uma bobina de aço do tipo laminada a frio, produzida pela Usina SSAB, de nome comercial Docol 350YP com as seguintes propriedades mecânicas:

- Limite de escoamento min: 350 MPa;
- Limite de resistência min: 410 MPa;
- Alongamento min: 22%.

A curva tensão x deformação real para o aço Docol 350YP é dada na figura 28.

Figura 28 – curva tensão x deformação real para o aço Docol 350YP



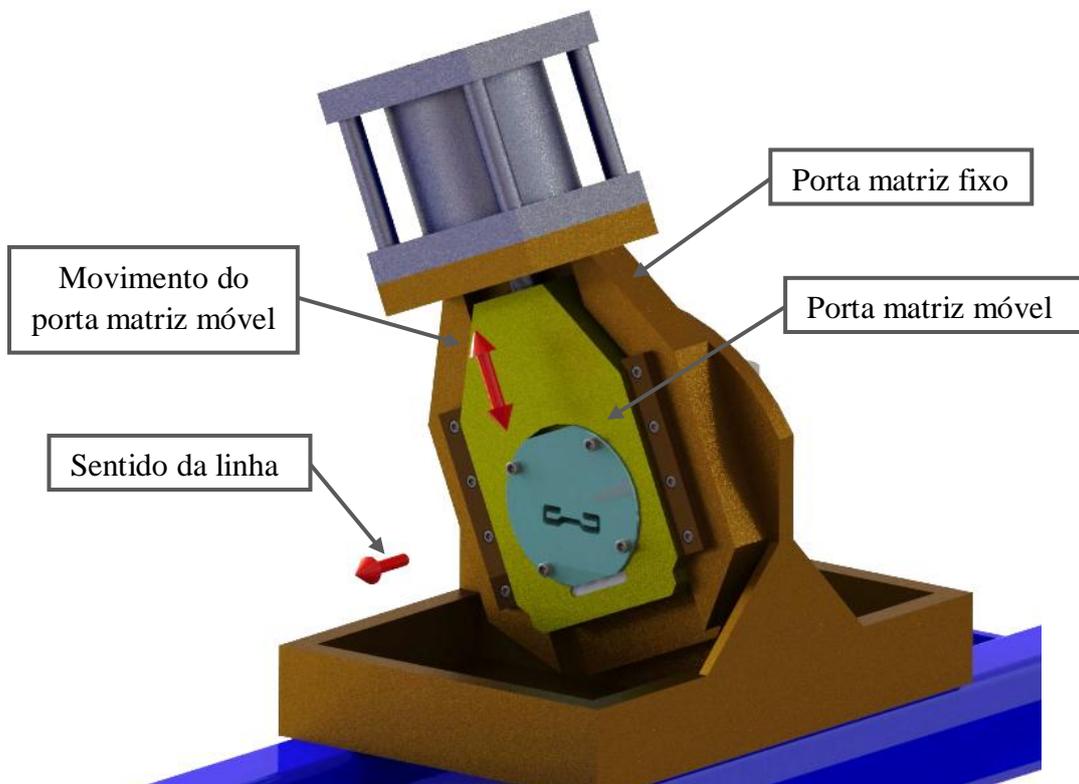
Fonte: Adaptado de Söderberg (2006)

3.3 PRENSA DE CORTE

A prensa de corte é tradicionalmente instalada sobre um carro de corte automatizado (figura 9), que tem por função igualar a velocidade da prensa de corte à velocidade da perfiladeira, e então permitir a ação das matrizes de corte sobre o perfil.

A prensa de corte utilizada para o acionamento das matrizes de corte é do tipo hidráulica, possui um porta matriz fixo e um porta matriz móvel conforme poder ser visualizado na vista em corte da figura 29.

Figura 29 – Prensa de corte



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

As características técnicas da prensa de corte são:

- pressão da unidade hidráulica: 18 MPa (180 bar);
- diâmetro da camisa do cilindro hidráulico: 200 mm;
- diâmetro da haste do cilindro hidráulico: 90 mm;
- curso do cilindro hidráulico: 20 mm;
- vazão da bomba hidráulica: 32 l/min.

3.4 VARIÁVEIS DO PROJETO

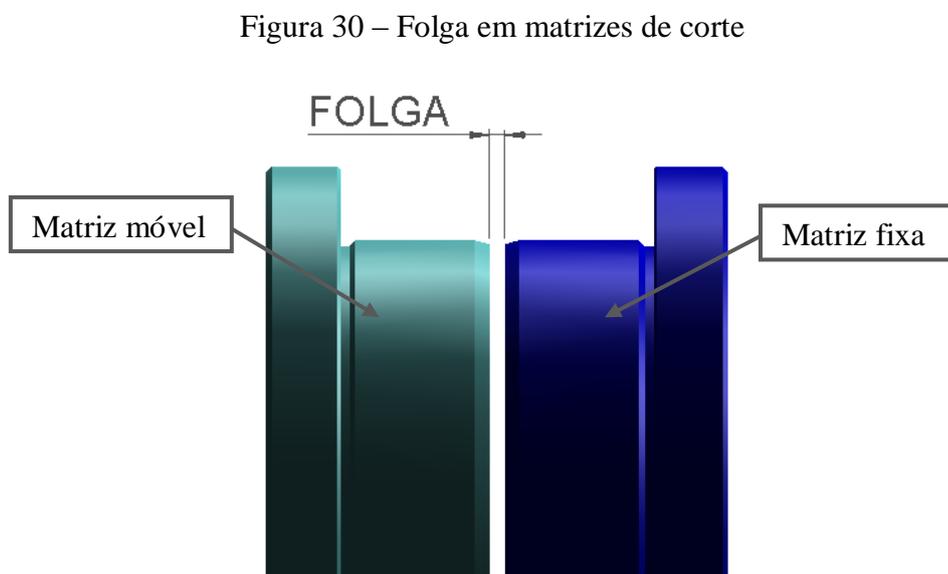
Durante o projeto das matrizes de corte, as seguintes variáveis foram consideradas:

- a) folga de corte;
- b) ângulo de corte;
- c) variação da folga de passagem entre a matriz e o perfil;
- d) espessura da matriz;
- e) propriedades mecânicas do material das matrizes.

A especificação adequada dessas variáveis é um passo importante para obter um projeto adequado para o corte do perfil sigma.

3.4.1 Folga de corte

A folga de corte é a distância entre as faces da matriz móvel e a matriz fixa, conforme ilustrado na figura 30.



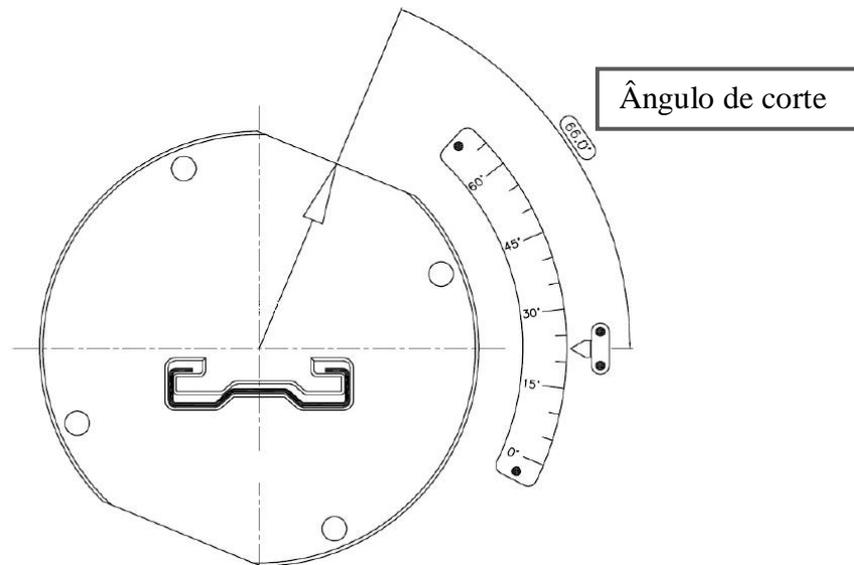
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

Para o projeto das matrizes de corte, utilizam-se os dados fornecidos pela tabela 2, onde a folga de corte para o aço macio é de 9% da espessura nominal do material, ou seja, a folga de projeto é de 0,18 mm.

3.4.2 Ângulo de corte

O ângulo de corte é caracterizado pelo ângulo de deslocamento da matriz móvel durante a operação de corte, conforme ilustrado na figura 31.

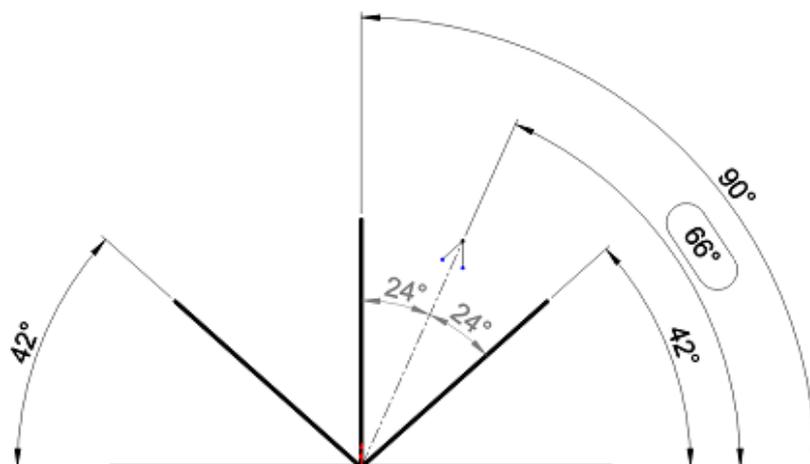
Figura 31 – Ângulo de corte



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

A alteração do ângulo de corte influencia diretamente no carregamento resultante em cada elemento da matriz de corte. De forma geral, para o projeto das matrizes de corte, escolhe-se um ângulo intermediário dentre os ângulos formados pelos elementos do perfil. Assim, dentre os ângulos presentes no perfil sigma, escolheu-se o ângulo de 66° para início do projeto, conforme pode ser visualizado na figura 32.

Figura 32 – Ângulos presentes no perfil sigma



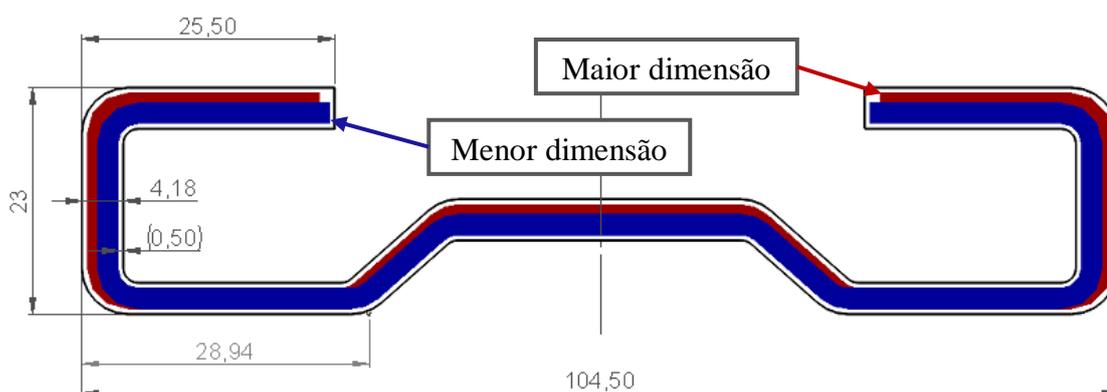
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

3.4.3 Variação da folga de passagem entre o perfil e a matriz

Aumentar a folga de passagem entre o perfil e a matriz, mesmo que seja em algumas determinadas regiões, pode ser a solução para diminuir as tensões durante a operação de corte. Por outro lado, grandes variações de folga de passagem podem resultar em distorções dimensionais na região do corte, o que em geral não se torna um grande problema, uma vez que, para os perfis de aço que são fabricados de acordo com a NBR 6355, devem ter suas tolerâncias verificadas em qualquer seção transversal do perfil, distante no mínimo 100 mm das extremidades.

Para o projeto das matrizes de corte aplicado ao corte de perfis de aço, o requisito dimensional é que haja uma folga superior às tolerâncias máximas e mínimas admitidas na fabricação do perfil de aço, de modo a antever a ocorrência de riscos superficiais e deformações na geometria do perfil. Outras variações admitidas pelo processo de perfilação devem ser consideradas ao se especificar a folga de passagem mínima nas matrizes, como possíveis desvios de flecha e torção do perfil. As dimensões mínimas necessárias no projeto da matriz de corte são apresentadas na figura 33, na qual foi utilizada uma folga de passagem adicional de 0,5 mm.

Figura 33 – Folga passagem mínima



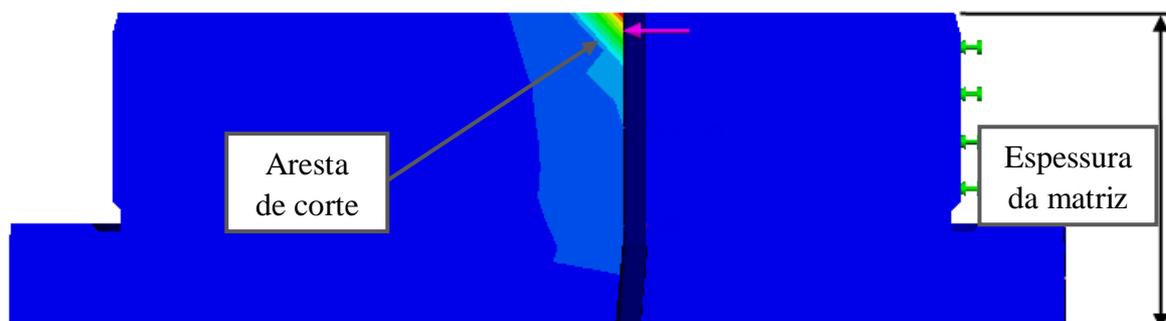
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

3.4.4 Espessura da matriz

A espessura da matriz, se subdimensionada, pode não ser suficiente para suportar as tensões aplicadas durante a operação de corte. Para o projeto das matrizes de corte para o perfil sigma, será usado uma espessura de matriz de 75 mm, dimensão mínima necessária para

um perfeito acoplamento entre matriz e porta matriz. A figura 34 demonstra a influência da espessura da matriz na distribuição de tensão sofrida pela aresta de corte.

Figura 34 – Espessura da matriz



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2012.

3.4.5 Propriedades mecânicas das matrizes

O material aplicado na construção das matrizes de corte foi aço AISI D2 (DIN 1.2379), com tratamento térmico de têmpera e triplo revenimento, atingindo dureza de 58 a 60 HRC, combinando boas propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade. As propriedades mecânicas são informadas na tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do Aço AISI D2.

Densidade ¹	7700 kg/m ³
Modulo de Elasticidade ¹	210 GPa
Resistência à compressão ¹	2150 MPa
Resistência ao escoamento ²	1532 MPa
Resistência a tração ²	1736 MPa

Fonte: Adaptado de Uddeholms AB¹ 2013, e GUU² 2004.

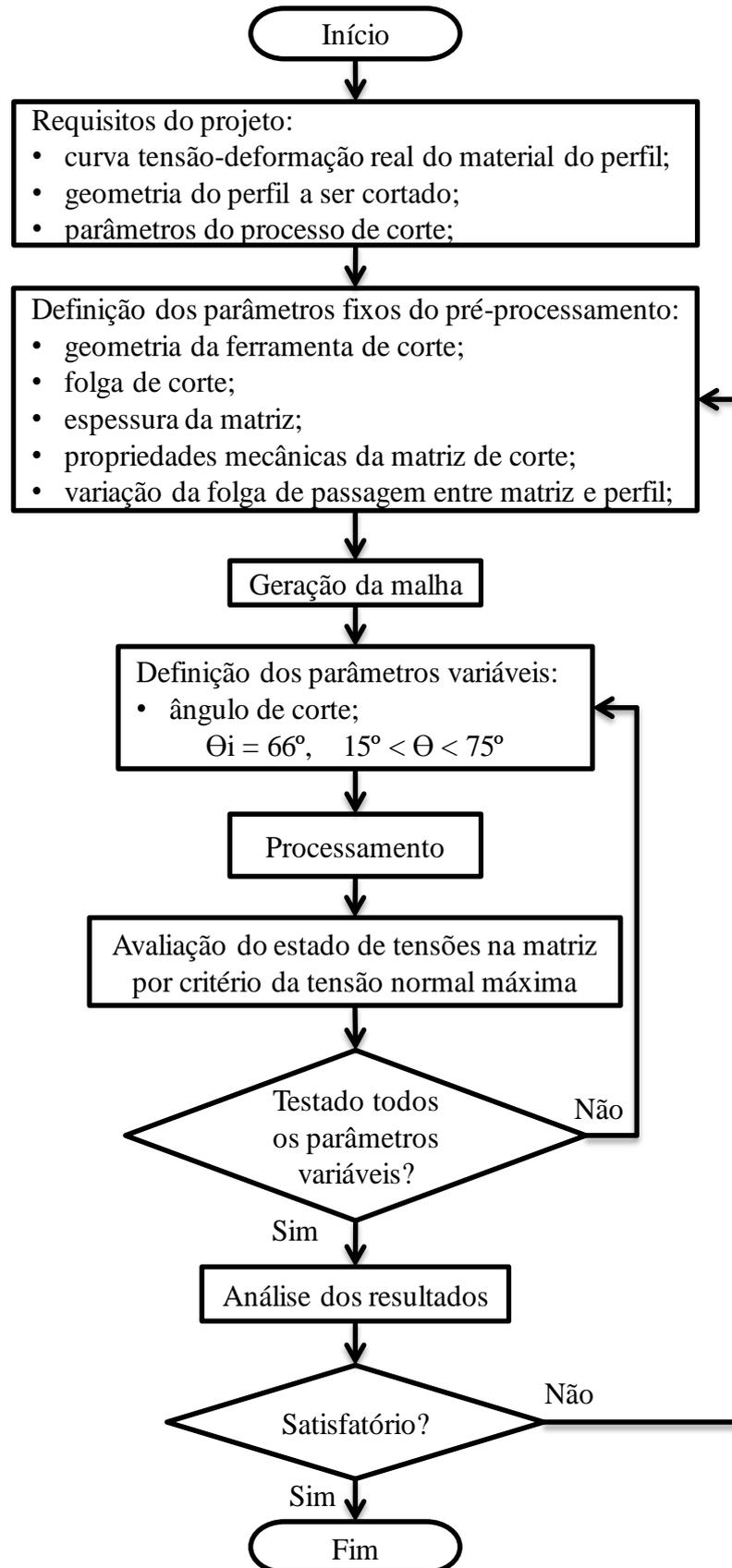
3.4.6 Plano de trabalho

A solução do problema proposto foi desenvolvida de modo iterativo, onde os parâmetros do projeto das matrizes de corte foram ajustados de modo a obter o resultado satisfatório, conforme ilustrado na figura 35.

¹ Dados para a dureza de 60 HRC, obtidos de Uddeholms AB 2013.

² Dados para a dureza de 57 HRC, obtidos de GUU 2004.

Figura 35 – Fluxograma do projeto.



4 RESULTADOS

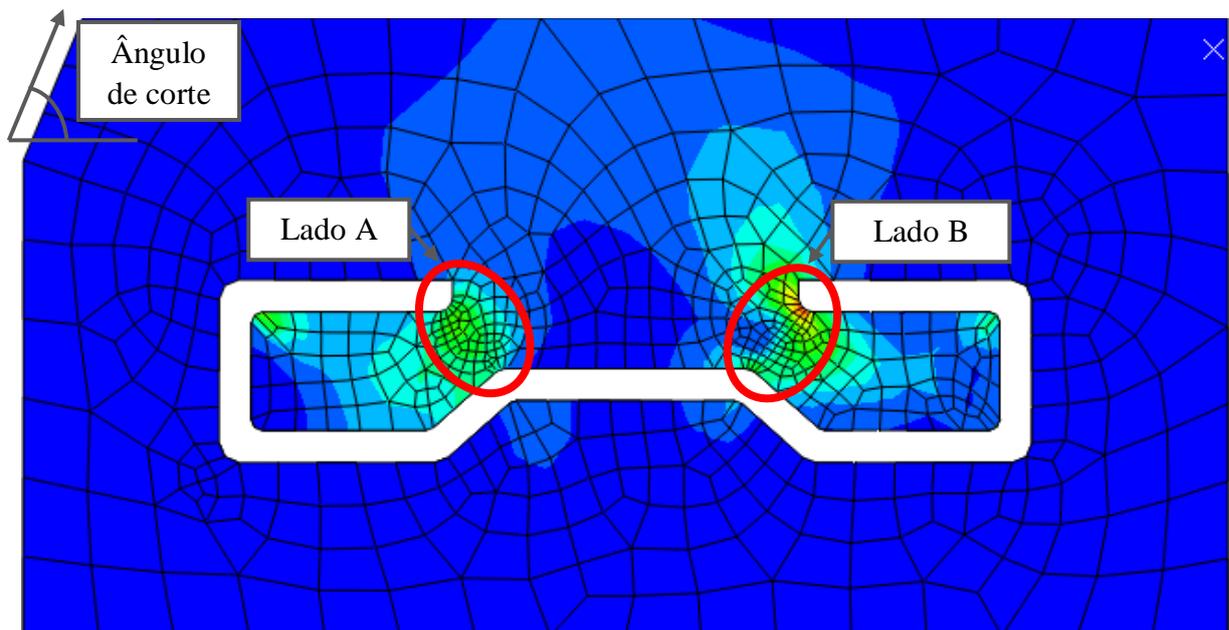
As simulações de corte pelo método de elementos finitos foram realizadas consecutivamente nos ângulos de 75°, 66°, 60°, 50°, 40°, 30° e 15°, sendo que 66° era o ângulo originalmente escolhido no projeto.

A análise de tensão foi restrita apenas à matriz móvel, em função da simetria de construção entre esta e a matriz fixa. Para as simulações, a matriz fixa foi considerada rígida de modo a acelerar o tempo de processamento computacional.

A malha da matriz móvel foi refinada na região crítica (lados A e B), assim como a malha do perfil na região do corte também foi refinada para aprimorar os resultados obtidos.

Realizou-se a análise de resultados de tensão normal máxima nas duas regiões de tensão crítica da matriz, conforme ilustrado na figura 36.

Figura 36 – Regiões de tensão crítica.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

A tensão normal máxima coletada para cada lado da matriz e em cada ângulo simulado é apresentada na tabela 6. Os valores apresentados foram coletados em elementos que representam a maior tensão na região crítica no intervalo de tempo em que ocorria o corte do perfil.

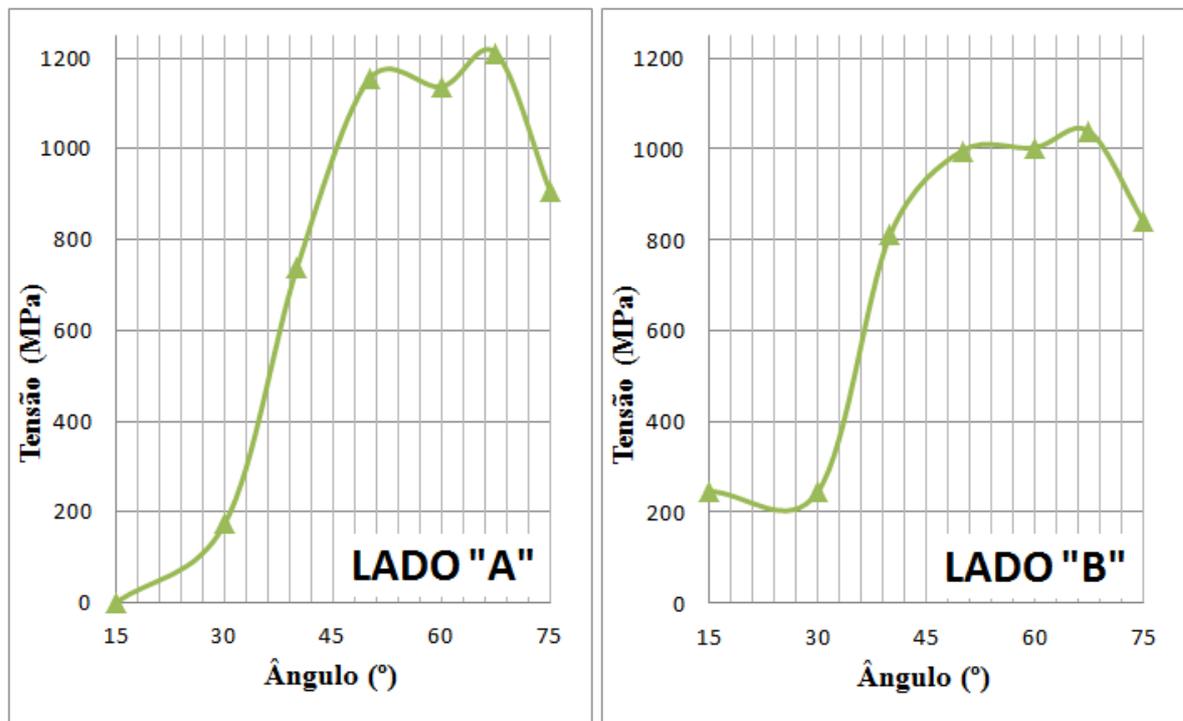
Tabela 6 – Valores de tensão normal máxima para diferentes ângulos de corte.

Ângulo de corte (graus)	Tensão no lado "A" (MPa)	Tensão no lado "B" (MPa)
75	906	842
66	1.211	1.039
60	1.137	1.003
50	1.154	996
40	739	810
30	175	245
15	1,3	246

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

Pode-se observar a progressão das tensões na região crítica em relação a cada ângulo de corte na figura 37, por meio dos valores da tabela 6 e as curvas de tendência.

Figura 37 – Progressão das tensões nas regiões críticas da matriz de corte.

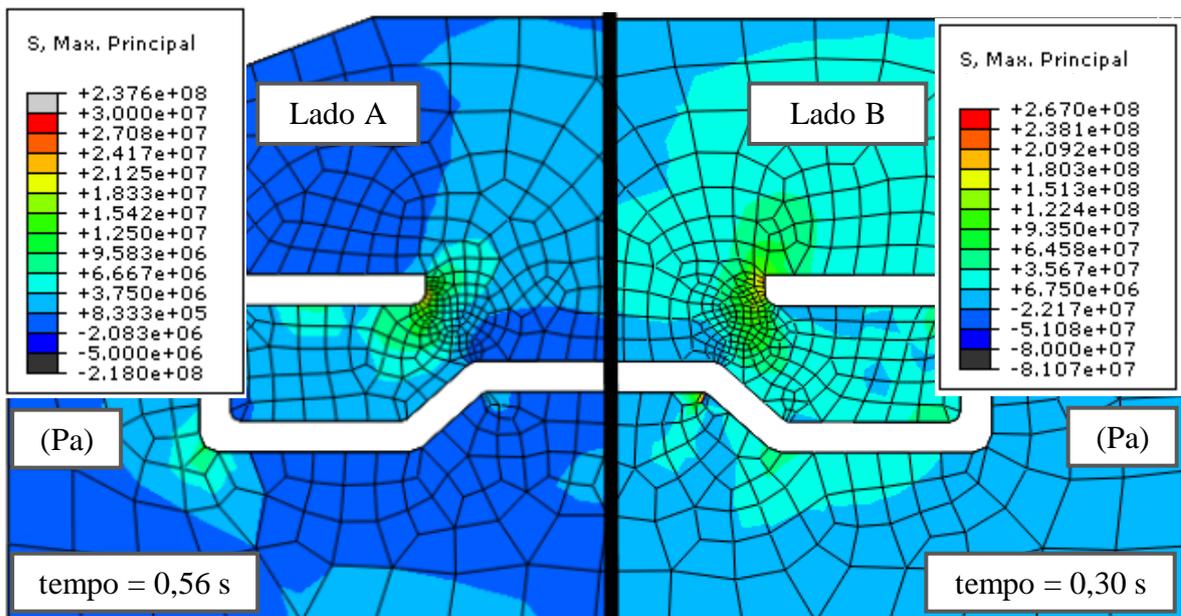


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

Durante a análise de tensões, observa-se que no ângulo de 66°, utilizado no projeto original, o valor de tensão crítica encontrado foi de 1211 MPa, muito próximo ao limite de escoamento a tração de 1532 MPa. A análise mostrou que, se fosse utilizado um ângulo de corte entre 15° a 40°, os valores de tensão cairiam consideravelmente, obtendo então, uma matriz resistente à fratura na região crítica.

Considerando os ângulos existentes no perfil sigma apresentados na figura 32, o novo ângulo preferencial³ que provoca a menor deformação nas entidades do perfil, está entre 0 e 42°, logo escolheu-se o ângulo de 21° como novo ângulo de projeto da matriz de corte móvel. Uma nova simulação de corte foi realizada para este ângulo, e os valores de tensão encontrados foram de 27 MPa para o lado A e de 229 MPa para o lado B. Esses valores de tensão são bem inferiores ao limite de escoamento à tração da matriz de 1532 MPa. A figura 38 ilustra a concentração de tensão máxima em cada região crítica na simulação com ângulo de corte de 21°.

Figura 38 – Estado de tensões da matriz móvel no ângulo de 21°.



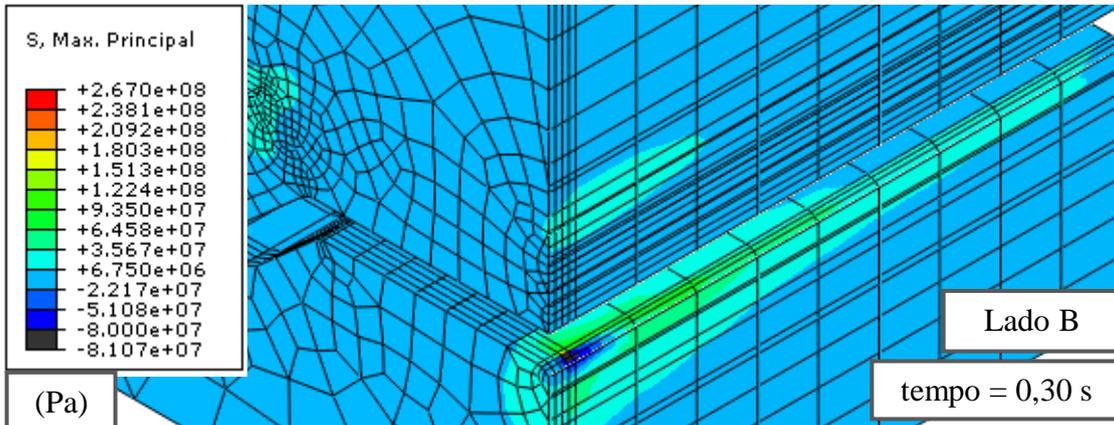
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

Considerando a velocidade de corte de 20 mm/s, a distribuição de tensão no instante 0,30 segundos também foi avaliada ao longo da matriz móvel, no intuito de verificar a neces-

³ Durante a escolha do ângulo preferencial, deve ser evitado que o ângulo seja coincidente com alguma entidade do perfil, de modo que este novo ângulo seja um ângulo que se afaste o máximo possível de ser coincidente com alguma entidade plana do perfil. Isto evita grandes distorções dimensionais no perfil.

sidade de aumento na espessura da matriz de corte conforme ilustrado na vista em corte da figura 39. Como a tensão cai consideravelmente na face oposta da aresta de corte, não há a necessidade de aumento da espessura da matriz de corte.

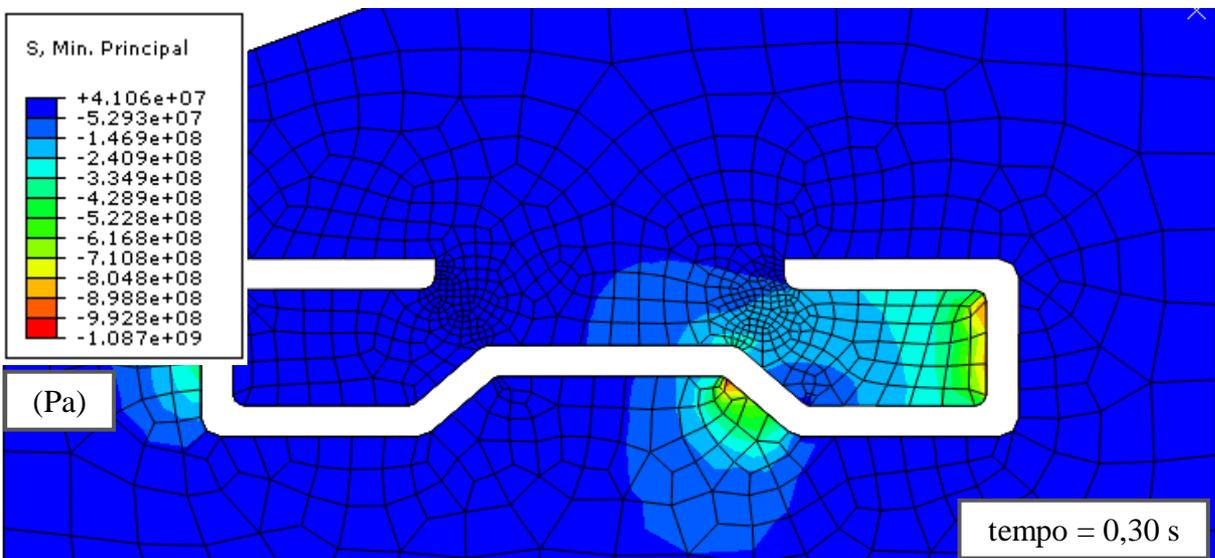
Figura 39 – Propagação da tensão na matriz móvel.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

Durante o processo de corte, as arestas da matriz em contato com o perfil sofrem tensão de compressão de até 1390 MPa, que mesmo sendo inferior ao limite de resistência a compressão da matriz de corte de 2150 MPa, esta tensão poderia ocasionar o desprendimento de partes da aresta de corte (lascamento ou desgaste prematuro). Na simulação do corte do perfil a 21°, observa-se a presença de tensão compressiva nas arestas de corte, como se pode observar na figura 39.

Figura 40 – tensões compressivas na matriz móvel no ângulo de 21°.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2013.

O desgaste prematuro da aresta de corte com possíveis micro-lascamentos, podem ser evitados aplicando um tratamento térmico de nitretação. Segundo Uddeholms AB (2013), a dureza superficial pode atingir 1.250 HV, valor superior aos 697 HV obtidos após o tratamento térmico de tempera e triplo revenimento no aço AISI D2.

Mendanha *et al.* (2008), acrescenta que o aço AISI D2 possui elevado teor de carbono e elementos de liga e possui restrições ao uso de endurecimento por difusão como a nitretação. Os processos tradicionais de nitretação gasosa ou em banho de sal conduzem à formação de uma superfície nitretada de elevada fragilidade, pela formação da camada branca e de nitretos intergranulares. Como solução, o autor indica a nitretação a plasma como alternativa para os processos de nitretação convencionais, pois neste processo é possível controlar o potencial de nitrogênio na atmosfera nitretante, e com isto, obter uma superfície constituída apenas pela zona de difusão, isenta de fases fragilizantes.

5. CONCLUSÃO

As conclusões deste trabalho são apresentadas tendo em vistas o atendimento dos objetivos geral e específicos determinados.

O presente trabalho demonstrou que é possível realizar o corte do perfil de aço tipo sigma utilizando o sistema de corte por cisalhamento, por meio da alteração do ângulo de corte da matriz móvel.

Os sistemas de corte foram caracterizados e comparados de forma a possibilitar ao projetista a escolha da melhor alternativa para o processo de corte. Além disso, a fundamentação teórica que relaciona os parâmetros de corte, foi abordada neste trabalho, e consequentemente, aplicada como critérios do pré-processamento para a simulação de corte no modelo de elementos finitos. Junto aos parâmetros do pré-processamento, foram abordados os critérios tradicionalmente aplicáveis no projeto de matrizes de corte de perfis por cisalhamento. De posse desses parâmetros, o processamento dos dados foi realizado simulando diferentes ângulos de corte e, por fim, realizou-se a análise de tensões obtida no processamento. A análise das tensões na matriz demonstrou que um ângulo de corte de 21° reduz consideravelmente a presença de tensões nas regiões críticas da matriz de corte móvel, onde a maior tensão crítica foi de 229 MPa, valor inferior ao limite de escoamento a tração da matriz de 1532 MPa. Uma hipótese para a redução de tensões tratativas devida à alteração do ângulo de corte pode ser a redução do efeito de flexão gerado sobre a região crítica da matriz.

Uma análise complementar relacionada à fadiga pode vir a ser aplicado em um trabalho futuro como um critério para observar o comportamento da matriz após um determinado número de ciclos de corte.

As arestas de corte da matriz sofrem forte tensão compressiva de até 1390 MPa, a qual mesmo sendo inferior ao limite de resistência a compressão da matriz de 2150 MPa, pode provocar o desgaste prematuro da aresta de corte. Tal situação pode ser melhorada com a utilização de um tratamento térmico de nitretação a plasma sem a presença de camada branca, que aumenta a dureza superficial da aresta de corte.

Os projetos de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis de aço caracterizam-se como projetos críticos, por se tratarem de projetos exclusivos para cada geometria de perfil que se deseja cortar. A aplicação dos conceitos apresentados pode aumentar consideravelmente a probabilidade de êxito do processo de corte, uma vez que fraturas catastróficas podem ser identificadas ainda na fase de projeto, permitindo ao projetista a alteração dos parâmetros do projeto, evitando assim, danos indesejáveis como perdas financeiras ou atrasos no processo produtivo.

GLOSSÁRIO

Blank: chapa de aço a ser conformada. Tamanho de material pré-definido para a fabricação de algum componente.

Setup: conjunto de tarefas necessárias e relativas às atividades de preparação de um equipamento.

Software: conjunto de programas, métodos e procedimentos, regras e documentação relacionados com o funcionamento e manejo de um sistema de dados.

Standard : modelo padrão pelo qual são normalmente executados ou obtidos os resultados de uma tarefa.

REFERÊNCIAS

ABAQUS v6.10, **User's Manual**, Version 6.10. Disponível em: < <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/index.html> >. Acesso em 25 de setembro de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: perfis estruturais de aço formados a frio: padronização. Rio de Janeiro, 2003.

BATHE, Klaus Jurgen. **Finite Elements Procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BUI, Q.V.; PONTHOT, J.P. Numerical simulation of cold roll-forming processes. **Journal of Materials Processing Technology**. v.202, p. 275-282, 2008.

CAMASI, **Ferramental de corte e estampo**. Disponível em: <<http://camasi.com.br/corte.html>>. Acesso em 26 de agosto de 2012.

CAVERSAN, Elpidio Gilson; JUNIOR, Ivar Benazzi. **TECNOLOGIA DE ESTAMPAGEM 1: Corte**. Sorocaba: Fatec Sorocaba, 2012. 82 p.

DREISTERN. GmbH & Co. KG, **Fast cutting machines**. Catálogo de máquinas para corte de perfil. Disponível em: <http://www.dreistern.com/fileadmin/user_upload/documents/downloads/press/e/Dreistern_Prospekt_TK_engl_Web_28_2_12.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2012.

FIORENTINI MÁQUINAS PERFILADORAS. **Estações de corte**. Disponível em: <<http://www.fiorentini.com.br/projetos/Estacoesdecorte/>>. Acesso em: 09 set. 2012.

FRISOMAT (Org.). **Innovators in steel buildings**. Disponível em: <<http://www.frisomat.pt/pt/Produtos/Home.aspx>>. Acesso em: 13 out. 2012.

GGD METALS (São Paulo) (Org.). **Aços Ferramenta**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/cat/CatFerramenta.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2012.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

GUU, Y.H. **AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM**. Department of Mechanical Engineering, National United University, Elsevier, Lien Da, Kung-Ching Li, Miaoli 360, Taiwan, 2004.

HALMOS, George T. **Roll Forming Handbook**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

HELLBORG, S. **Finite Element Simulation of Roll Forming**. 2007. 81 f. Thesis (Master Thesis carried out at Solid Mechanics) – Linköping University. Linköping, 2007.

HOSFORD, William F.; CADDELL, Robert M.. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

KENT CORPOTARION (Ohio, EUA). **Sistema de corte voador**. Disponível em: <<http://www.kenttesgo.com/mtm-tube-mills/flying-cut-off-machines.html>>. Acesso em: 05 set. 2012.

LOGAN, Daryl L.. **A First Course in the Finite Element Method**. 4. ed. Toronto: Thomson, 2007.

MARCONDES, Paulo Victor Prestes. **Manufatura de chapas metálicas: corte**. Disponível em: <<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM262-TM132/Artigos/>>, 2009. Acesso em: 02 set. 2012.

MENDANHA, Adriano et al. **Principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2**. 6º Seminário da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – ABM. São Paulo, 2008. 20 p.

MORAIS, Willy Ank de; BORGES, Herbert Christian. ADEQUAÇÕES NAS PRÁTICAS DOS NOVOS PROCESSOS DE CORTE E DOBRA PARA OTIMIZAR O DESEMPENHO DE AÇOS PLANOS. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 7, n. , p.54-60, jul. 2010. Semestral. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/1625364.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2012.

NEUENKAMP. **Shearing on Slitting – Lines with circular Knives**. Catálogo técnico do fabricante de facas rotativas NEUENKAMP – DIENES GROUP. Remscheid: Neuenkamp GmbH, 2008.

RAO, Singerisu S.. **The Finite Element Method in Engineering**. 4. ed. Miami: Elsevier Science & Technology Books, 2004

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**: 3. ed. Mc Graw Hill: Texas, 2006.

ROSSI, Mario. **Estampado en frío de la chapa**: Estampas, Matrices, Punzones, Prensas y Máquinas. 9. ed. Madri: Dossat, 1979.

SANTOS, A. C.; MOURA, M. E.; SAPPACK, S. Conheça o processo de corte. **Siderurgia Brasil**, Grips Editora, 49.ed, Dez. 2008.

SCHAEFFER, Lírio; BOFF, Uilian. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de corte. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. , p.82-90, out. 2011. Mensal.

SCHULER GmbH. **Metal Forming Handbook**. Göppingen: Springer, 1998. 563 p.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7.ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2005.

SILVA, E. L.; SILVA V. P. E. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2008

SILVEIRA, Fabricio Dreher; SCHAEFFER, Lirio. **Diretrizes para projeto de ferramenta de estampagem**: Parte II. Porto Alegre: Ldtm, 2008. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/2008.html>>. Acesso em: 13 set. 2012

SÖDERBERG Magnus., **Finite Element Simulation of Punching**, (Dissertação de mestrado), Universidade Tecnológica de Luleå, 2006.

TALLYRAND on-line: Cut Offs. Disponível em: <www.tallyrand.com/Systems.html>. Acesso em: 09 set. 2012.

TOLOUI, Mostafa; FIROOZABADI, Bahar; SAIDI, Mohammad Said. **A numerical study of the effects of blood rheology and vessel deformability on the hemodynamics of carotid bifurcation**. Tehran: Scientia Iranica, 2011. 8 p.

UDDEHOLMS AB (Suécia). **SVERKER 21**. Disponível em: <http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_sverker_21_english.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2013.

USIMINAS (Org.). **Tiras a Quente**. Disponível em: <http://www.usiminas.com/irj/go/km/docs/prtl_doc/usiminas/pt/AreasDeNegocios/Siderurgia/CatalogoProdutos/CatalogoTirasQuente.pdf>. Acesso em: 19 set. 2012.

WICK, C.; BENEDICT, J. T.; VEILLEUX, R. F. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Forming**. v.2. 4.ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1984.

WILLIAMS, Paul J.. Inline Punching and Cutoff Applications in Roll Forming. **Fabricating e Metalworking**, Cleveland, 1 maio 2005. Mensal.

WOOD, W. G.; PITLER, R. K.; DECKER, R. F.; WALDECK, F. J. **Metals Handbook: Forming and Forging**. v.14. 9.ed. Ohio, USA: ASM International, 1996.

YOSHIDA, Shun. **Seleção de aços, tratamentos térmicos e engenharia de superfícies para ferramentas de conformação de metais**. Congresso de Corte e Conformação, São Paulo, 2001.

YOSHIDA, Shun. **Seleção de aços e tratamentos térmicos para ferramentas de conformação a frio - estamparia**. São Paulo: Brasimet, 2003.

ZIKELI, **Serra voadora para corte de tubos**. Disponível em: <<http://www.zikeli.com.br/serravoadora.html>>. Acesso em 26 de agosto de 2012a.

ZIKELI, **Linha de fabricação**. Disponível em: <http://www.zikeli.com.br/linha_producao.html>. Acesso em 05 de setembro de 2012b.