



NOVOS PROCESSOS DE CORTE DE CHAPAS DE AÇO E CARACTERÍSTICAS DE PRODUTO E PROCESSAMENTO PARA UM DESEMPENHO DIFERENCIADO¹

Willy Ank de Moraes²
Herbert Christian Borges³

Resumo

Processos de dobra e corte são as principais formas de processamento de aços planos, que são os principais produtos da Usiminas-Cubatão. Cada um dos processos de corte e dobra possuem características específicas que podem ser melhor atendidas com uma chapa de aço mais adequada ou simplesmente através de ajustes nestes processos. Neste trabalho estão revisadas condições gerais no que diz respeito à: direção de dobramento; acabamento do corte; chanfragem e ductilidade do material. Estas considerações são de primordial importância para adequar o aço ao seu uso e assim obter sucesso no desenvolvimento e na utilização de aços planos.

Palavras-chave: Corte; Dobra; Aços planos; Adequação de produtos.

NEW PROCESS FOR CUTTING STEEL SHEET AND CHARACTERISTICS OF PRODUCT AND PROCESSING FOR A DIFFERENTIAL PERFORMANCE

Abstract

Bending and cutting are the main way to process flat steels, which are the chief products of Usiminas-Cubatão. Each type of bending and cutting process has specific requirements which can be attendant by an adequacy steel sheet or simply by process adjusting. In this work, it is revised the general conditions related to bending direction, cut finishing, chamfering and ductility. These considerations are essential to adequacy of the steel to this use and, thus, obtain success in their development and use.

Key-words: Cutting; Bending; Flat steels; adequacy of products.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia, Engenheiro de Produto Sênior da USIMINAS de Cubatão, Professor da Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM. E-mail: willyank@unisanta.br ou willy.morais@usiminas.com.

³ Mestrando, Eng^o Metalurgista, Engenheiro de Assistência Técnica Pleno da USIMINAS de Cubatão. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

Processos de corte e dobramento são as operações mais comuns no processamento de produtos laminados planos. Ambos os processos são utilizados para preparar chapas metálicas planas para as etapas posteriores de processamento e montagem de diversos produtos finais. Estes processos apresentam particularidades que podem influenciar nas características do material sendo processado, influenciando ou mesmo mascarando o desempenho do material. As principais características destes processos e suas implicações estão descritas neste trabalho e estão ilustrados alguns exemplos de interferência dos processos de corte e dobra no desempenho dos produtos planos de aço, observados na prática de assistência técnica e análises laboratoriais realizadas pelos autores.

1.1 Mecânica do Dobramento

O dobramento é um processo de conformação mecânica por deformação plástica por tração e compressão simultânea nos lados contrários de um perfil ou chapa. Durante o processo, ocorre uma redução de espessura e alongamento na parte externa das chapas metálicas, conforme mostrado na Figura 1, enquanto na parte interna ocorre compressão e aumento de espessura.

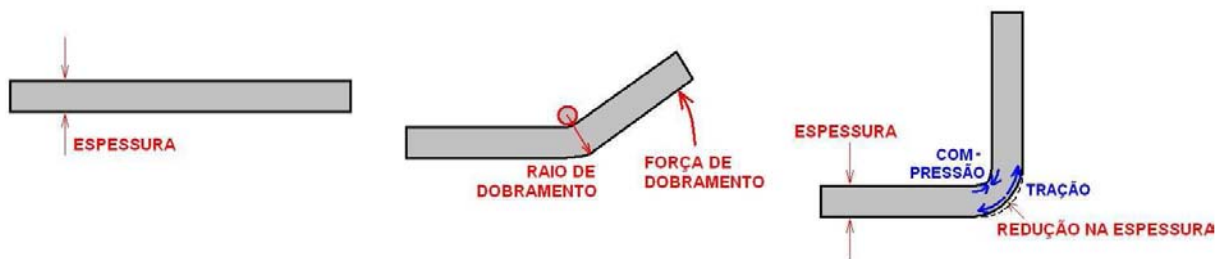


Figura 1 – Características gerais do processo de dobramento..

O alongamento máximo suportável pelas fibras externas é o principal fator que limita a operação. Neste sentido, o valor do raio de dobramento em relação à espessura da peça está diretamente associado com o alongamento que o material irá sofrer ou com a redução na espessura, ilustrada pela Figura 1, que ocorre no dobramento das chapas. Assim a relação entre a espessura da chapa e a deformação que ocorre durante o dobramento torna-se uma característica importante para analisar o desempenho do processo, tal como ilustrado pelos dados experimentais da Figura 2.

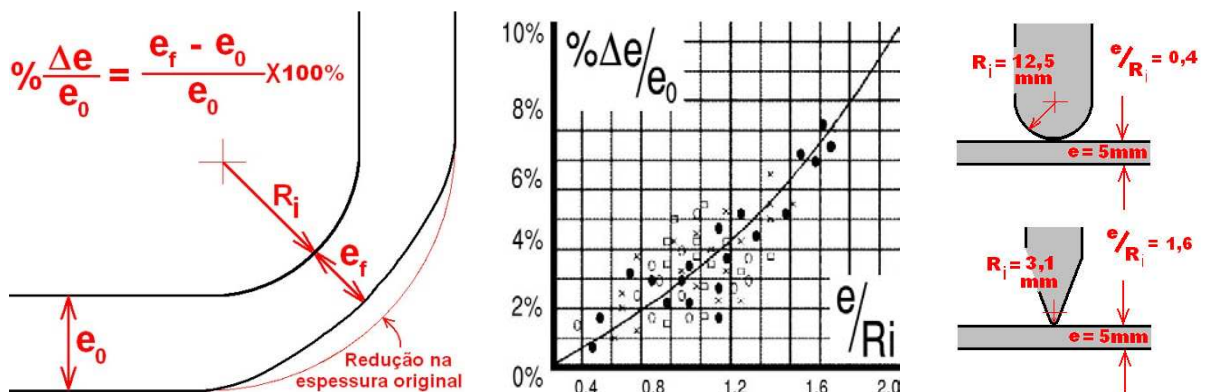


Figura 2 – Relação entre o raio de dobramento interno (R_i) e a redução de espessura ($\Delta e/e_0$) no dobramento de chapas⁽¹⁾: (e/R_i)>1,6 é considerada crítico.

Outros fatores têm influência na operação de dobramento, como a qualidade das bordas cortadas e/ou defeitos internos presentes que podem funcionar como concentradores de tensão. Adicionalmente, o grau de resistência do material deve ser considerado, uma vez que os materiais com maior grau de resistência tendem a apresentar menor ductilidade.^(2,3)

1.2 Tratamentos Térmicos

Os processos de corte que envolvem aquecimento e fusão localizada do material (oxiacetilênico, plasma ou laser) podem alterar a situação microestrutural do aço através de um tratamento térmico não intencional. Quando o aço sofre aquecimento a temperaturas superiores a AC_1 e é resfriado, a microestrutura final será função da taxa de resfriamento e da composição química do material, conforme ilustrado pelos gráficos mostrados na Figura 3.⁽⁴⁾

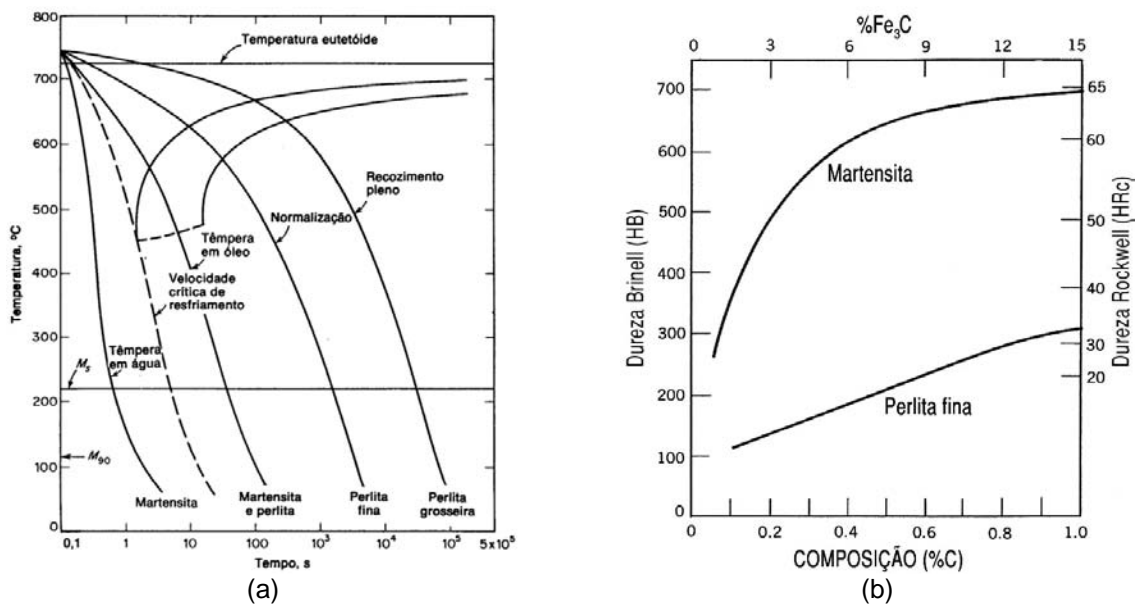


Figura 3 – (a) Variação da microestrutura em função da velocidade de resfriamento de um aço eutetóide. (b) Efeito do teor de C na martensita e na perlita fina sobre a dureza.⁽⁴⁾

Esta microestrutura terá influência no comportamento mecânico, uma vez que as propriedades finais são função da microestrutura e composição química. Sob posterior dobramento a região alterada apresentará outro tipo de comportamento e poderá levar à ocorrência de trincas localizadas, inviabilizando o processo.

1.3 Concentração de Tensão

As operações de corte podem produzir descontinuidades, principalmente rebarbas, na região da bordas que funcionam como concentradores de tensão. A presença de uma descontinuidade, ou entalhe, altera a distribuição das tensões aplicadas no material, como ilustrado na Figura 4, intensificando-a até atingir um máximo exatamente na ponta do defeito. Desta forma, se o componente estrutural possuir uma distribuição de defeitos, deve-se manter o seu tamanho tanto menor quanto for possível, pois a simples presença desta descontinuidade produz:

- elevação das tensões na proximidade da descontinuidade/entalhe;
- introdução de um estado triaxial de tensões, mesmo que o componente tenha sido carregado apenas em tração (estado uniaxial);
- endurecimento localizado com alta possibilidade de trincamento do material; e
- aumento localizado na taxa de deformação.

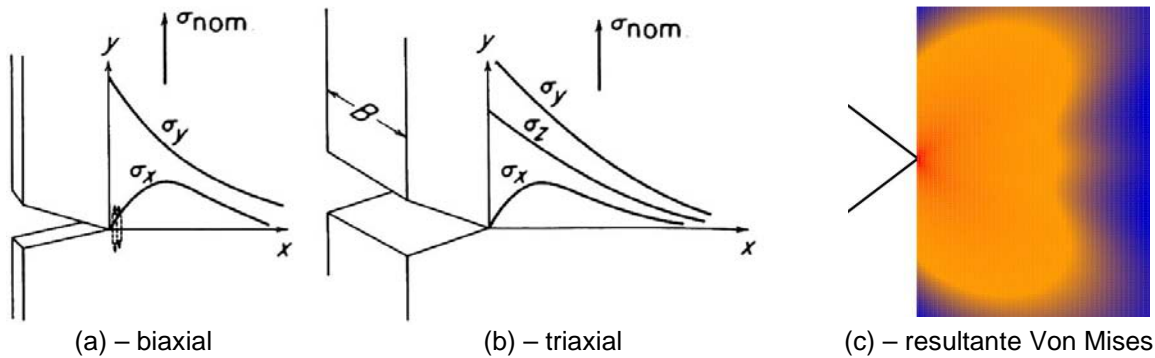


Figura 4 – Distribuição das tensões principais na ponta de um entalhe mecânico em chapas (a) finas e (b) grossas e (c) tensão efetiva de Von Mises.

2 PROCESSOS DE CORTE

2.1 Mecânico (Guilhotina ou Estampo)

Neste processo as chapas são submetidas à ação de pressão exercida por um punção, uma lâmina ou uma navalha de corte. Quando a lâmina inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço cisalhante provocando a separação brusca do material, como mostra a Figura 5. A folga “F” (ou *clearance*) entre as navalhas é um importante parâmetro ao qual está vinculada a longevidade da ferramenta, conforme ilustrado pela Figura 6.a.

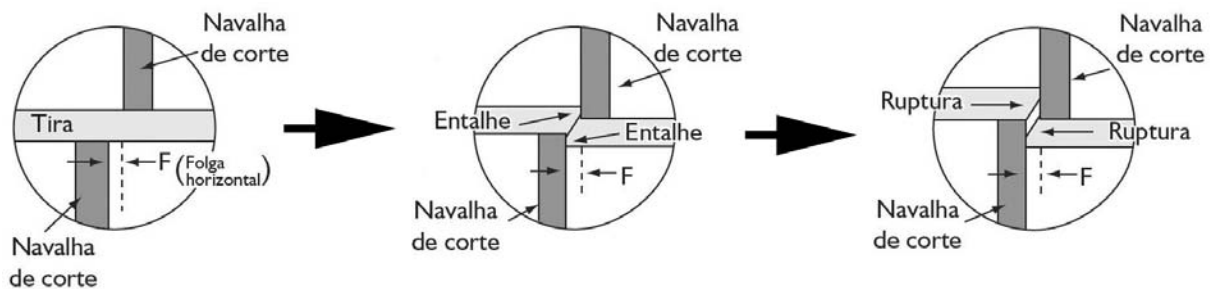


Figura 5 – Esquema genérico de um processo de corte.⁽²⁾

A superfície de uma peça metálica cortada por estampo ou guilhotina normalmente apresenta quatro regiões, conforme ilustradas pela Figura 6:^(5,6)

- uma pequena região de deformação plástica pela compressão da navalha sobre a superfície da chapa (*roll over zone*);
- uma região lisa de cisalhamento, brilhante (*burnish zone* ou *shiny*), na qual a navalha efetivamente penetra no material;
- uma região rugosa, opaca (*matte* ou *fracture zone*) na qual ocorre a ruptura final e assim também conhecida como região de “explosão”; e
- eventualmente uma rebarba de arrancamento final (*burr*).

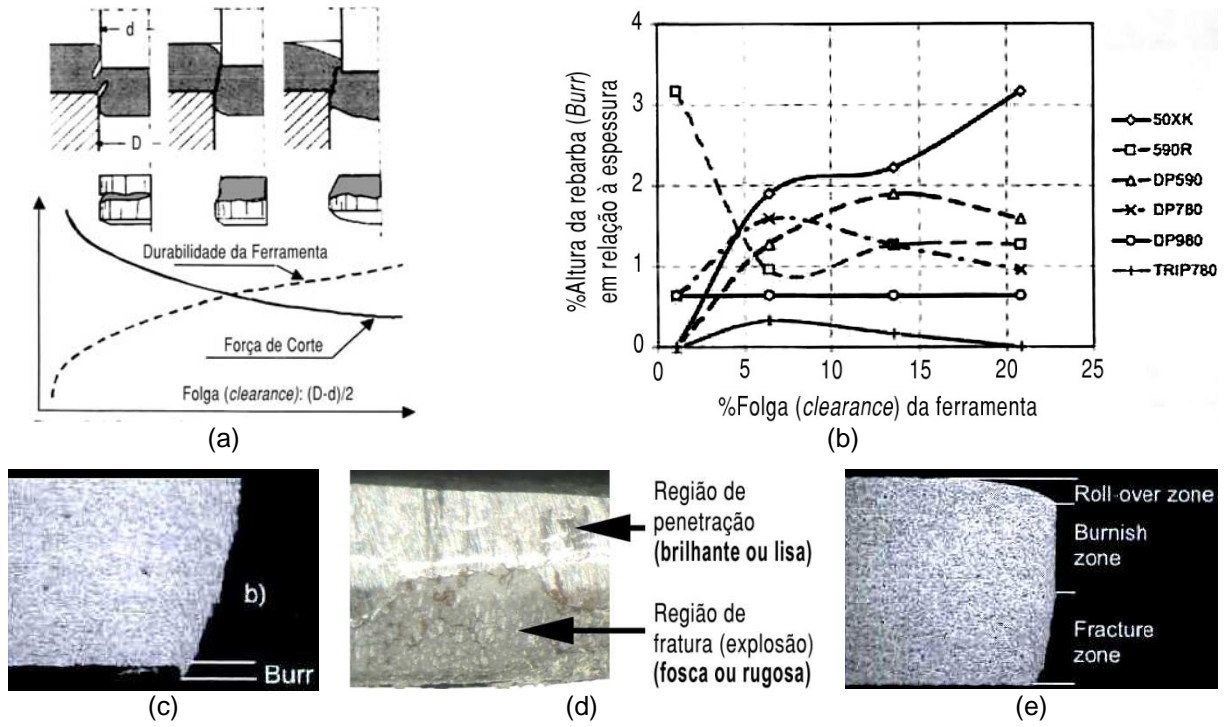


Figura 6 – (a) Relações entre a durabilidade da ferramenta, força de corte com a folga (*clearance*) das ferramentas de corte;⁽⁶⁾ (b) Efeito da folga das ferramentas de corte com (c) a rebarba surgida após o corte (*burr*);⁽⁶⁾ (d) e (e) Superfície típica de uma peça obtida por estampo/guilhotina.^(5,6)

O processo por estampo apresentou uma evolução através da geração de peças por *Fineblanking*. Neste caso a superfície da peça não apresenta regiões rugosas ou rebarbas que possam comprometer a sua aplicação final, conforme ilustrado pela Figura 7. As técnicas de *Fineblanking* ainda são capazes de produzir peças com tolerâncias dimensionais mais apertadas.

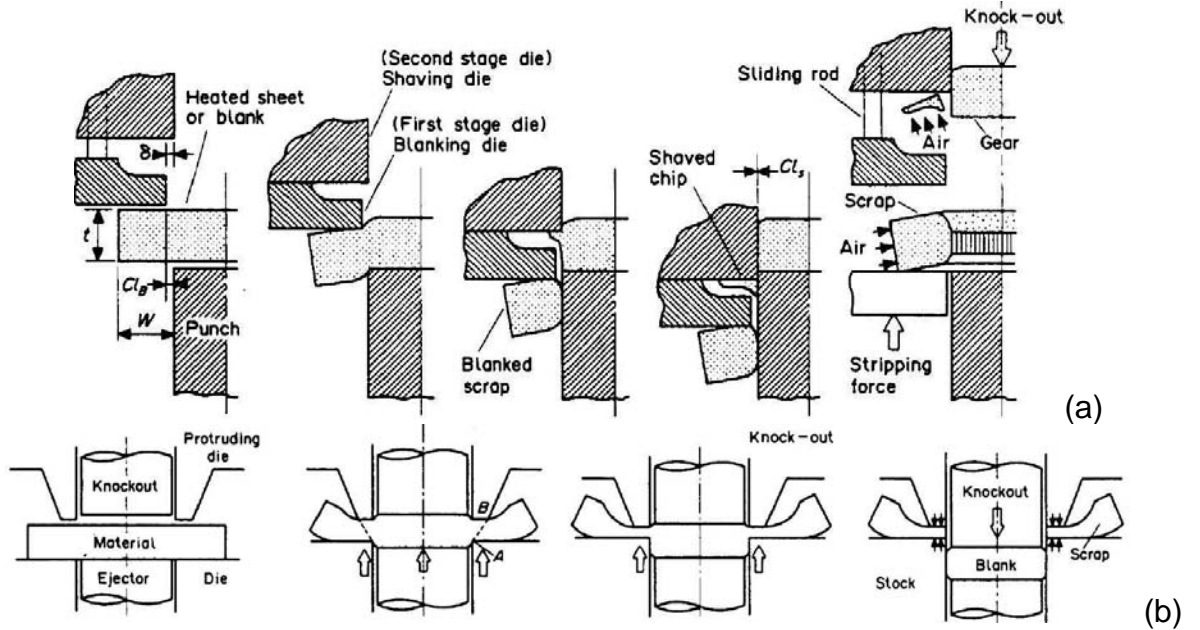


Figura 7 – Dois exemplos de variações no processo de corte por estampo visando melhoria de acabamento superficial de peças cortadas.⁽⁷⁾

2.2 Corte Térmico por Chama (Oxiacetilênico e Plasma)

Entre os processos de corte por chama, atualmente o processo a plasma se destaca, uma vez que vem ganhando espaço no corte de chapas grossas ($e > 5,00$ mm), substituindo o oxicorte, e também no corte de chapas de espessuras menores, substituindo o Laser. O gráfico da Figura 8a ilustra uma relação sugerida⁽⁸⁾ da atuação destas três versões de processos de corte.

O corte a plasma utiliza o calor liberado por uma coluna de plasma resultante do aquecimento, por meio de um arco elétrico, de um gás em alta vazão. O plasma é transferido ao metal, que se funde e é expulso com o auxílio do gás em alta vazão, como mostrado no esquema da Figura 8b.

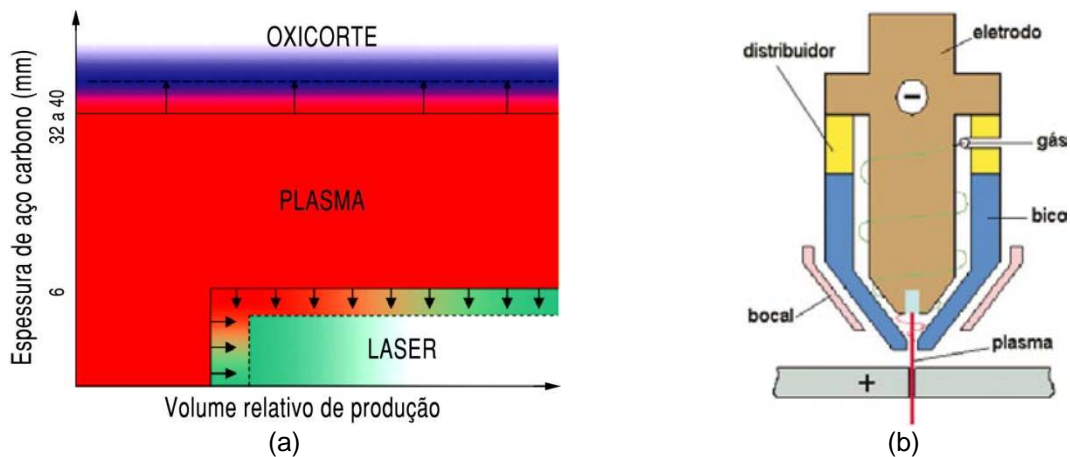


Figura 8 – (a) Processos de corte sugeridos em função da espessura das chapas de aço e volume relativo de produção e (b) esquema do processo a plasma.⁽⁸⁾

A qualidade do corte é caracterizada pelo desvio da linearidade do corte e angularidade da superfície de corte. A norma ISO 9013⁽⁹⁾ estabelece um critério com base na espessura do material conforme mostrado na Tabela 1⁽⁸⁾. Os níveis vão de 1 a 5, sendo que 1 indica a melhor qualidade.

Tabela 1– Níveis de qualidade de superfície de corte conforme ISO 9013⁽⁹⁾

Espessura (mm)	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Nível 4		Nível 5	
	Desvio	Ângulo	Desvio	Ângulo	Desvio	Ângulo	Desvio	Ângulo	Desvio	Ângulo
1,50	0,05	2,20	0,16	6,54	0,41	16,5	0,83	30,7	1,25	41,8
3,40	0,06	1,10	0,17	3,21	0,43	7,97	0,87	15,6	1,32	23,1
6,40	0,07	0,70	0,20	1,93	0,46	4,59	0,93	9,13	1,42	13,9
9,50	0,08	0,50	0,22	1,39	0,50	3,18	0,99	6,33	1,53	9,75
12,70	0,09	0,40	0,24	1,17	0,53	2,58	1,05	5,15	1,64	8,00

O processo de corte a plasma ocupa uma vasta área de aplicação com vantagens técnicas e econômicas. Porém, existem aplicações que os outros processos de corte térmico (ou termoquímico) mais adequados. Para peças em aço carbono, com espessuras acima de 40 mm, como sugerido no gráfico da Figura 8, o ideal é utilizar corte oxiacetilênico, devido ao baixo custo inicial e operacional do processo. O desenvolvimento do plasma de alta definição permite alcançar componentes com qualidade superficial de nível 3, como ilustra a Figura 9.

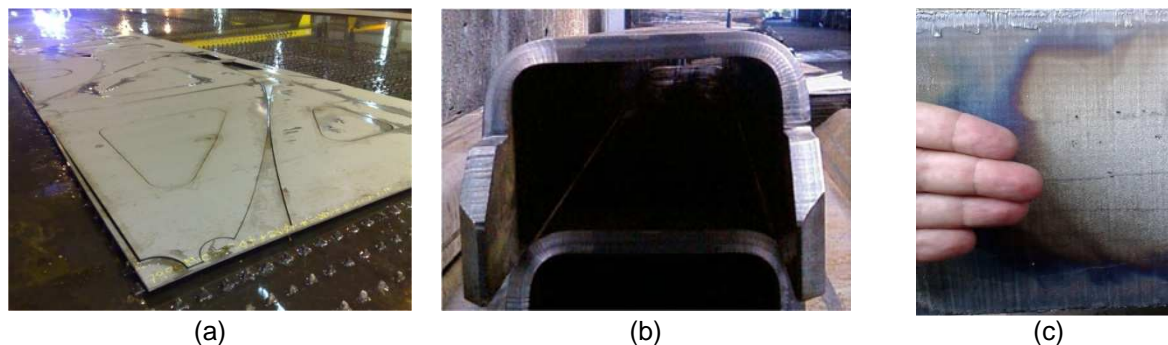


Figura 9 – (a) Prática do corte a plasma; (b) aspecto superficial de uma peça obtida por corte a plasma e (c) uma placa de aço com 145mm de espessura cortada por oxicorte.

2.3 Processo a Laser (Feixe de luz e gás)

O processo Laser, como regra geral, transforma uma fonte de energia externa em luz de um só comprimento de onda (λ). O meio para formação do laser pode ser sólido (YAG) ou gasoso (CO_2 , N_2 ou He), como mostrado na Figura 10. Para o corte, utiliza-se ainda um gás denominado gás de assistência que auxilia na velocidade de corte e na qualidade do mesmo. A Tabela 2 mostra os gases mais utilizados em função do material a ser cortado.

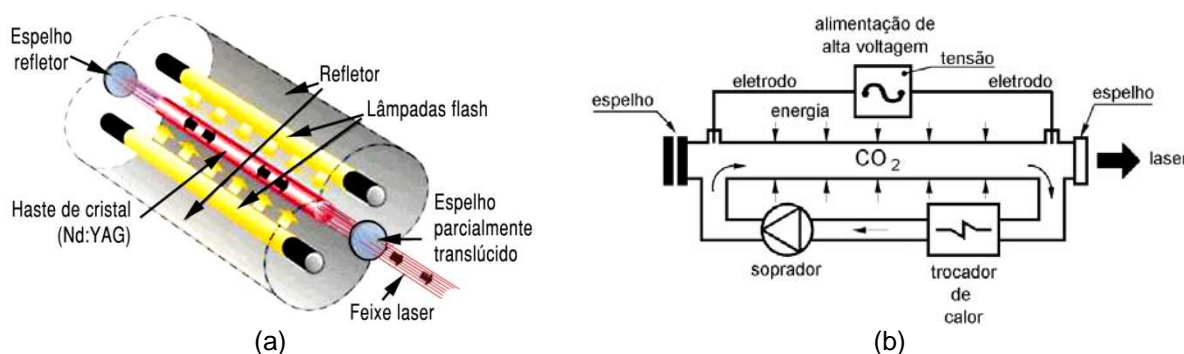


Figura 10 – (a) Esquema de princípio de um laser sólido (YAG); (b) Esquema de princípio de um laser de CO_2 .⁽¹⁰⁾

Tabela 2 – Gases de utilizados no processo de corte a Laser⁽¹⁾

Material a ser cortado	Gás de auxílio	Observações
Aço carbono	Oxigênio	Corte rápido
Alumínio	Ar comprimido limpo	Qualidade mediana
Alumínio	Nitrogênio	Bordas definidas
Aço Inoxidável	Oxigênio	Para material espesso ($e > 5\text{mm}$)
Aço Inoxidável	Nitrogênio	Melhor qualidade de bordas
Titânio	Nitrogênio	Reage

O Laser é o processo de corte mais recomendado para peças de espessura abaixo de 6 mm, com requisitos restritos de ângulo nível 1 ou 2 segundo a ISO 9013.⁽⁹⁾ Recomenda-se o corte a laser quando as peças apresentarem formas complicadas e for exigido um acabamento de superfície praticamente livre de rebarbas na região de corte. Como esse processo não requer estampos de corte, é possível produzir rapidamente lotes pequenos e diversificados, como mostrado na Figura 11.

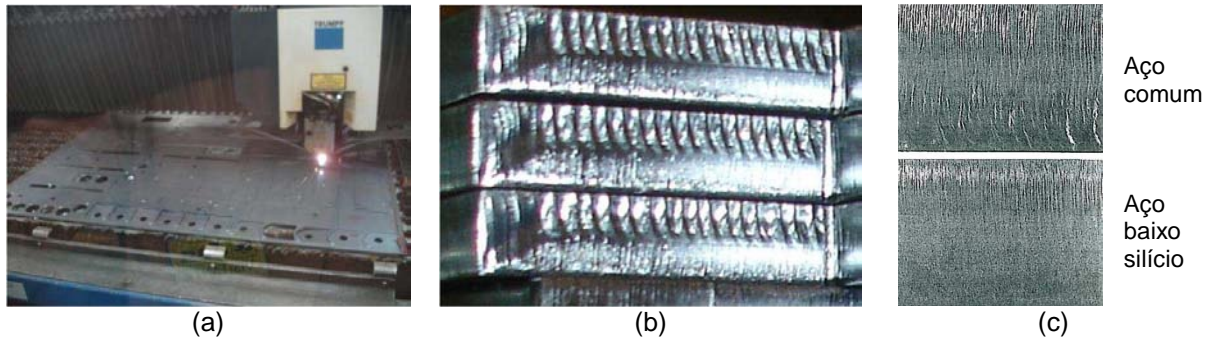


Figura 11 – Registro dos autores da: (a) processo de corte a Laser; (b) aspecto ampliado da borda de peças cortadas a Laser (espessura 6,30mm). Aspecto da borda lateral de uma chapa de 1 pol (25,4mm) de dois aços diferentes.⁽¹³⁾

O processo de corte a laser é reconhecido por produzir peças com grande precisão dimensional e excelente qualidade de acabamento. Porém a precisão do corte dependerá de alguns fatores: regulagem do equipamento, qualidade superficial da chapa, nível de tensão residual e composição química. Neste caso, a rugosidade do corte aumenta com maiores teores de carbono, fósforo e molibdênio e a qualidade do corte é melhorada com menores teores de enxofre e silício.⁽¹³⁾ No caso do silício, esta é uma condição amplamente reconhecida.

3 RECOMENDAÇÕES GERAIS E EXEMPLOS DE CASOS

Devido as diferentes características obtidas nos processos de corte, das diferenças entre os materiais e da posterior conformação dos mesmos, é possível recomendar algumas ações simples, de modo a obter um melhor desempenho do produto final.

3.1 Direção de Dobramento

Para as peças que sofrerão dobramento após o corte recomenda-se dar preferência para o dobramento com o eixo de dobramento orientado na direção transversal da laminação da peça (*blank* ou chapa). Visto que a eventual presença de defeitos internos (como inclusões) pode funcionar como concentradores de tensão. Caso seja impossível o dobramento nesta direção é desejável utilizar material tratado por globulização, que é uma característica da qualidade de chapas de aço que possuam melhor desempenho em conformação plástica, que pode ser traduzido por valores menores do calço(ou raio de dobramento) exemplificados na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplos de qualidades de aço e suas características mecânicas

Categoria de aplicação	Qualidade (norma e grau aplicável)	Calço de Dobramento a 180°	Limite de Escoamento
Aços estruturais	ASTM A36	1,5-e	≥ 250MPa
	COS AR 50	2,0-e	≥ 330 MPa
	COS CIVIL	3,0-e	≥ 350 MPa
Aços para longarinas	NBR 6655 LN24	0,5-e	≥ 240 MPa
	ASTM A1011 HSLAS F50	1,0-e	≥ 340 MPa
	NBR 6655 LN36	0,5-e	≥ 360 MPa
Aços estruturais	NBR 6656 LNE260	0,0-e	≥ 260 MPa
	NBR 6656 LNE380	0,0-e	≥ 380 MPa
	COS LNE 600	1,5-e	≥ 600 MPa

e = Espessura nominal do material.

3.2 Acabamento do Corte

Os processos de corte oferecem características de acabamento diferentes entre si. Assim, para peças que serão posteriormente conformadas é necessário evitar a ocorrência de rebarbas, escolhendo o processo de corte mais adequado. A Figura 12 ilustra o máximo de expansão que pode ser feita em um furo de igual tamanho inicial, mas produzido por três processos diferentes em um aço *Complex Phase* (CP800) produzido pela Voest Alpine.⁽¹¹⁾ Na Figura 12, percebe-se como o acabamento superficial da peça influencia o desempenho na sua conformação posterior pelo tamanho máximo da expansão que pode ser obtida a partir do furo.

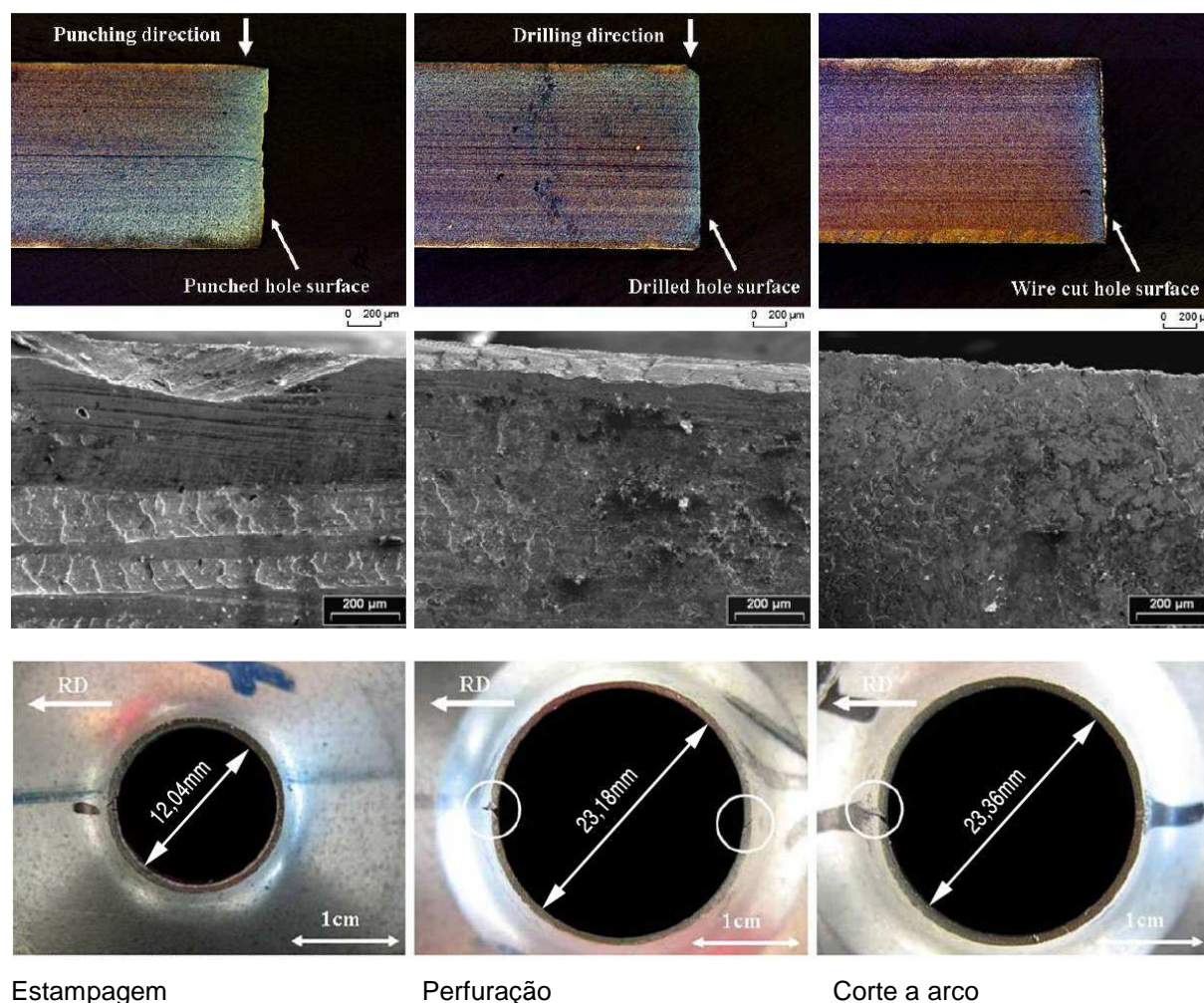


Figura 12 – Desempenho durante um ensaio de expansão de furo de um aço processado por três processos diferentes de corte.⁽¹¹⁾

Com relação à qualidade oferecida pelos processos de corte, a condição das bordas é muito importante, pois o corte pode produzir uma superfície rugosa e cheia de rebarbas que é mais susceptível à formação de trincas por conformação. Desta forma, recomenda-se que o lado mais “brilhante” ou “liso” da borda (Figura 6d) sempre esteja na região de tração da peça sendo dobrada (Figura 1). Também é possível fazer um chanfro na lateral da chapa cortada, de maneira a melhorar a sua qualidade superficial, reduzir ou eliminar os pontos de concentração de tensão (vide Figura 4) e assim melhorar a sua conformabilidade. A Figura 13 ilustra um caso prático no qual a conformação foi prejudicada devido às rebarbas de corte da peça.



Figura 13 – (a) Peça automobilística que rompeu na conformação e (b) a indicação que o lado rugoso da peça estava localizado na região mais crítica (tração).

A Figura 14a ilustra o acabamento de um corte a Laser feito para obter *blanks* (pré-formas) de uma ferramenta a partir de uma chapa de aço SAE 1045, com 0,25%Si e 9,50 mm de espessura. Pode-se notar na parte inferior do corte, uma série de imperfeições similares a rebarbas de corte por estampo e que a superfície da chapa de aço possui a formação de carepas conhecidas como “siliciosas”. A presença do silício nos aços cortados a Laser passa a ser cada vez mais prejudicial à qualidade do corte com o aumento da espessura das chapas. Recomenda-se, para um bom corte, silício máximo de 0,05% para chapas grossas ($e > 5\text{mm}$).

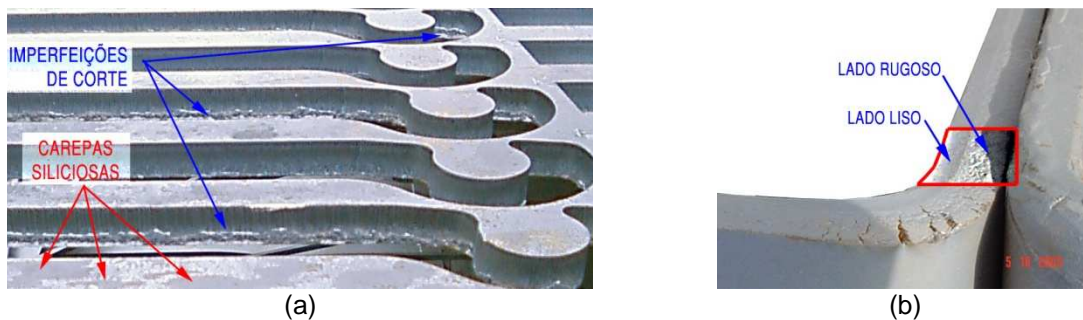


Figura 14 – (a) Resultado do corte a Laser de uma chapa de aço SAE 1045 (com 0,25%Si e 9,50mm de espessura). (b) Trincas surgidas em uma chapa grossa dobrada na região rugosa, sem preparação prévia.

Caso peças com estas características devam ser conformadas, as mesmas devem ser preparadas previamente ou conformadas de tal forma que a região sob tração (Figura 1) seja a de melhor acabamento. A Figura 14b ilustra um exemplo de uma chapa grossa que apresentou trincas após dobramento. Neste caso, as trincas poderiam ter sido evitadas simplesmente dobrando-se a peça para o lado contrário.

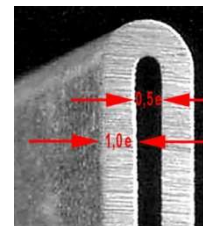
3.3 Ductilidade do Material X Raio de Dobramento

O calço máximo permissível para cada chapa em questão pode ser obtido pelas normas aplicáveis à chapa, como está ilustrado na Tabela 3. O aumento no nível de resistência mecânica tende a impactar negativamente na capacidade de deformação do material,⁽²⁾ conforme ilustrado pelos valores da Tabela 3. Além disso, quanto menor o calço, menor será o raio de dobramento, como mostrado na Tabela 4, logo, maior será a exigência de ductilidade do material. A Figura 2 também ilustra a importância do raio interno de dobramento, que está especialmente vinculado com o tipo de punção utilizado: se a relação $e/R_i > 1,6$ o dobramento é considerado crítico.

Tabela 4 – Raio de dobramento que pode ser obtido em função do calço de dobramento a 180° e espessura das chapas

Calço	Espessura (mm)										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10	11	12
0,5	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	8,8	10	11	12	14	15
1,0	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10	12	13	15	16	18
1,5	3,5	5,3	7,0	8,8	10	12	14	16	17	19	21
2,0	4,0	6,0	8,0	10	12	14	16	18	20	22	24
3,0	5,0	7,5	10	12	15	17	20	22	25	27	30
4,0	6,0	9,0	12	15	18	21	24	27	30	33	36

Exemplo de dobramento calço 0,5-e



3.4 Tensões Residuais

Tensões residuais ocorrem em chapas de aço, especialmente se forem oriundas de bobinas, que devem ser conformadas previamente para se tornarem planas em equipamentos tal como o mostrado pela Figura 15. As normas que versam sobre a forma dos produtos planos se limitam à descrição da planicidade somente para produtos na forma de chapas sendo que bobinas de aço não são abrangidas.

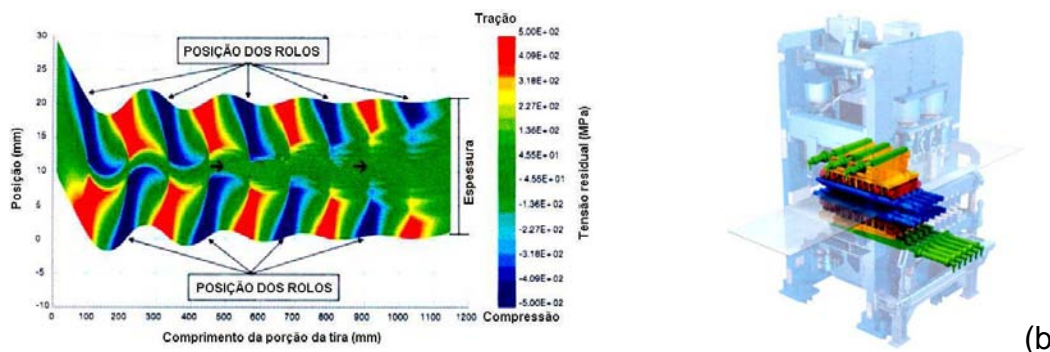


Figura 15 – (a) Mudança na distribuição de tensões durante o processo de aplainamento (com *levelling*) e (b) aplainadora (*levelling*) de alto desempenho.⁽¹²⁾

O nível de tensão necessária para o desempenho aumenta com o grau de resistência do material, daí necessitando de equipamentos cada vez mais sofisticados e rígidos (robustos) para fazer o devido aplainamento do material. O grande problema que pode ocorrer, com um nível mais elevado de tensões residuais, é o levantamento das peças que estão sendo cortadas, como ilustrado pela Figura 16.



Figura 16 – (a) Cabeçote de máquina de corte a Laser encostando em uma peça que (b) está apresentando levantamento devido à tensão residual.

Neste caso, pode-se trabalhar em quatro frentes, de acordo com a sequência de possibilidades de melhorias listadas a seguir;



- alterar o projeto de liga do aço e o processo de laminação de forma a minimizar as condições que levam ao tensionamento do material;
- alterar o processo de desempenho das chapas, para introduzir um mínimo de tensão residual, por exemplo, pelo uso de desempenadeira mais rígida (robusta) ou do tipo aplainadora (“levelling”) ou mesmo desempenadeira sob tensão;
- realizar o corte em etapas, deixando-se pequenos pontos de união entre a peça cortada e a chapa de forma que o processo de separação possa ser terminado depois, fora da máquina de corte a laser; e
- trocar o tipo de produto de chapa oriunda de bobinas (produzidas por laminador contínuo) para chapas oriundas de laminador reversível (que não foram bobinadas anteriormente).

4 CONCLUSÕES

O histórico de experiências, análises e ações para melhoria da utilização dos produtos da Usiminas-Cubatão, aqui apresentados, levam às seguintes conclusões:

- o processo de corte pode ser variado, assim como a influência sobre o processo de dobramento posterior;
- o resultado com a peça cortada depende do material, mas também de como esta foi cortada e manuseada; e
- orientações gerais e particulares podem ser oferecidas para melhorar o uso dos produtos planos de aço.

Estas orientações têm oferecido maior confiabilidade aos produtos da Usiminas-Cubatão.

REFERÊNCIAS

- 1 BENSON, S. D.; **Lasers, Punches, Press Brakes & Shears**. Asma, LLC. Interactive Textbook, 2002. 1 CD.
- 2 MORAIS, W. A.; BORGES, H.C. Condições técnico-economônicas para viabilizar o emprego de aços planos de elevada resistência mecânica em aplicações práticas. **Tecnologia em Met., Mat. e Mineração**, v.6, n.1, p. 1-6, jul.-set. 2009.
- 3 MAGNABOSCO, A. S. Resistência Mecânica x Conformabilidade. MAGNABOSCO, A. S. Resistência Mecânica x Conformabilidade. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; **Metalurgia Física e Mecânica Aplicada**. 2^a Edição. São Paulo: ABM, 2009. Mód. 5, Cap. 3, p. 481-500.
- 4 CALLISTER, W.D.; **Materials science and engineering**. John Wiley & Sons Inc., 4th edition, 1997.
- 5 THEIS, H. E. **Handbook of metalforming process**. New York: Marcel Dekker, 1999.
- 6 KONIECZNY, A.; HENDERSON, T.. On formability limitations in stamping involving sheared edge stretching. In: **STEEL INNOVATIONS, FATIGUE RESEARCH, SHEET/HYDRO/GAS FORMING TECHNOLOGY & ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL DEVELOPMENT**, 2007, Detroit. Warrendale: SAE International . 2007. 41-50 p.
- 7 KONDO, K.. Recent developments of shearing in Japan. In: **Int. J. Mach. Tools Manufac.**, v.29, n.1, p.29-38,. 1989.
- 8 LIMA, E. G.; Corte a Plasma. **Revista da Soldagem**. Ano II – n. 09, p.18-26, 2006. Disponível em: http://www.baw.com.br/images/products/sup_3_Artigo_Corte_Plasma.pdf Acesso em: 13 abr. 2010.
- 9 **ISO 9013**. Welding and allied processes - Quality classification and dimensional tolerances of thermally cut (oxygen/fuel gas flame) surfaces. 2002.
- 10 Aula 62: Corte com laser. Processos de Fabricação Telecurso 2000.



- 11 KARELOVA, A.; WERNER, E.; HEBESBERGER, T.; PICHLER, A. Influence of the edge conditions on the hole expansion property of dual-phase and complex-phase steels. **MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY** - MS&T, 7, 2007, Detroit, p.159-170. : AIST, 2007.
- 12 HARTUNG, H.G.; JAENECKE, M.; SASSE, C. New shearing line for a more efficient production of plates with few inherent stress. **Stahl und Eisen**, v.129, n.10, p.55-59, Oct. 2009.
- 13 MANOHAR, M. CO2 laser beam cutting of steels: material issues. **Journal of Laser Applications**, v.18, n.2, p.101-102, 2006.