

CORTE DE MATERIAIS COM LASER PULSADO DE Nd:YAG ⁽¹⁾

⁽²⁾ Maurício David M. das Neves, ⁽²⁾ José Roberto Berretta,
⁽²⁾ Ivan Alves de Almeida, ⁽²⁾ Wagner de Rossi, ⁽²⁾ Nilson Dias Vieira Jr.

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242 - Cidade Universitária
CEP: 05508-000 - São Paulo - SP
Telefone: (011) 3816-9354 Fax: (011) 3816-9370

RESUMO

Diversos materiais, tais como, aço carbono, aço inoxidável, alumínio, titânio e cobre foram cortados em um laser pulsado de Nd:YAG. Estudou-se a influência dos seguintes parâmetros do laser: potência média e de pico, energia por pulso e largura temporal, densidade de potência, taxa de repetição, largura do corte ("kerf"), pressão e o tipo de gás (O₂ e N₂) de assistência, visando-se obter uma otimização da velocidade e da máxima espessura de corte para cada material. A avaliação da qualidade da superfície seccionada foi baseada nos critérios: dimensional, geométrico (perpendicularidade do corte e manutenção de cantos vivos), rugosidade e quantidade de rebarba gerada. Os resultados obtidos em amostras cortadas com laser apresentaram redução da rugosidade, da largura de corte (kerf) e da zona afetada pelo calor, em relação a outros processos de corte.

ASSUNTOS: 21, 08 e 06

PALAVRAS CHAVES: corte, laser Nd:YAG e rugosidade

ABSTRACT

Several kinds of materials such as mild steel, stainless steel, aluminum, titanium and copper have been cut by the use of a home made pulsed Nd:YAG laser. In order to optimize the processing speed and thickness cutting capability for each material, the influence of the following parameters were studied: average and peak power, energy per pulse and temporal pulse width, power density, repetition rate, kerf width, pressure and assistance gas type (O₂ and N₂). The quality valuation of the cutting surface was based on the following: dimensional, geometric (perpendicularity and sharpness of the edges), rugosity, amount of burn. Laser cutting resulted in better quality features when compared with other processes such as oxy flame cutting and plasma arc cutting. It resulted in more accurate dimensional and geometric works, reduced rugosity, kerf width and heat affected zone.

⁽¹⁾ Trabalho apresentado no XXVII Consolda e XII Congresso Internacional de Soldagem

⁽²⁾ Pesquisadores do IPEN

e-mail: mdneves@net.ipen.br fax: (11) 3816-9370

10301

1. INTRODUÇÃO

Diversos segmentos industriais vêm substituindo métodos tradicionais de corte, como por exemplo, oxicorte, plasma, água e com abrasivos pelo processo laser. A crescente utilização do corte a laser deve-se a possibilidade de utilizar maiores velocidades, reduzir do calor imposto à seção de corte e melhorar a qualidade do corte com mínima distorção do material de base (MB). O processo de corte, independente de utilizar o laser de Nd:YAG ou CO₂ pode ser facilmente automatizado e associado com a elevada taxa de reprodutibilidade, permite reduzir custos e motivar novas aplicações⁽¹⁻⁵⁾.

O processo de corte com laser Nd:YAG é basicamente, térmico onde as superfícies de corte são localmente fundidas e/ou vaporizadas pelo calor proveniente do feixe laser. As operações de corte utilizam uma elevada vazão de gás na região de corte, visando facilitar a remoção da material fundido e/ou vaporizado.

Os processos de corte com laser de Nd:YAG requerem a ação simultânea de um feixe, com elevada densidade de energia ($10^4 - 10^6 \text{ W/mm}^2$)⁽⁶⁾ e uma vazão de gás de assistência, que juntos criam uma largura de corte no metal de base, denominada por "kerf". O corte inicia-se por uma pequena perfuração no MB chamada de "piercing". Após este transiente inicial, o feixe laser produz um orifício denominado por "keyhole", que consiste de uma coluna de vapor metálico envolvido por uma fina camada de metal líquido. A formação do "keyhole" começa pela fusão do metal, seguindo-se uma vaporização rápida do MB, enquanto o gás de assistência empurra o metal fundido para fora do keyhole, através da raiz do kerf. Em algumas situações um gás ativo pode ser utilizado, visando melhorar a eficiência do corte pela presença de uma reação exotérmica na região de corte.

Diversos parâmetros influenciam o processo de corte com laser de Nd:YAG, entre eles podem ser destacados: características ópticas e propriedades do feixe, características superficiais e volumétricas do MB e propriedades físicas de gás^(1,6).

A característica mais importante do sistema óptico de focalização é o comprimento focal da lente utilizada, o qual determina o diâmetro do feixe na região de trabalho. As propriedades do feixe laser mais importantes para o corte são: comprimento de onda da radiação, energia e largura temporal do pulso laser. Estes parâmetros, juntamente com o diâmetro do feixe determinam a potência sobre a área de trabalho, tanto em aplicações de corte⁽⁶⁾ como de soldagem⁽⁷⁾.

Diferentemente de um laser contínuo, como é o caso da grande maioria dos lasers de CO₂, um laser pulsado de Nd:YAG, apresenta um maior número de parâmetros a serem controlados. Portanto, o laser pulsado requer um maior conhecimento técnico sobre o processo e maior trabalho para o ajuste destes parâmetros, por outro lado, também propicia maior versatilidade no uso do equipamento, possibilitando a execução de trabalhos com maior precisão e controle.

A espessura é um dos parâmetros mais importantes, pois influencia durante o corte, a qualidade superficial e a velocidade de execução. Diversas propriedades físicas, tais como, refletividade, densidade, calores de fusão e vaporização e difusividade também afetam o comportamento do corte. As condições superficiais, rugosidade e camada oxidada, podem modificar a interação do feixe com a superfície.

Diversos gases de assistência podem ser utilizados, tais como, oxigênio, ar, nitrogênio, argônio e hélio. O oxigênio reage com diversos metais e não metais, como por exemplo, o aço carbono cortado com oxigênio produz excelente acabamento superficial e elevada produtividade. O ar é utilizado no corte de ligas de alumínio e em cerâmicas a base de alumina, enquanto o nitrogênio é bastante usado em aços inoxidáveis e ligas de níquel. Gases inertes, como argônio e hélio são empregados em materiais reativos, como o titânio. Os materiais são removidos com pressões que variam de próximo de zero até 900KPa para atmosferas de gás inerte⁽⁶⁾.

A interação do feixe com a superfície do MB é um outro fator importante, na eficiência de corte. A literatura apresenta alguns estudos^(1,6) na qual o ponto focal, geralmente, localiza-se na superfície ou abaixo desta região. Inicialmente, a absorção do

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diversos materiais de base com diferentes espessuras foram seccionados, conforme parâmetros, que estão apresentados na tabela 1. Observou-se que, os materiais com maior difusividade térmica (D) necessitavam ser aquecidos mais rapidamente, durante o corte, do que os materiais com menor difusividade térmica. O controle da taxa de aquecimento do material base foi realizado por meio da variação da intensidade do feixe laser sobre a superfície do metal.

O valor da largura temporal (t_p) de 0,6ms foi mantido constante para todos os materiais, com exceção do cobre, no qual foi empregado 0,3ms. A menor largura temporal para o cobre foi selecionada em consequência, de sua elevada difusividade térmica. Portanto, existiu a necessidade de entregar a energia do pulso, em um tempo menor, visando, evitar maiores perdas de calor por condução no MB.

O corte realizado com elevada intensidade de potência provocou um rápido aquecimento no local de interação e conseqüentemente, menor perda de calor por condução através do MB. A tabela 1 foi obtida experimentalmente e embora os valores não estejam otimizados, mostra claramente a necessidade de aumento da intensidade, para o corte de metais de alta difusividade térmica.

Outra variável que influenciou na seleção dos parâmetros de corte foi a espessura do material. Os materiais com maior espessura necessitaram de maior energia para fundir o volume da área de corte. Considerando-se constantes a largura temporal do pulso e o diâmetro do feixe no ponto focal, vemos que um aumento de intensidade, geralmente, também é uma condição para o corte de materiais mais espessos. A exata relação entre difusividade térmica, espessura e a intensidade utilizada não está estabelecida, pois ela envolve também, de uma maneira complexa, outros parâmetros, como tipo de gás, pressão, estado da superfície, etc, além da qualidade final da superfície de corte.

Os dados apresentados na tabela 1 mostraram uma tendência de comportamento, e servem como guia para testes iniciais de corte de materiais. As velocidades de corte foram relativamente baixas, e estão limitadas pela potência média do equipamento utilizado, ou seja, pela taxa de repetição dos pulsos laser. Assim, materiais menos espessos e com menor difusividade térmica foram cortados com maior velocidade, que os materiais mais espessos de maior difusividade térmica.

O fato do laser de Nd:YAG da CPML operar no modo pulsado, leva a uma dinâmica diferente do material fundido que é expelido da região de corte. No caso dos lasers contínuos de CO₂, esta dinâmica é bem conhecida e forma ondulações na região de corte⁽⁶⁾ levando a uma certa rugosidade e indefinição da borda e do contorno da peça. A maior definição do contorno pode ser explicada pela intensidade de pico, consideravelmente, maior quando se utiliza um laser pulsado de neodímio. Neste caso, como mostrado na tabela 1, a intensidade chega a dezenas de MW.cm⁻², enquanto que no caso dos lasers contínuos de CO₂, mal passa de poucos MW.cm⁻²⁽⁶⁾. A razão entre a quantidade de material evaporado e material fundido é muito maior para um corte com laser pulsado, fazendo com que o material líquido seja quase que completamente expelido da região de corte, deixando uma área muito mais limpa e dimensionalmente mais próxima do projetado. As figuras 1a e 1b ilustram as diferenças, anteriormente, mencionadas.

Outras características importantes na superfície de um MB seccionado com um laser Nd:YAG são: a rugosidade desta superfície e o perpendicularismo formado com a superfície de incidência do feixe. As medidas da rugosidade e perpendicularismo foram realizadas utilizando-se O₂, como gás de assistência e chapas de aço inox de 3 e 4 mm de espessura, que representam o caso mais difícil para um equipamento com esta potência. Portanto, chapas com espessuras menores devem apresentar resultados de rugosidade e de perpendicularismo, melhores do que os apresentados a seguir.

Na figura 2 é mostrada a superfície de corte, onde a entrada do feixe laser se deu na porção inferior desta figura. As medidas de rugosidade mostraram valores de R_A da ordem

de 1 a 2 μm até uma profundidade de aproximadamente 1/3 da espessura da chapa, aumentando gradativamente até $R_A \sim 15\mu\text{m}$ para a borda oposta⁽⁷⁾.

O perpendicularismo da superfície de corte em relação à face da chapa, para uma peça de 4 mm de espessura, situou-se no intervalo de 0,5 a 0,7 graus maior, que o ideal de 90°, como mostrado na figura 3. Novamente, a maior variação se dá para a região mais próxima à borda de saída do feixe laser.

Os resultados obtidos para rugosidade e perpendicularismo podem ser explicados pela natureza térmica do processo. A parte inferior do corte apresenta qualidade pior, porque o gás de auxílio, não tem pressão suficiente para uma limpeza mais adequada no fundo deste corte. Para uma largura da região fundida de $\sim 0,12\text{mm}$ (largura do corte, ou "kerf"), uma espessura de 3 ou 4 mm representa uma perda muito grande de pressão de gás. Melhores resultados poderiam ser obtidos com o aumento da pressão e a diminuição da distância do bico à superfície de corte. No entanto, estas alterações requerem mudanças construtivas na câmara de pressão de gás e no sistema de segurança do equipamento.

Conforme mencionado, a qualidade do corte é função de diversos parâmetros envolvidos no processo, inclusive do gás de proteção. Um estudo realizado envolveu o corte de chapas de aço inoxidável AISI 304 de espessura de 1,5mm, com atmosfera protetora de N_2 , a qual propiciou um corte, praticamente, sem oxidação da superfície. Numa primeira aproximação e fazendo-se o uso da experiência prática em corte a laser, procurou-se determinar os valores ótimos de dois parâmetros mais importantes relacionados à rugosidade da superfície de corte, ou seja, velocidade de corte e posição do ponto focal.

O ponto focal teve sua posição variada desde a superfície da peça (posição 0) até 1,75mm abaixo desta (posição -1,75mm) e os resultados são mostrados na tabela II. Observa-se na tabela II, que a medida que o ponto focal se aprofunda na peça, o valor da rugosidade diminuiu. Em profundidades máximas de -1,75mm, a rugosidade próxima à superfície de entrada do feixe laser não somente foi a menor, como também apresentou o mesmo valor de rugosidade da superfície de saída, contribuindo para uma elevada homogeneidade ao longo da superfície de corte.

A exata compreensão dos resultados obtidos depende de uma análise detalhada da complexa interação, entre os inúmeros parâmetros envolvidos no processo, o que não foi feito neste trabalho. Uma análise preliminar, contudo, parece indicar que o posicionamento do ponto focal próximo à superfície inferior da peça age no sentido de compensar a menor eficiência na ação do gás de assistência neste ponto. Como a largura do corte é muito pequena ($\sim 0,12\text{mm}$), o fluxo de gás cai rapidamente com a profundidade na peça, fazendo com que a retirada de material fundido seja dificultada na parte inferior do corte. O posicionamento do ponto focal próximo à superfície inferior cria um gradiente de intensidade, que aumenta da superfície superior (de entrada) para a superfície inferior (de saída). Uma maior intensidade significa uma maior quantidade de material retirado na forma de vapor, com uma conseqüente melhoria da rugosidade superficial. Este efeito, portanto, age de maneira oposta àquela do fluxo de gás, que diminui de eficiência com a profundidade.

Mantida a posição do ponto focal no seu valor ótimo de -1,75mm procurou-se determinar a velocidade de corte, que apresentasse o melhor resultado em termos de rugosidade. Os resultados apresentados na tabela III mostraram que, a velocidade de 250 mm/min implicou em valores mais baixos de rugosidade. Uma variação nesta velocidade sempre ocasionou aumento da rugosidade. Obviamente, a escolha da velocidade é função do uso final da peça, pois uma velocidade maior leva a custos menores.

Neste caso, o efeito da velocidade de corte sobre a rugosidade parece estar relacionado diretamente com a taxa de sobreposição do pulso laser em relação ao pulso anterior. Considerando uma região de metal fundido por cada pulso laser, com diâmetro aproximado de 0,15 mm, temos uma taxa de sobreposição de $\sim 70\%$ para a menor velocidade (100 mm/min.) e de $\sim 0\%$ para a maior velocidade (350 mm/min.). Sobreposição muito alta significa, que a maior parte do feixe laser cai no vazio ou sobre uma superfície refundida bastante inclinada correspondente à parede obtida pelo pulso anterior. Neste

caso, a intensidade cai significativamente, dificultando a eficiência no corte, reduzindo a relação entre o material evaporado e fundido, com conseqüente piora da rugosidade. Sobreposição muito pequena, ou nenhuma, com pulsos praticamente tangenciando um ao outro obviamente, também leva a um aumento de rugosidade pela própria geometria obtida.

A variação dimensional de um contorno programado no CAD-CAM / CNC é função da variação da largura de corte ("kerf") e do erro no sistema mecânico de deslocamento. Este erro de posicionamento, característico do sistema construtivo da mesa, foi medido em 10 μm para um curso total de 700 mm, enquanto que o desvio padrão no "kerf" foi medido em 18 μm para uma chapa de aço inox 304 de 1 mm de espessura ⁽⁷⁾. Esta variação resultou na usinagem de uma peça com variação dimensional de $136^{\pm 0,009}$ mm. Para espessuras maiores, devido aos problemas de rugosidade e perpendicularismo, obviamente o erro será maior.

4. CONCLUSÕES

O corte de materiais que apresentam alta difusividade térmica é realizado de forma mais conveniente, com elevada intensidade de potência e pequena largura temporal.

A posição do ponto focal e a velocidade de corte, como também a combinação destes parâmetros, influenciam diretamente no valor da rugosidade da superfície seccionada.

A rugosidade de uma superfície de corte é menor na região de entrada do que na saída do feixe. O perpendicularismo do corte tem variações toleráveis para a maioria das aplicações de manufatura de materiais.

O controle simultâneo da intensidade, da posição do ponto focal e da velocidade de processo resulta, portanto, em cortes de boa qualidade, melhores que a maioria dos processos convencionais térmicos e até mesmo mecânicos. Mostra-se, assim, adequado à produção de peças onde a tolerância dimensional seja da ordem de $\pm 20 \mu\text{m}$ com rugosidade $\sim 5\mu\text{m}$.

A velocidade de processo poderia ser bastante aumentada com o aumento da potência média deste tipo de equipamento sem a perda de qualidade dos resultados. Um estudo sistemático da influência de outros fatores, como pressão de gás e comprimento focal da lente de focalização pode resultar em melhoria na qualidade do corte.

AGRADECIMENTOS

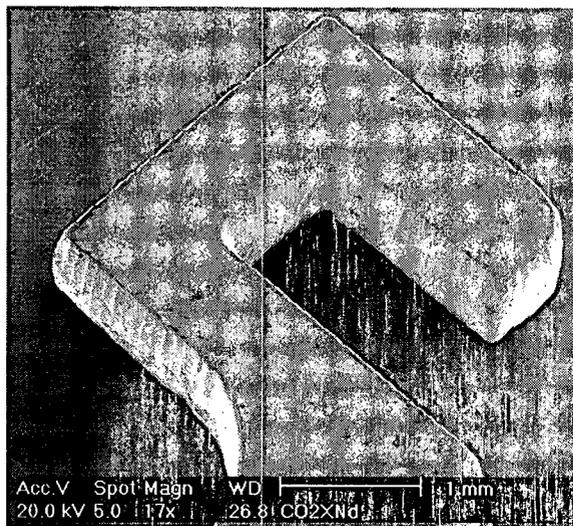
Agradecemos a colaboração do Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão – CETEMP de São Leopoldo RS pelas medidas dimensionais e de rugosidade apresentadas neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

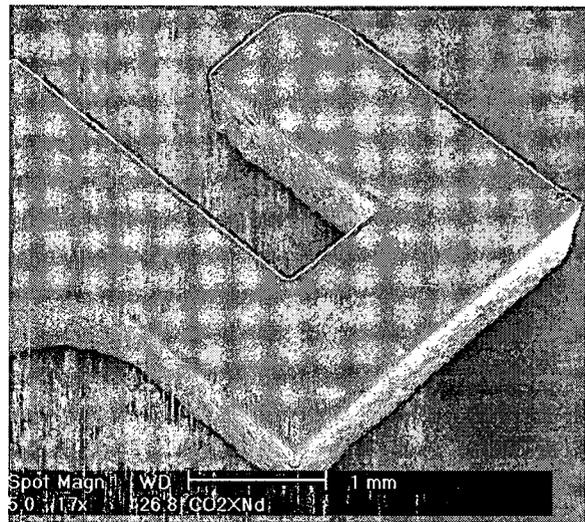
1. Mathew, J.; Goswami, G.L.; Ramakrishnan N.; Naik, N. K.; Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites, Journal of Materials Processing Technology 89-90 (1999) p. 198-203.
2. Prasad, G. V.S.; Siores, E.; Wong, W. C. K.; Laser cutting of metallic coated sheet steels, Journal of Materials Processing Technology 74, (1998), p.234-242.
3. Wang, J.; Wong, W.C.K.; CO₂ laser cutting of metallic coated sheet steels, Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) p. 164-168

Tabela III Rugosidade em função da velocidade de corte. Ra entrada: rugosidade média medida próximo à superfície de entrada do feixe laser; Ra saída rugosidade média medida próximo à superfície de saída do feixe laser. Material AISI 304; gás de assistência N₂.

T _p (ms)	F (Hz)	E (J)	V (mm/min)	Foco (mm)	Ra (μm) entrada	Ra (μm) saída
0.8	37	157	100	-1.75	4.21	7.83
0.8	37	157	200	-1.75	3.70	4.55
0.8	37	157	250	-1.75	2.75	2.88
0.8	37	157	300	-1.75	4.30	5.47
0.8	37	157	350	-1.75	3.24	5.65



(a)



(b)

Figura 1. Aspecto da região de corte em aço 1020 de 1mm de espessura, (a) com laser contínuo de CO₂ (b) com laser pulsado de Nd:YAG da CPML.

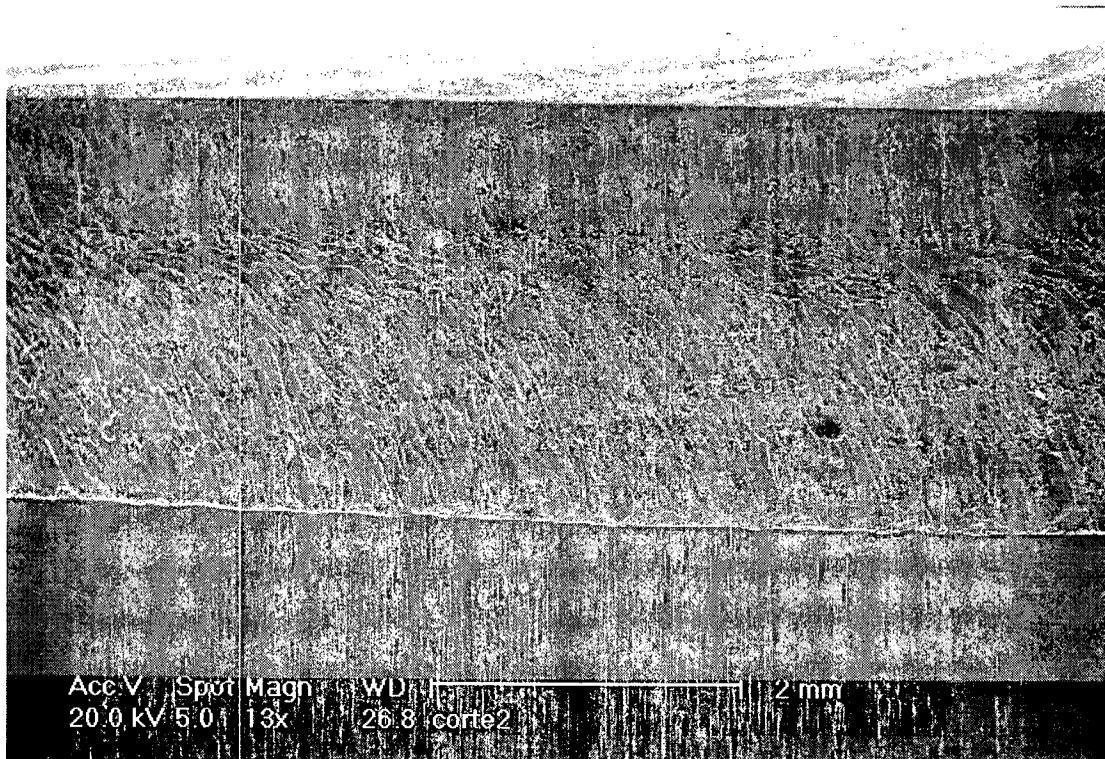


Figura 2. Aspecto da região de corte em uma chapa de aço inox 304 de 3 mm de espessura.

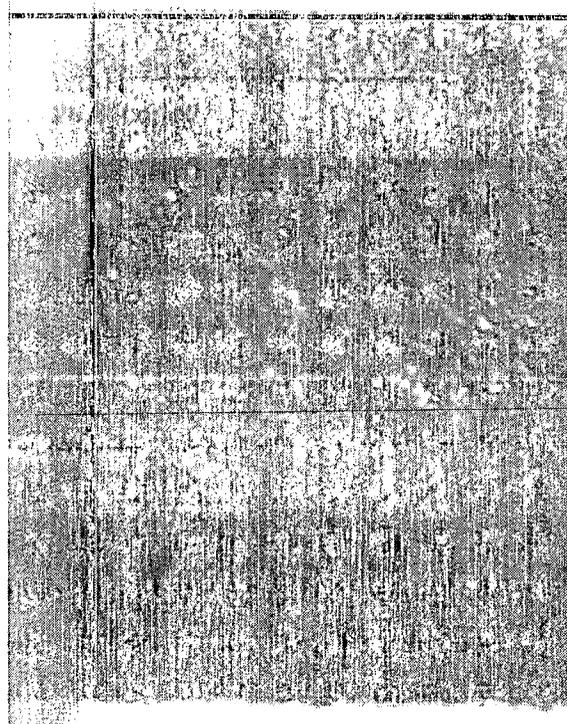


Figura 3. Vista lateral da região de corte em chapa de aço inox 304 de 4 mm de espessura mostrando na porção inferior a variação do perpendicularismo.