

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

AVALIAÇÃO DA ENERGIA DE CORTE A LASER DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA APÓS A ESTAMPAGEM

Autor 1 – Giulia Ciacci Zanella

161183@upf.br

Autor 2 – Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

israel@upf.br

Comissão Examinadora – Volmir Supptitz, Luiz Airton Consalter

RESUMO

A simultânea conformação e têmpera na estampagem a quente proporciona a aços como o 22MnB5+NbMo elevada resistência mecânica, possibilitando a sua utilização em peças de responsabilidade estrutural. Essa união entre resistência, conformabilidade e redução de massa possibilitada por esse processo é extremamente atrativa. Um desafio do processo é a dificuldade de trabalhar com esse material após ele atingir uma resistência próximo a 1500 MPa. O corte a laser pode ser empregado nessa situação, porém a qualidade do corte nem sempre é garantida. O trabalho consiste em avaliar as condições de corte a laser com potência de 2,5 kW e 3 kW e jato d'água, em chapas de 7 mm. A pior condição de acabamento encontrada foi com corte a laser 3 kW, como consequência essa condição apresentou resultados de resistência máxima e de escoamento piores e uma ZTA mais espessa quando comparada com o corte com potência de 2,5 kW.

Palavras chave: estampagem a quente; aços avançados; resistência mecânica; corte a laser.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que os principais responsáveis por estimular a inovação na indústria automotiva são o consumidor, as regulações governamentais, e os outros fabricantes na mesma área (DEMERI, 2013), e suas exigências quanto à redução do consumo de combustíveis, bem como à garantia da segurança de passageiros, vêm aumentando. Soma-se a isso a questão das emissões de carbono, de grande importância atualmente, de forma que é necessária inovação constante para garantir satisfação dos consumidores e adequação a regulações cada vez mais exigentes (TAHIR; AQIDA, 2017).

Para conseguir atender demandas de segurança contra colisões, reduzindo o peso total do automóvel, foi colocada ênfase no desenvolvimento de novos materiais, bem como em mudanças estruturais. Foram essas as pressões que impulsionaram os aços de alta resistência, introduzidos na indústria automotiva pela empresa Saab Automobile em 1984. Esses aços são extremamente atrativos para aplicações estruturais automotivas, podendo ser tratados para atingirem resistências elevadas enquanto mantêm um peso aceitável (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010; HE et al., 2011).

Na estampagem a quente, ocorre a simultânea conformação e têmpera do material utilizado, oferecendo a possibilidade de se obter uma microestrutura completamente martensítica, que eleva uma resistência de aproximadamente 400 MPa até a faixa de 1500 MPa (KARBASIAN;

TEKKAYA, 2010). Ou, então, obter uma peça com diferentes propriedades ao longo de seu comprimento, ao se estampar somente partes do componente (MERKLEIN et al., 2016). Estudos foram realizados utilizando oito diferentes AHSS - desses aços, somente três ligas de boro são capazes de produzir ao final da estampagem a quente uma estrutura completamente martensítica (NADERI, 2007). Entre essas três está o 22MnB5, um dos aços mais utilizados para estampagem. Uma significativa parte das pesquisas envolvendo esse aço estudam a possibilidade de editar ou acrescentar elementos de liga a sua composição com a finalidade de se obter propriedades mecânicas melhores. Esse é o caso do aço 22MnB5+NbMo que será estudado nesse trabalho, com pequenas adições de nióbio e molibdênio, conhecidas por melhorar a temperabilidade e refinar a microestrutura. (HANNULA, 2019)

Uma das maiores qualidades da estampagem a quente de aços com elevada resistência à tração pode se tornar um dos maiores problemas e prejuízos para a indústria. Com dureza elevada e baixa ductilidade, métodos convencionais de corte são inadequados para esses aços. Em situações em que é necessário realizar cortes ou aparar arestas após a estampagem, tecnologias como corte a laser são necessários (SPENA, 2017). Um dos maiores desafios com corte a laser é a definição dos parâmetros adequados para garantir qualidade de corte, pois utilização de velocidades ou potências de corte inadequadas podem provocar defeitos superficiais, largura de corte inapropriada e aquecimento elevado da região próxima ao corte, levando a defeitos microestruturais (TAHIR; AQIDA, 2017).

Nesse trabalho serão avaliadas as propriedades mecânicas e estruturais de corpos de prova de aço 22MnB5+NbMo estampado a quente, que foram recortados com variações de energia de corte laser, afim de indicar a melhor combinação de especificações de corte.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Caracterizar as propriedades mecânicas e a microestrutura do aço 22MnB5+NbMo em função da potência corte a laser.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o comportamento mecânico do aço 22MnB5+NbMo em diferentes parâmetros de corte a laser.
- Avaliar metalurgicamente os corpos de prova com macrografias, micrografias e microdureza.
- Comprovação do método de ensaio de tração que atenda os requisitos do material e do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços avançados, com foco no setor automobilístico

Segundo Demeri (2013), a grande acessibilidade, versatilidade e elevado desempenho dos aços é responsável por tornar o mesmo a liga mais utilizada para construções de carros e componentes estruturais.

As pressões da indústria automobilística para o desenvolvimento metalúrgico, e a busca por aços mais baratos, com alta estampabilidade e melhores combinações de força e ductilidade contribuiu para o projeto dos aços avançados com alta resistência mecânica, ou os AHSS (Advanced High Strength Steels) (GORNI, 2010, 2008). Os AHSS são materiais sofisticados, com composições químicas criteriosamente escolhidas e complexas microestruturas multifásicas, como martensita, bainita e austenita retida. O emprego de diferentes mecanismos de fortalecimento

garante aos AHSS uma resistência à tração superior de no mínimo 500 MPa. (DEMERI, 2013; Advanced High-Strength Steels Application Guidelines,2017)

Com aproximadamente 30 classes diferentes de aços para aplicações automobilísticas, a evolução dos aços ao longo do século passado e a relação entre alongamento e resistência à tração dos mesmos está representada na figura 1. Iniciando com os aços macios, que como o nome indica são aços facilmente deformados e são aplicados às áreas externas do carro. No meio estão os aços convencionais de alta resistência (HSS), em especial os aços com alta resistência e baixa liga (HSLA), onde a elevada resistência se dá pela microestrutura mais refinada com microadições de elementos como titânio e nióbio (DEMERI, 2013; GORNI, 2008).

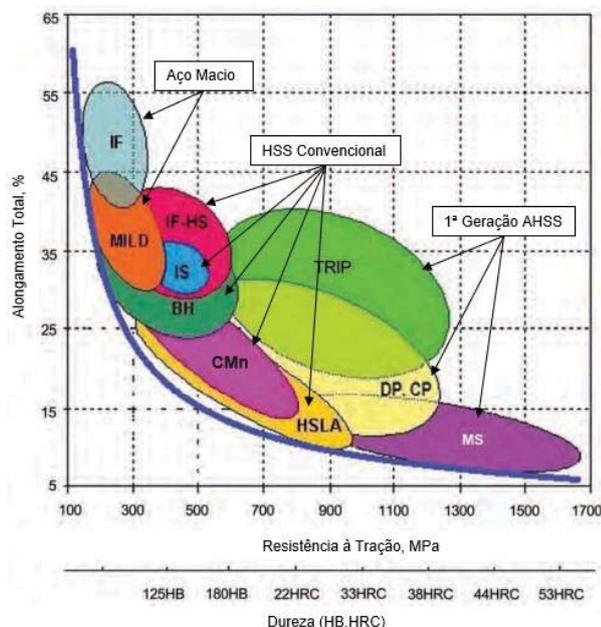


Figura 1 - Evolução dos aços ao longo do século passado e a relação entre alongamento, resistência à tração e dureza.

(Fonte: Adaptado de Demeri, 2013)

Segundo Hein (2005), os aços convencionais de alta resistência (AHSS), junto com a primeira geração de AHSS, são muito utilizados para a fabricação de componentes estruturais automotivos. Essa aplicação é garantida pela elevada flexibilidade de aplicações de chapas planas desses aços, que mesmo com ductilidade reduzida a maioria das ligas possui uma boa formabilidade (DEMERI, 2013; GORNI, 2008). Como exemplo podem ser citados os aços de Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP) possuem alta absorção de energia de impacto, os tornando ideais para zonas de colisão. Além desses existem os aços de altíssima resistência, como os aços temperados à base de boro (PHS) que possuem um desempenho elevado quando se trata de segurança no compartimento de passageiros (Advanced High-Strength Steels Application Guidelines,2017). Na figura 2 alguns componentes estruturais de automóveis estão sendo representados, como colunas A e B, barras de proteção para portas, reforços para o teto e outros.

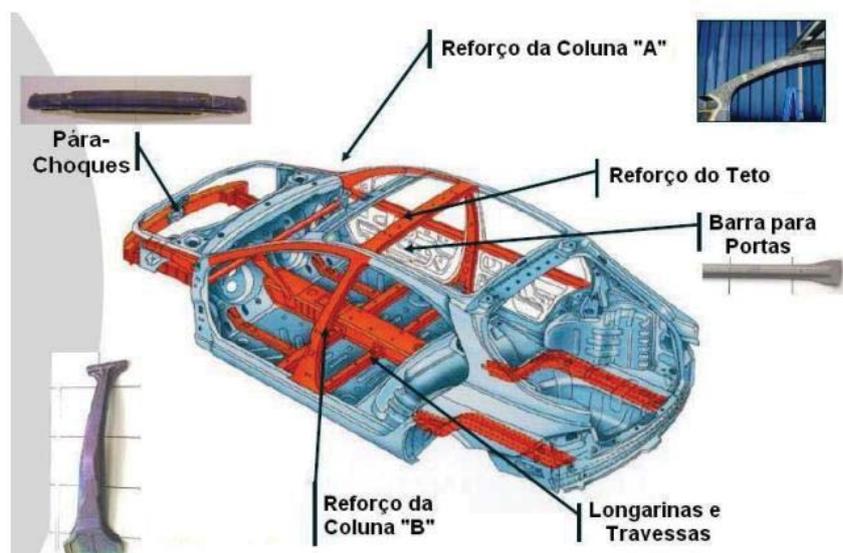


Figura 2. Componentes automobilísticos fabricados com AHSS.

(Fonte: Hein, 2005)

Como é possível ver na figura 2, os componentes fabricados utilizando os AHSS possuem formatos complexos e tamanhos relativamente grandes. Esses parâmetros são fáceis de atingir com aços mais dúcteis e com resistências menores através da estampagem a frio, porém no caso dos aços avançados, as principais características são a altíssima resistência à tração e reduzida ductilidade. Alguns aços martensíticos, por exemplo, possuem somente 5% de alongamento total, fazendo com que a estampagem a frio se torne inviável. Para contornar esse desafio, uma técnica de conformação a quente deve ser utilizada (GORNÍ, 2010,2011; DEMERI,2013).

2.2 Processo de estampagem a quente

Com os aumentos exaltados da cotação de petróleo na década de 80 surgiram os maiores desafios da indústria automobilística, foi então, que a empresa Plannja Hard Tech desenvolveu o processo hoje conhecido como estampagem a quente (GORNÍ, 2010,2011). Após o seu desenvolvimento a quantidade de peças de AHSS processadas por estampagem a quente só cresce, na Europa estima-se que o consumo anual em 2008-2009 foi de aproximadamente 300.000 toneladas (MORI *et al.*, 2017).

Existem duas maneiras de realizar o processo de estampagem, de maneira direta ou indireta (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010). O passo a passo da estampagem a quente direta está na figura 3. Inicialmente a chapa é recortada em um formato conhecido como *blank*, o *blank* é então aquecido até a temperatura de austenitização por 5-8 minutos ou até obter uma microestrutura homogênea, nessa etapa ocorrerá a mudança da microestrutura do *blank* como recebida para uma microestrutura austenítica (TURETTA, 2008). Uma microestrutura austenítica possui excelentes propriedades de conformação como um alongamento total superior a 50% e deformação plástica sob tensões menores, isso é explicado pela facilidade de movimentação das discordâncias em elevadas temperaturas (Advanced High-Strength Steels Application Guidelines,2017; GORNÍ,2011). Devido a essa elevada mobilidade, alguns cuidados especiais devem ser tomados, pois atmosferas inadequadas de aquecimento podem levar a decarbonetação dos aços. Em casos onde as propriedades superficiais da peça são de extrema importância, como peças submetidas a esforços de fadiga, são necessárias algumas medidas para prevenir a perda de carbono superficial como banhos de sal ou ajustes do potencial químico do carbono através da atmosfera (COLPAERT, 2008)

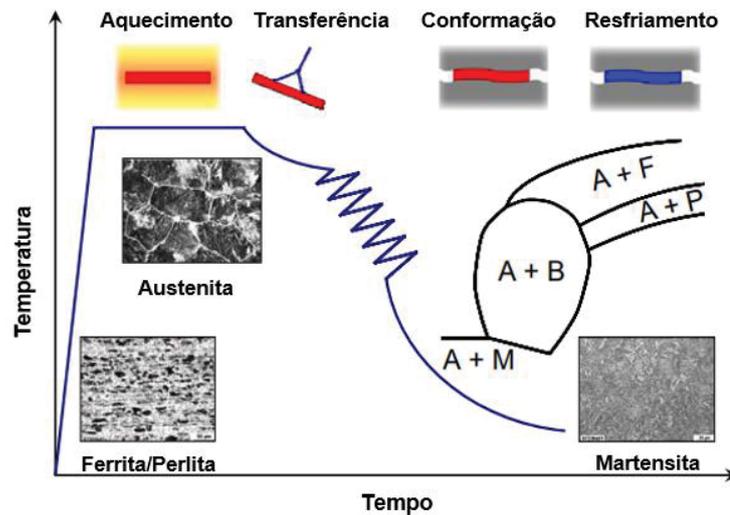


Figura 3. Passos da estampagem a quente.

(Fonte: Adaptado de Turetta, 2008)

Após o aquecimento a peça será transferida rapidamente para uma máquina de prensagem, onde ela será conformada por matrizes para obter a forma desejada. O tempo de transferência é extremamente importante para que não ocorra perda de calor e modifique a microestrutura (Advanced High-Strength Steels Application Guidelines, 2017). Ao mesmo tempo em que a conformação está ocorrendo, ocorrerá também o resfriamento. Segundo Demeri (2013) a velocidade de resfriamento na ferramenta de estampagem é de 50-150 °C/s. O ciclo total de transferência, conformação e resfriamento demora aproximadamente 25 s e a peça sai da prensa a 150 °C, temperatura inferior a linha de transformação martensítica (TURETTA, 2008). Segundo Fan *et al.* (2007) esse resfriamento rápido é o responsável por transformar uma microestrutura com resistência à tração em temperatura ambiente de 350 até 400 Mpa e ductilidade de 20% em uma microestrutura completamente martensítica com resistência de até 1500 Mpa e ductilidade de 6%.

Na estampagem a quente indireta o *blank* é conformado parcialmente, de 90-95%, antes de ser aquecido, após essa pré-forma ele é aquecido a uma temperatura superior a 900 até 950 °C e então é colocado na matriz para receber a conformação final, ao mesmo tempo em que é resfriado (DEMERI, 2013). A finalidade de conformar previamente o componente é proteger superfície da matriz de desgastes abrasivos (NADERI, 2007).

Uma das maiores vantagens da estampagem a quente é a redução do *springback* ou retorno elástico da peça. Retorno elástico, segundo Demeri (2013), é a quantidade que peça estampada se desvia da geometria desejada após ser retirada do molde da prensa. Com o aquecimento e transformação da microestrutura ferrítica para uma microestrutura austenítica, ocorre a diminuição da tensão necessária para a deformação, diminuindo o “efeito-mola” e consequentemente aumentando a precisão dimensional (GORNI, 2011).

O que torna a estampagem a frio não adequada para a conformação dos aços avançados são problemas que podem ser resolvidos através do aquecimento, com a estampagem a quente é possível reduzir retorno elástico, garantindo a geometria da peça, melhorar a vida útil das ferramentas através de esforços reduzidos, aumentar a formabilidade e além disso atingir uma microestrutura que proporciona ao material resistências superiores. (TURETTA, 2008).

2.3 Aços 22MnB5 e 22MnB5+NbMo

Segundo Gorni (2011) os aços mais utilizados para a estampagem a quente possuem uma composição com aproximadamente 0,20% de carbono, elevados níveis de manganês e pequenas quantidades de boro, como por exemplo o 22MnB5 que é um aço carbono-manganês com micro adições de molibdênio, nióbio, titânio, vanádio, boro e cromo, de maneira isolada ou combinada (BAKER, 2016). Quando se fala no processo de estampagem a quente as mudanças de fase são essenciais, por isso é necessário um melhor entendimento sobre o efeito dos elementos de liga sobre as temperaturas de transformação e propriedades finais dos aços utilizados (KRAUSS, 2015). A principal características dos AHSS é a elevada resistência. Naderi (2007) cita alguns mecanismos de endurecimento do aço como sendo por refinamento de grão, por transformação martensítica, por adição de elementos intersticiais de substituição e precipitação.

2.3.1. Carbono, manganês e boro

O carbono é um dos elementos com maior importância sobre as propriedades mecânicas dos aços, quanto mais carbono um aço possuir maior a sua dureza e resistência à tração. Com esse ganho de força o material perde em ductilidade e soldabilidade. O carbono também é responsável por reduzir a temperatura de transformação de martensita. (ÇETIN; MEÇO, 2019; NADERI, 2007).

Segundo Fan *et al.* (2007) o manganês também proporciona ao aço um aumento de dureza e resistência, porém em níveis menores que o carbono. Manganês é encontrado em quase todos os aços, ele é um elemento importante para definir a soldabilidade e temperabilidade dos aços, porque, em baixas quantidades (<2%), ele atua como desoxidante e redutor de trincas a quente. Além disso o manganês é um elemento fundamental na estampagem a quente, tanto na redução de custos através da diminuição da temperatura de austenitização, fazendo com que menos energia seja necessária para aquecer o *blank*, quanto no retardamento na formação de bainita quando se espera uma microestrutura 100% martensítica (ÇETIN; MEÇO, 2019; NADERI, 2007).

Em relação à outros elementos de liga, o boro é o elemento mais eficiente em formar carbonetos e endurecer o aço. Naderi (2007) estudou algumas ligas de aços C-Mn, as que possuíam adições de boro foram as únicas que obtiveram uma microestrutura 100% martensítica ao final da estampagem a quente. A adição do boro também aumenta a temperabilidade dos aços, Fan *et al.* (2007) credita esse aumento a segregação de átomos de B nos contornos de grãos de austenita e retardação da formação de ferrita e perlita. O boro dentro do aço deve ser mantido em solução para evitar a formação de ferrita no lugar da martensita, a maneira de solucionar isso é adicionar pequenas quantidades de um elemento formador de nitrogênio mais potente que o boro, como o titânio (FILHO *et al.*, 2017).

2.3.2. Nióbio e molibdênio

A adição do nióbio ao aço 22MnB5, um aço de elevada resistência a tração, é muito recomendada para melhoramento da tenacidade. Outra vantagem da adição de Nb é a redução de trincamento induzido por hidrogênio através da redução da difusividade do hidrogênio (ÇETIN; MEÇO, 2019). Nióbio também é muito utilizado para refinamento de microestrutura, com a sua adição o crescimento de grão durante a austenitização e deformação é inibida (HANNULA *et al.*, 2019). Esse refinamento pode levar o material a apresentar um melhor desempenho de desgaste posterior a tempera (FILHO *et al.*, 2017).

O molibdênio apresenta algumas características parecidas com o cromo quando adicionados aos aços, ambos são responsáveis por formar carbonetos complexos e diminuir intensamente a temperatura de transformação austenítica (FILHO *et al.*, 2017). Han *et al.* (2008) estudou os efeitos do molibdênio e do cromo sobre a temperabilidade de aços baixo carbono com adição de boro e

concluiu que através da supressão da precipitação $M_{23}(C, B)_6$ nos limites dos grãos de austenita, causada pela combinação de molibdênio e boro, apresenta um efeito mais considerável no aumento da temperabilidade, quando comparado com a dupla B+Cr.

Tanto o molibdênio quanto o nióbio reduzem a difusibilidade do carbono e exercem forças de arrasto sobre os contornos de grão, isso causa o adiamento da formação da ferrita e está associado a uma melhora de temperabilidade (HANNULA *et al.*, 2019). Nióbio e molibdênio juntos estão associados a propriedades mecânicas melhores, por proporcionarem uma microestrutura com grãos menores e mais uniformizados quando comparados com aços onde existem somente micro adições de nióbio.

2.4 Corte a laser

Em 1960 o primeiro laser foi demonstrado pelo Dr Theodore Maiman, desde então houve uma contínua evolução em tecnologia e máquinas a laser, fazendo com que atualmente pouquíssimos automóveis são produzidos sem o uso de laser (ION, 2005).

Um projeto esquemático de um cabeçote de corte a laser está representado na figura 4.a. O processo de corte ocorre quando um feixe focado de luz monocromática, de baixa divergência e alta luminosidade, é refletido através do bico do cabeçote, propagado por um meio ativo e entra em contato com a peça, figura 4.b. A natureza desse feixe provoca a fusão ou vaporização e separação do material. Gás inerte ou ativo são os mais utilizados como meio de propagação na indústria. Quando se tem uma boa tolerância contra a oxidação o gás utilizado é o próprio ar, caso contrário se utiliza o gás nitrogênio ou gases nobres como hélio e argônio (ION, 2005). Eles servem como catalisadores do corte, ao mesmo tempo que sopram o material fundido para fora da zona de trabalho (TAHIR; AQIDA, 2017).

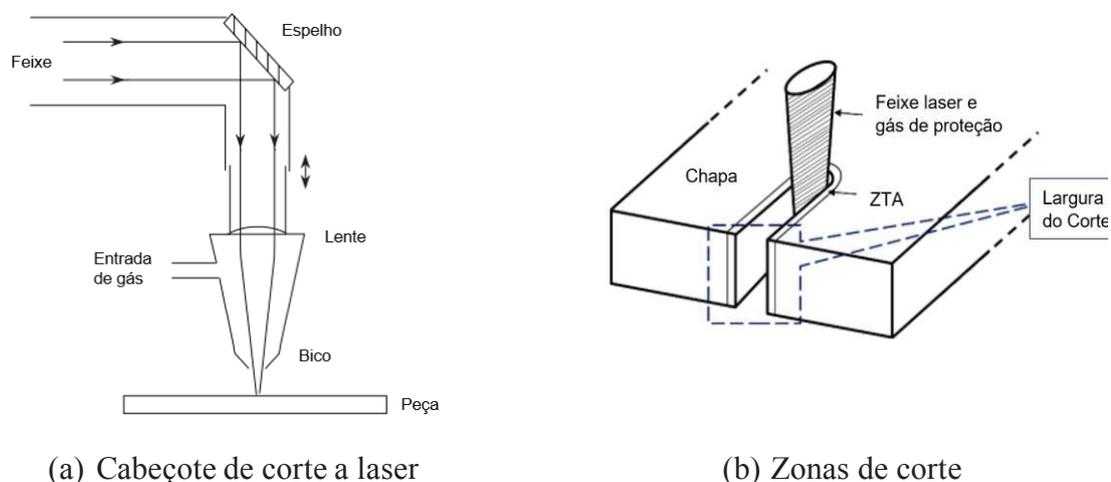


Figura 4. Representações de corte a laser

(Fonte: adaptadas de a) Ion, 2004 e b) Spina, 2017)

Os principais parâmetros que influenciam a qualidade de corte no corte a laser são a potência do laser e a velocidade de corte. Por isso cerca de 86% dos estudos focam nesses dois parâmetros (RADOVANOVIC; MADIC, 2011; SPINA, 2017). Spina (2017) estudou a qualidade de corte a laser em chapas de aço 22MnB5, suas conclusões foram que em um ciclo de trabalho a 100% da capacidade, houve um aumento da largura de corte e da região termicamente afetada quando houve uma redução na velocidade de corte e aumento da potência de corte, um esquema das zonas citadas está representado na figura 4.b.

Tahir e Aqida (2017) afirmam que a potência de corte é um parâmetro a ser estudado, pois uma potência muito baixa não tem força o suficiente para fundir o material, eles também afirmam que para o aço 22MnB5 a velocidade de corte e pressão do gás de proteção não influenciam significativamente a região termicamente afetada.

Segundo Ion (2005) existem poucos materiais que não são cortados quando um feixe focado de laser atravessa o mesmo, principalmente metais por possuírem em sua fase fundida baixa viscosidade. Tecnologias de corte convencionais são inviáveis no caso dos aços de alta resistência, que após a estampagem a quente apresentam um ganho elevado em dureza (MORI *et al.*, 2017). Essa dureza torna as suas propriedades mecânicas, em especial a fadiga, mais sensíveis a falhas superficiais, colocando responsabilidade extra sobre o método de corte (ASAHI, 2002). Com os parâmetros de corte otimizados, como no estudo do Thomas *et al.* (2011) a peça cortada a laser apresenta bordas lisas e bons desempenhos de fadiga. Outras vantagens da utilização de laser para cortes se dão pela sua natureza sem contato, que elimina gastos com desgaste, tempo de preparação e armazenamento de ferramentas (TAHIR; AQIDA, 2017; ION, 2005)

2.5 Ensaios de materiais

O estudo das propriedades mecânicas de um material, o seu comportamento e como elas são determinadas é de extrema importância para entender onde melhor aplicar diferentes materiais e quais as limitações dos mesmos.

2.5.1. Metalografia

Metalografia é a ciência que estuda a estrutura e constituição dos materiais. A visualização pode ser a olho nu ou utilizando ferramentas de ampliação, como microscópios ópticos, microscópios eletrônicos ou técnicas de difração (ASM Handbook, 2004).

Existem algumas técnicas de preparação de amostra que devem ser utilizadas para melhor visualização, elas são diferentes para cada material e situação. As técnicas de preparação são o seccionamento da amostra, o embutimento para nivelar a superfície analisada, lixamento e polimento para obter uma superfície sem defeitos e lisa e por fim um ataque com um ácido reativo para revelar melhor as diferentes microestruturas (ASM Handbook, 2004).

Naderi (2007) estudou a microestrutura do aço 22MnB5, tanto na versão como recebida quanto estampada a quente. Utilizando Nital como ataque químico, as estruturas esperadas estão na figura 5.

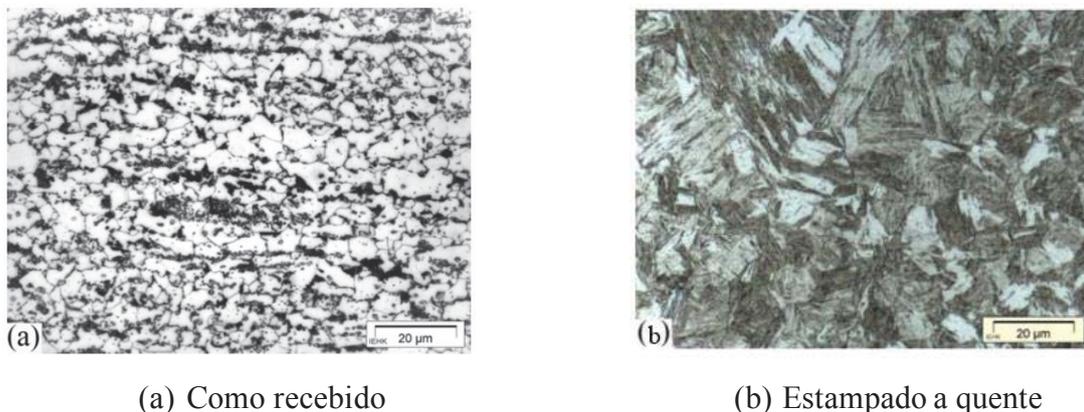


Figura 5. Microscopia Óptica leve do aço 22MnB5

(Fonte: Adaptado de Naderi, 2007)

A microestrutura do aço como recebido é composta por 73/77% ferrita e restante de perlita. Nessa microestrutura a perlita está localizada nos contornos de grão de ferrita, que são equiaxiais devido a espessura pequena da chapa de 1 mm (NADERI, 2007). Já no material estampado a quente, a microestrutura formada é completamente martensítica, com ripas pequenas.

2.5.2. Microdureza

Dureza nos aços é a resistência à deformação causada pela penetração de um material duro. Ela é utilizada para determinar a resistência do material a riscos e desgaste (DIETER, 1981; CALLISTER, 2007). Os ensaios de dureza são muito utilizados pela sua natureza não destrutiva, baixo custo e versatilidade de utilização dos resultados. (KALPAKJIAN, 2009; DIETER, 1981).

Existem diversas escalas em que a dureza pode ser medida, cada escala possui um formato de indentador, para a microdureza Vickers o indentador é uma pirâmide de diamante. O indentador demonstrado aplica uma força pré determinada pelo operador, de 1 a 120 kg (KALPAKJIAN, 2009). A impressão deixada pelo indentador servirá para determinar o valor de dureza através das suas dimensões (KALPAKJIAN, 2009).

Segundo Almeida, Souza e Drunn (2016) uma maneira de avaliar a microestrutura de um material é medir a sua microdureza, no caso do 22MnB5 a maneira de determinar se a tempera após a estampagem foi satisfatória é ao obter valores na ordem de 470HV, indicando estrutura martensítica.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são descritos todos os procedimentos empregados para desenvolver o projeto em questão, efetuar as medidas conforme o caso. Também são descritas as montagens experimentais utilizadas, análises e resultados parciais. Neste capítulo serão descritas as atividades relacionadas ao planejamento e execução dos ensaios, assim como equipamentos e materiais que serão utilizados. Seguindo o fluxograma apresentado na Figura 6.

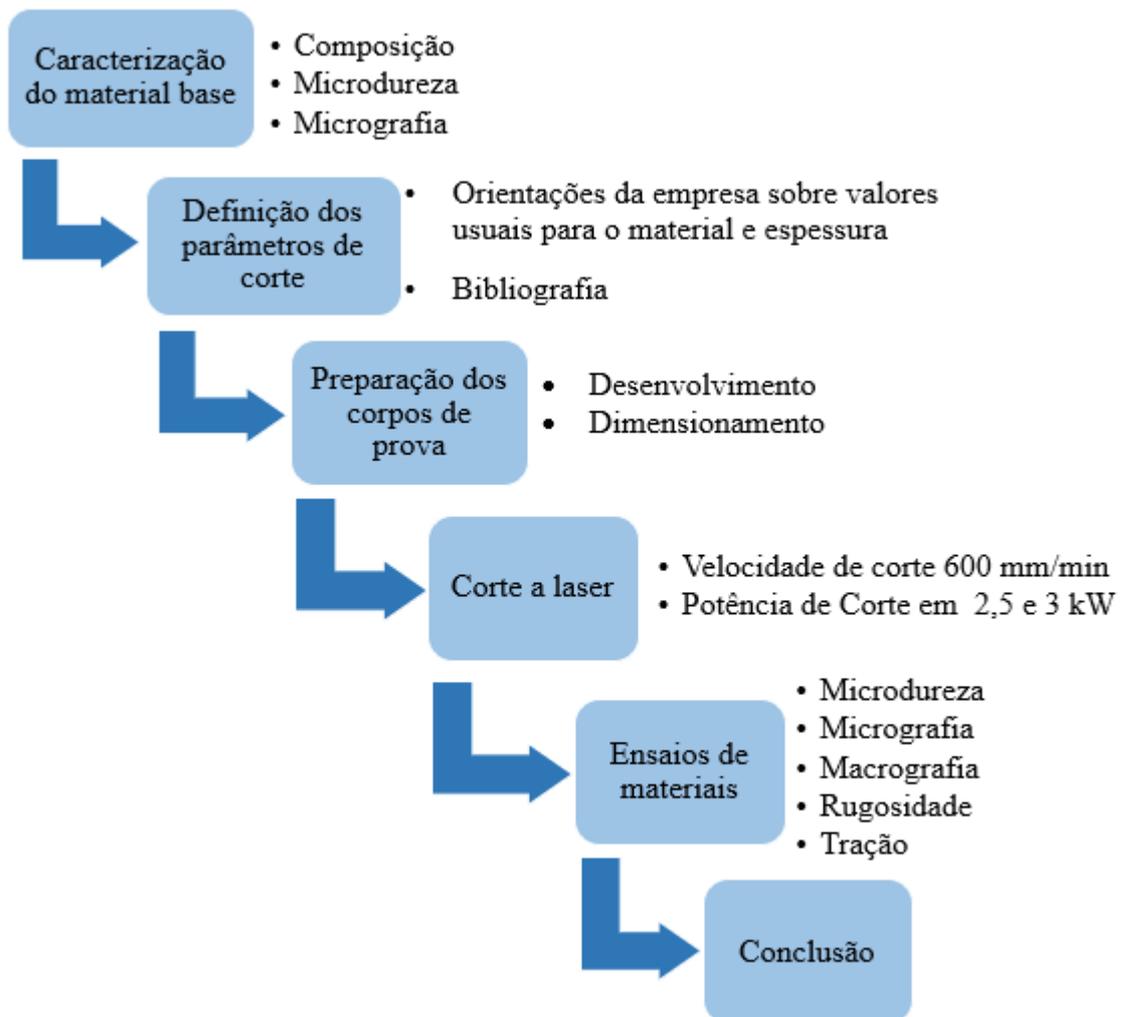


Figura 6. Procedimento metodológico do projeto.

(Fonte: Autor, 2021)

3.1 Caracterização do material de base

O material que será utilizado é o Aço 22MnB5 + NbMo, fornecido pela SSAB e posteriormente estampado pela Bruning Tecnometal Ltda, uma representação do *blank* utilizado pode ser encontrado na figura 7. A estampagem desse material ocorreu com os parâmetros específicos para a espessura das chapas, de 7 mm. Portanto consistiu de um aquecimento do *blank* 950°C em um forno mufla, com um tempo de enxarque de 5 minutos. Posteriormente foi transferido para a prensa. O sistema de refrigeração por água a 5 °C e com vazão de 13 l/min, que manteve a taxa de refrigeração de 27 °C/s. Para a realização da estampagem a quente desse projeto foi utilizado uma prensa hidráulica de 100 Ton, da marca Nowak, modelo PM 100. Um forno elétrico tipo mufla para altas temperaturas, da marca Brasimet, modelo EGH 20/30. E um refrigerador de água (chiller), da marca Maqtermo, modelo R134-a.

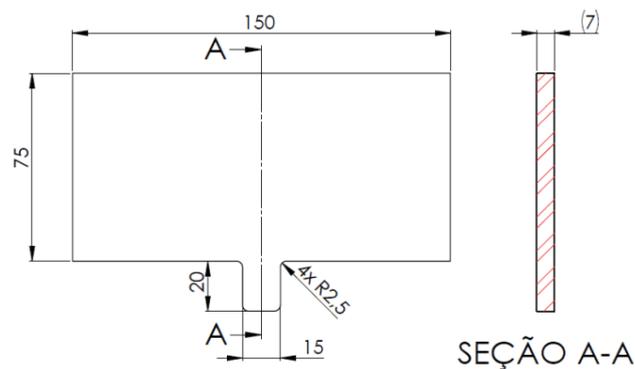


Figura 7. Blank para estampagem a quente.

(Fonte: LINTEC)

Algumas das suas propriedades mecânicas esperadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do Aço ao Boro 22MnB5+NbMo.

Limite de Resistência – LR [MPa]	Limite de Escoamento – LE [MPa]	Alongamento - ϵ %
500-700	350-550	≥ 10

(Fonte: SSAB, 2019)

Para confirmar a composição foi realizada a verificação por espectrômetro de massas, modelo FOUNDRY-MASTER Xline Potência 600 VA.

Além dessas propriedades foram realizados ensaios de microdureza e metalografia do material base.

3.1.1. Microdureza HV

O ensaio realizado foi o de microdureza Vickers com microdurômetro Shimadzu, Modelo HMV-G20ST. A superfície foi preparada adequadamente. Uma carga de 0,2 kgf aplicada por 10s a distância de no mínimo 2 mm entre os pontos para não ocorrer interferência.

3.1.2. Metalografia

Para o ensaio de metalografia as amostras do material base de 22MnB5+NbMo foram coletadas e submetidas ao embutimento, seguido por lixamento e polimento, conforme a norma ASTM E3. Para revelação de microestrutura foram submetidas a um ataque químico com reativo de nital a 3% por 10 segundos. O equipamento utilizado para a visualização foi o Microscópio Zeiss, com amplificação de 1000x.

3.1.3 Rugosidade da superfície de corte

Para obter uma verificação do acabamento superficial de cada tipo de corte foram medidos os valores de rugosidade média na região do corte. O equipamento utilizado foi o Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410.

3.2 Definição do corte

Cada espessura de chapa possui valores de velocidade e potência já preferidos pela indústria, com a definição desses valores será possível variar os mesmos para determinar a influência da energia gerada sobre a qualidade do corte. Para chapas com espessura de 7 mm a Bruning adota uma velocidade de corte de 600 mm/min, potência de corte de 3 kW e nitrogênio como gás de assistência. Para esse projeto foi definido que o parâmetro de corte usual será utilizado como uma das condições estudadas. As outras condições serão: Potência de corte reduzida, 2.5 kW e corte por jato d'água.

3.3 Dimensionamento dos corpos de prova de tração

O primeiro passo do ensaio de tração é a fabricação de um corpo de prova. Para isso existem normas que determinam as dimensões que devem ser utilizadas para a obtenção correta das propriedades. Em casos de materiais com resistências elevadas, como o 22MnB5+NbMo são necessárias algumas adaptações nos corpos de prova para preservar a máquina de ensaios, como a demonstrada na figura 8.

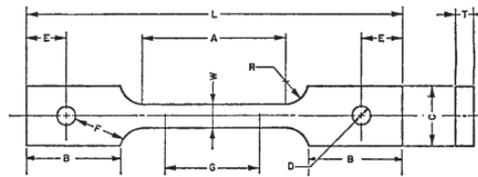


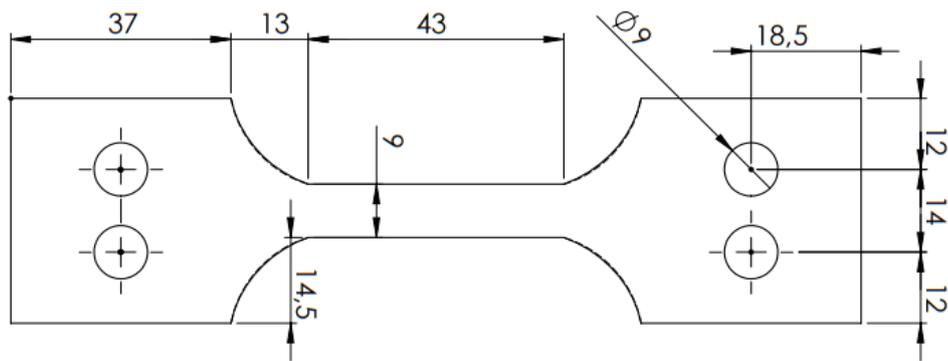
Figura 8. Dimensões dos corpos de prova utilizados em ensaios de tração.

(Fonte: ASTM E8M-00b., 2001.)

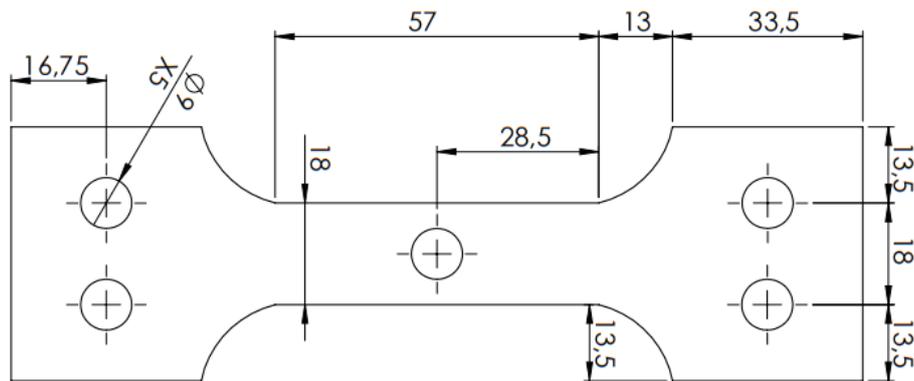
Utilizando a norma ASTM E8M-00b e o artigo indicado pela empresa (STAHL *et al.*, 2020) como base os corpos de prova foram dimensionados. Para a determinação do formato e dimensões foi levado em consideração algumas limitações. Os *blanks* para a estampagem no departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Bruning possuem um formato específico, que está apresentado na Figura 7.

Além da limitação dimensional, o material possui uma resistência e dureza elevada, o que dificulta a sua fixação nas garras do equipamento de tração. Essa limitação foi contornada com a adição de furos e pinos nas extremidades dos corpos de prova. Por último foi levado em consideração que esses corpos de prova seriam recortados por um processo que produz uma ZTA significativa. O tamanho dessa zona poderia afetar a seção transversal da área útil. A norma especifica que a largura da seção útil não deve ser menor do que a espessura e valores na literatura sugerem que a ZTA gerada é inferior a 1 mm, portanto foram utilizadas dimensões que garantem uma área não afetada satisfatória.

Os corpos de prova desenvolvidos para esse projeto estão na Figura 9. Na letra a) está o corpo de prova de tração sem furação central e na letra b) está o corpo de prova com furação central.



(a) Corpo de Prova sem furação central



(b) Corpo de prova com furação central

Figura 9. Corpos de prova de tração.

(Fonte: LINTEC)

Por esse ser um formato não usual de corpo de prova, foi utilizado a ferramenta de simulação do software SolidWorks para simular o ensaio de tração. Essa simulação foi realizada para prever onde se concentrará a maior tensão e assim garantir que a falha irá ocorrer na área útil dos corpos de prova e não nos furos de fixação.

Para garantir que os pinos de fixação irão resistir ao cisalhamento e compressão aos quais serão submetidos durante o ensaio foram realizadas algumas verificações. O limite de resistência a compressão do aço SAE1020 é 410 MPa, a tensão que o pino irá sofrer será calculada através da equação 1, para uma carga máxima de aplicação de 49 kN. Em seguida foi verificada a resistência ao cisalhamento da peça, através da equação 2, que possui um limite de resistência ao cisalhamento de 313,813 MPa.

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

$$\sigma = F \cdot 0,75/A \quad (2)$$

Os pinos de fixação serão de Aço 1020, de formato cilíndrico. Obedecendo as verificações apresentarão um diâmetro de 8,5 mm e comprimento de 13 mm.

3.4 Corte a laser

Realizado pela empresa Bruning Tecnometal Ltda utilizando a máquina TruLaser Cell 8030 TRUMPF laser Fibra 3000 Watts, obedecendo os parâmetros de corte estabelecidos que estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de corte a laser dos corpos de prova.

Metal Base	Espessura	Potência de corte	Velocidade de Corte	Gás de Proteção
22MnB5+NbMo	7 mm	2,5 kW	600 mm/min	Nitrogênio
		3,0 kW		

3.5 Ensaaios

Os ensaios realizados nessa etapa, assim como o que se busca obter com os mesmos será explicado abaixo.

3.5.1. Metalografia

Serão realizados ensaios de microscopia óptica, seguindo os passos de preparação de amostra e utilizando o Microscópio Zeiss, com diferentes ampliações (50, 200 e 500x). a região analisada será a superfície superior a borda cortada.

3.5.2. Tração

O ensaio de tração foi realizado no departamento de Pesquisa & Desenvolvimento Bruning Tecnometal. O equipamento utilizado é a Máquina Universal de Ensaaios EMIC, modelo GR048, a qual tem capacidade de 20 toneladas para tração e compressão. No ensaio de tração a máquina é desenvolvida para provocar um alongamento nas extremidades do corpo de prova, a carga aplicada é ampliada em ritmo constante até ocorrer a fratura da peça. As medidas de alongamento resultante são medidas por um extensômetro. As medidas de carga aplicada e alongamento são registradas por um computador em forma de gráfico. Com esse ensaio será determinado as propriedades mecânicas do material como a tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento.

3.5.2. Microdureza HV

Os ensaios de microdureza serão realizados como mencionado anteriormente, seguindo os métodos convencionais para a escala Vickers. As medições serão de perfil, partindo da borda, ao longo das zonas dos corpos de. Com uma carga de 0,2 kgf e distância de 0,2 mm entre identações será possível medir os valores de dureza nas zonas termicamente afetadas e material base, uma representação de como foi realizada a medição está na Figura 10. Com os resultados será possível avaliar a qualidade de corte através das mudanças de dureza que ocorrerão entre as diferentes zonas. Também será possível comprovar o final da zona termicamente afetada e homogeneidade de microestrutura ao longo da superfície.

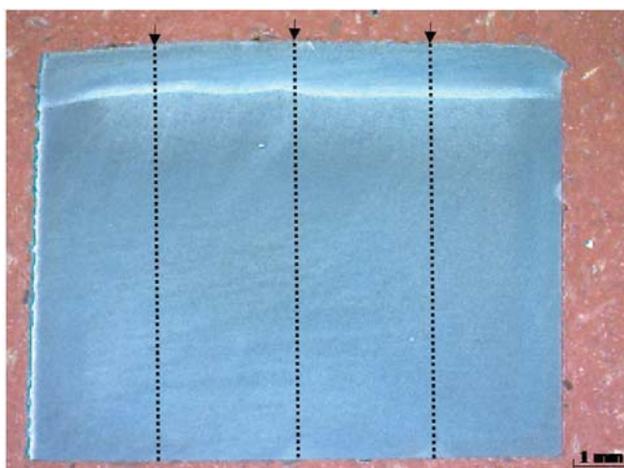


Figura 10. Representação de como foi realizada a medição de microdureza.

(Fonte: LINTEC)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os dados obtidos a partir dos ensaios descritos acima na ordem apresentada pelo fluxograma. Para se obter uma caracterização mais completa do material base que será utilizado foi realizada a verificação da composição química em conjunto com ensaios de microdureza e metalografia óptica.

Para a microdureza do material base foram realizadas 5 medições aleatórias se distanciando 2 mm cada indentação. Os resultados estão na tabela 3.

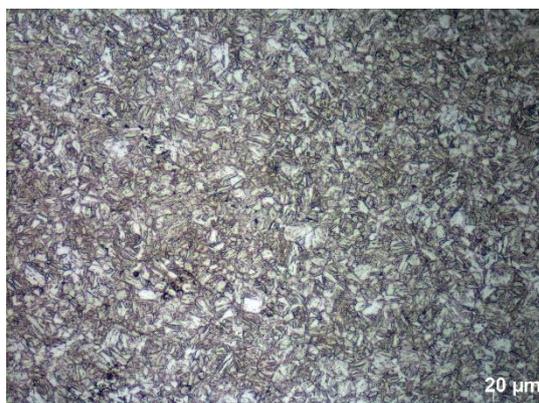
Tabela 3. Resultado de microdureza do material base.

Média das medições (HV0,2)	446,8
Desvio Padrão	32,93
Desvio padrão/total	11,83%

Fonte: LINTEC

Analisando os resultados e comparando os mesmos com a literatura, é possível verificar a presença de um material temperado, com dureza elevada. O esperado para esse material é perto de 470 HV (ALMEIDA; SOUZA; DRUNN, 2016).

Foi realizado a preparação superficial e ampliação de 500x para análise preliminar de microestrutura, mostrado na figura 11.



(a) Ampliação de 500x

(b) Ampliação de 1000x

Figura 11. Análise micrográfica do Aço 22MnB5+NbMo.

(Fonte: LINTEC)

Ao comparar essa figura com a figura 6.b. retirada da literatura é possível verificar uma semelhança. Provavelmente a microestrutura inicial, ferrita e perlita, não foi completamente transformada em martensita, pelo fato de a imagem apresentar bastante da matriz ferrítica, porém formações em ripas são visíveis na imagem.

Para verificar se o material ensaiado possui uma composição química dentro dos limites estipulados pela SSAB para o Aço 22MnB5+NbMo e também verificar se não ocorreu a decarbonetação superficial devido ao processo de estampagem a quente, a composição química foi medida. Os resultados da composição química medida em laboratório e a esperada pela literatura estão expressos na tabela 4.

Tabela 4. Composição Química do Material na literatura e medido.

Elementos de Liga	Literatura	Medição
	%	%
Carbono - C	0,22	0,147
Silício - Si	0,17	0,191
Manganês - Mn	1,17	1,209
Fósforo - P	0,008	0,0083
Enxofre - S	0,005	0,0016
Alumínio - Al	0,014	0,040
Cromo - Cr	0,25	0,197
Boro - B	0,0021	0,00047
Nióbio - Nb	0,047	0,039
Molibdênio - Mo	0,16	0,151
Níquel - Ni	<0,1	0,027

(Fonte: SSAB, 2019 e Bruning Tecnometal)

O teor de carbono medido é um pouco abaixo do valor médio esperado, porém é se encontra dentro da faixa limite. O restante dos teores, mesmo divergindo levemente dos valores tabelados também são satisfatórios.

Alinhando a dureza, as imagens e a composição química a caracterização do material base é finalizada. Os valores e microestruturas encontradas estão dentro do esperado para o material.

Iniciando a análise das regiões de corte, a Figura 12 apresenta as imagens de macrografia e micrografia da superfície superior ao corte, no lado de saída do raio.

Potência de Corte	2,5 kW	3 kW
-------------------	--------	------

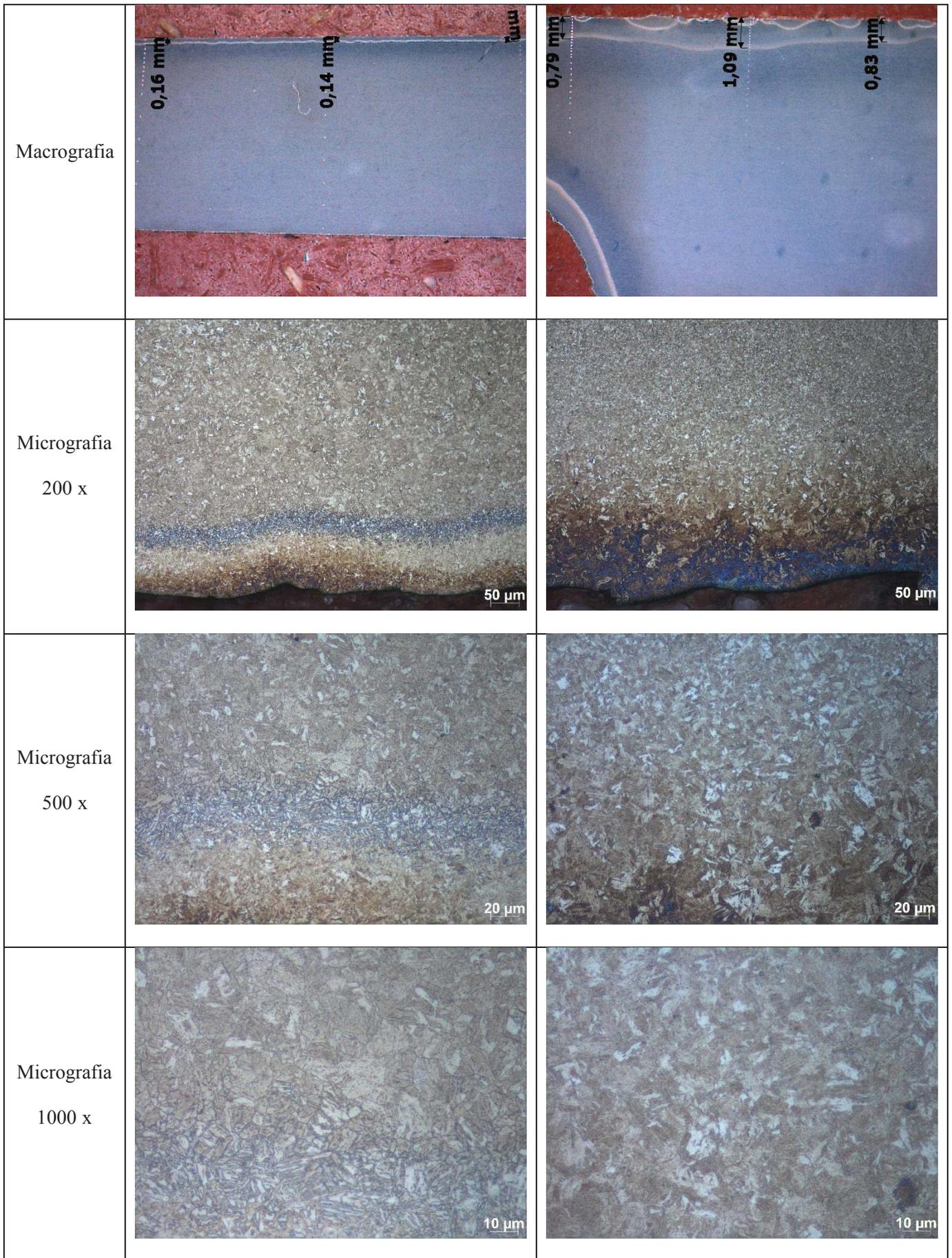


Figura 12. Análise Macrográfica e Micrográfica da zona termicamente afetada superior ao corte a laser.

(Fonte: LINTEC)

Nas imagens de macrografia a zona termicamente afetada está visível e foi medida, esses valores estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Dimensão da ZTA.

Potência de Corte	Espessura média da ZTA	Desvio Padrão
2,5 kW	0,14 mm	0,01
3,0 kW	0,93 mm	0,12

Como é possível observar o corte com a potência de 2,5 kW gerou uma zona afetada de menor dimensão. Por ter uma potência de corte menor, o aporte térmico gerado nessa região foi de menor dimensão do que no caso do corte com potência de 3kW. O desvio padrão entre as medições também foi maior no caso de 3kW, possivelmente pela energia ser maior também.

Nas imagens micrográficas, que focaram na ZTA, a diferença entre a microestrutura mais perto da borda em relação à microestrutura mais central é evidente. As zonas estão bem definidas. Quando a micrografia de 200 x do corpo de prova de 3 kW é analisada, é possível verificar que o corte gerou um crescimento de grão na região da borda, essa zona possui uma espessura média de 0,402 mm. Após essa região a microestrutura aparenta estar se refinando à medida que se aproxima do centro. Isso vai gerar uma diferença nas propriedades mecânicas ao longo da peça. Já no caso do corpo de prova de 2,5 kW a região mais próxima da borda possui uma espessura média de 0,207 mm e posterior a ela não se refina na mesma medida que no corpo de prova anterior.

Para aprofundar a verificação do tamanho de ZTA e relacionar a dureza de uma microestrutura mais refinada com uma que sofreu por aporte térmico elevado, foram realizadas as medições de microdureza na mesma região, seguindo o procedimento descrito na metodologia. Um gráfico foi plotado para apresentar os resultados, esse gráfico está na figura 13.

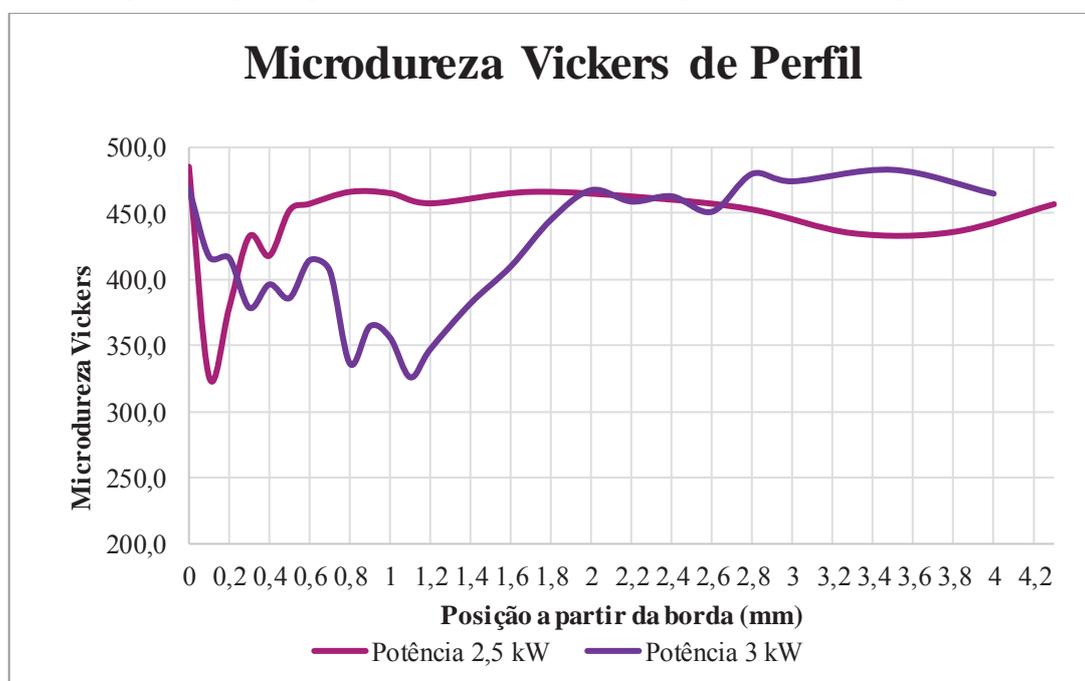


Figura 13. Gráfico de Microdureza Vickers em relação a posição.

Com esse gráfico se busca encontrar uma relação entre microestrutura e dureza. Em ambos corpos de prova é possível notar uma grande variância entre região mais perto do corte e centro. Iniciando pelo corpo de prova de 3 kW é possível notar grande instabilidade na dureza entre a

borda e o menor valor de dureza, encontrado na posição próxima à 1,1 mm. Isso se deve ao aquecimento gerado nessa região na hora do corte. Nas imagens macrográficas foi possível verificar que na posição próximo a 1 mm tem-se uma região branca. Isso é indicativo de uma região pobre em carbono, o que gera uma dureza inferior as demais. Entre esse ponto e a borda existe a região de grande dispersão dimensional dos grãos. É possível visualizar nas imagens micrográficas que ocorreu um crescimento de grão na região com maior contato ao feixe a laser, uma zona termicamente afetada de grão grosseiro que se suaviza à medida que se aproxima do centro. Posterior a zona branca existe uma zona sombreada, pelo gráfico de microdureza é possível determinar um comportamento de dureza ascendente que parte da zona branca até chegar no material base, onde se estabiliza.

Quando a curva do corpo de prova de 2,5 kW é analisada é possível ver um comportamento semelhante. Porém, como era possível ver através das imagens as dimensões são menores. O vale de dureza, nesse caso, também ocorreu na zona branca que se encontra da posição próxima a 0,14 mm. Posterior a isso, na zona sombreada, é possível determinar o mesmo comportamento ascendente até o material base. Entre a borda e a zona branca a instabilidade microestrutural demonstra ser menor, o refinamento do grão, de um grão grosseiro até um grão refinado aparenta acontecer de maneira mais suave.

A rugosidade média da superfície de corte para todas as condições de corte está apresentada na tabela 6.

Tabela 6. Rugosidade da Superfície de Corte.

Condição de Corte	Rugosidade Média (Ra)
Jato d'água	2,401 μm
Laser com potência 2,5 kW	5,802 μm
Laser com potência 3 kW	6,828 μm

(Fonte: LINTEC)

A condição de corte com potência de 3 kW apresentou o pior acabamento.

Os ensaios de tração foram realizados utilizando os corpos de prova dimensionados posteriormente e seguindo a metodologia criada para um material com elevada resistência mecânica. Os ensaios foram realizados em dois locais, o primeiro foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da UPF, devido a um problema no equipamento esse foi um ensaio que serviu somente como validação do método. O restante dos ensaios apresentados foi realizado em conjunto com o departamento de Pesquisa & Desenvolvimento Bruning Tecnometal. Devido a uma divergência no dimensionamento das garras da máquina de ensaios da empresa e da universidade, a utilização dos pinos de fixação não foi satisfatória para os ensaios realizados na Bruning Tecnometal. O formato e tamanho dos dentes de fixação das garras causaram um esforço elevado sob os pinos, fazendo com que os mesmos falhassem antes do corpo de prova. Devido a esses mesmos dentes de fixação foi possível realizar os ensaios de tração sem os pinos de material dúctil.

Os resultados de alongamento, estrição, resistência ao escoamento e resistência máxima de tração estão apresentados na Tabelas 7.

Tabela 7. Dados dos ensaios de tração.

Corpo de Prova	Alongamento	Estricção	Tensão de Escoamento	Tensão Máxima
Tração com Furação corte 2,5 kW	4,52 %	11,74 %	1255,78 Mpa	1316,34 MPa

Tração com Furação corte 3 kW	4,59 %	14,7 %	1201,84 Mpa	1233,25 MPa
Tração com Furação Jato d'água	4,62 %	18,71 %	1342,40 Mpa	1394,05 MPa
Tração sem Furação Jato d'água	13,87 %	25,24 %	1183,42 Mpa	1422,76 MPa
Tração sem Furação corte 3 kW	11,54 %	20,10 %	1194,44 MPa	1311,98 MPa

(Fonte: LINTEC)

Ao comparar os tipos de corte realizados nota-se que os corpos de prova de corte a laser apresentam um alongamento menor do que os cortados a jato d'água. Isso pode ser explicado pela qualidade do acabamento de cada tipo de corte. Os cortes a laser são conhecidos por não apresentarem uma superfície de corte lisa, e sim uma que apresenta riscos e sulcos que podem ser responsáveis por essa diminuição no alongamento.

Seguindo os ensaios de tração, foi realizada uma análise estatística de variância com as médias das tensões máximas e tensões de escoamento encontrados. Com esses dados foi plotado um gráfico de barras demonstrando os erros padrões para cada condição. Na Figura 14.a e 14.b estão apresentados os resultados de tensão máxima para ambos formatos de corpo de prova. Na Figura 15.a e 15.b estão apresentadas as tensões de escoamento. Os gráficos de força x deslocamento plotados pela máquina de tração estão apresentados no Anexo -A.

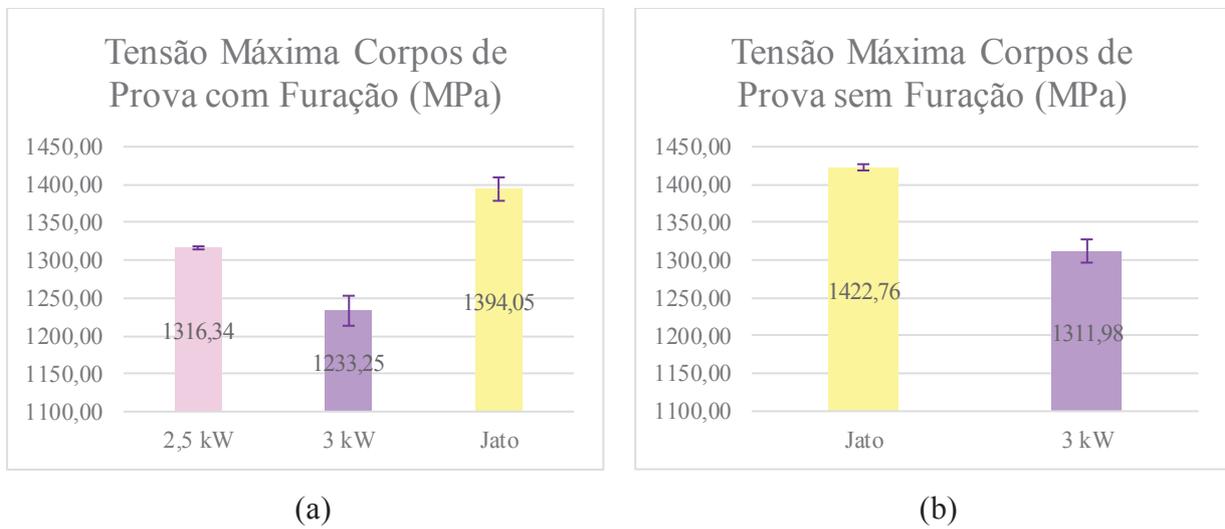


Figura 14. Valores médios de tensão máxima.

(Fonte: LINTEC)

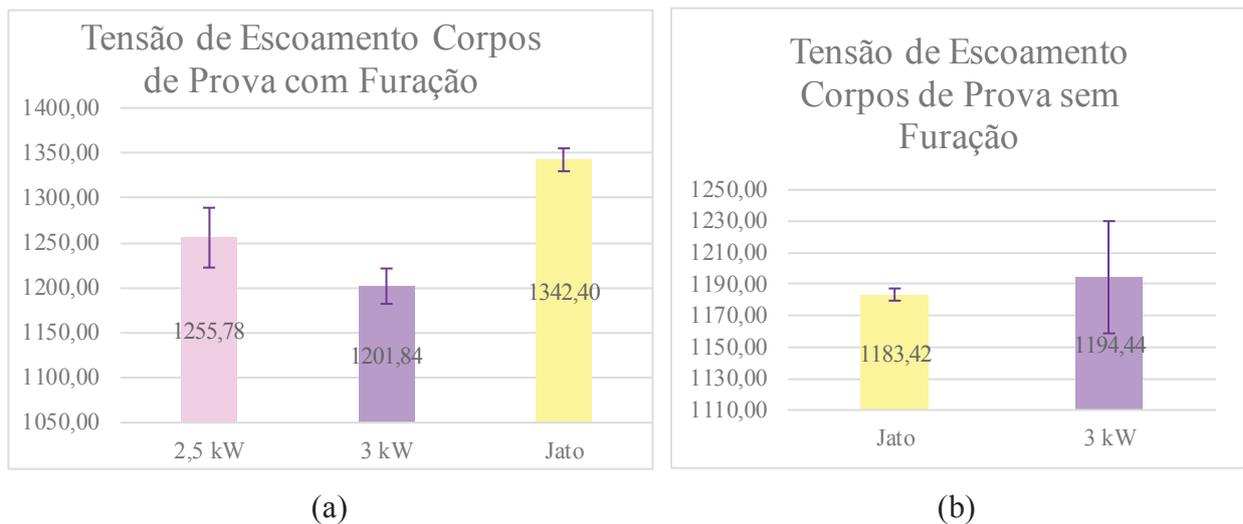


Figura 15. Valores médios de tensão de escoamento.

(Fonte: LINTEC)

As resistências máximas de tração em todas as condições apresentaram valores na faixa esperada, por ser um material que sofreu o processo de estampagem a quente. Ao comparar os tipos de corte, o que apresentou uma variância menor em seus resultados foram os corpos de prova cortados pelo processo de Jato d'água. Isso se dá pelo acabamento da superfície de corte ser melhor nesse processo e pelo fato de o aporte térmico não ser suficiente para gerar uma zona com mudança microestrutural. O corte a laser com a potência usual, 3 kW apresentou um erro padrão superior a todos os outros cortes, isso explica a média de resistência ao escoamento maior, que está apresentada na Figura 15.b, a resistência nesse caso variou a ponto de descaracterizar os resultados. A potência de 2,5 kW, também apresentou uma variância elevada, porém ao ser comparada com a outra condição de corte a laser apresentou uma média de resistência a tração maior. O que causou uma variância menor e tensões maiores no corte por jato d'água foi a falta de uma zona termicamente afetada, que gera um concentrador de tensão devido às mudanças bruscas de microestrutura. O que pode ter afetado os resultados dos corpos de prova de 3 kW é a qualidade do acabamento superficial ser inferior ao corte com potência reduzida e a presença de uma ZTA de maior dimensão e com zonas bem definidas.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos testes preliminares foi possível caracterizar o material base e foi possível concluir que a estampagem a quente foi satisfatória. Os limites de dureza, na faixa de 446,8 HV0,2, e composição química estavam dentro do esperado para o 22MnB5+NbMo. Com esses valores foi possível confirmar a presença de martensita na microestrutura e visualizar as suas ripas nas imagens.

Os corpos de prova dimensionados especialmente para o ensaio de tração cumpriram a sua proposta. Todas as falhas ocorreram na área útil, sem que ocorresse alargamento dos furos de fixação quando os mesmos tiveram que ser utilizados. A metodologia de fixação desenvolvida, composta de dois furos nas extremidades dos corpos de prova e pinos de Aço 1020, funciona, porém, deve ser levado em consideração as garras da máquina de tração e o dispositivo de agarre de cada uma delas. Para ensaios futuros o comprimento dos pinos será reduzido para deixá-los mais robustos.

Ao comparar os tipos de corte, laser 2,5 kW e 3 kW e jato d'água é possível tirar algumas conclusões. O tamanho da zona termicamente afetada e o acabamento interferem diretamente no

comportamento do material. O corpo de prova que apresentou a ZTA mais espessa, o com potência de 3 kW, também apresentou maior variância nos seus resultados de dureza. Quando se tratou de resistência a tração a média de suas medições de tensão máxima foi a menor entre as três e em relação a tensão de escoamento apresentou uma variância elevada a ponto de descaracterizar o ensaio. Já as suas imagens apresentaram uma microestrutura com um refinamento mais pronunciado, zonas com grão de diferentes tamanhos e durezas. Já no corte com 2,5 kW a ZTA teve uma dimensão inferior, apresentou um refinamento mais suave de microestrutura na região afetada pelo calor. A variância nos ensaios de tração foi menor do que em 3 kW e a magnitude dos resultados foi maior.

Com essa análise é possível concluir que a espessura da ZTA é tão influente na resistência mecânica quanto o acabamento. Ambos os cortes a laser apresentaram resultados de resistência inferiores e variância maior do que os corpos de prova cortados por jato d'água.

Em relação à dureza, o corpo de prova cortado a laser com potência de corte de 2,5 kW apresentou menor variância e instabilidade. Em ambos os resultados é possível distinguir as durezas consequentes do aporte térmico elevado e definir as diferentes zonas. Através das imagens foi possível apontar como causador desses picos e vales de dureza aos diferentes tamanhos de grãos presentes, que vão se refinando à medida que se afastam da borda cortada.

Os trabalhos futuros terão um foco em análise de fratura e propriedades de fadiga desses mesmo materiais e corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“Advanced High-Strength Steels Application Guidelines”, Versão 6.0, WorldAutoSteel, www.woerldautosteel.org, Abril 2017.

ASTM E8M-00b. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]1 V 03.01, 2001.

ALMEIDA, Diego Tolotti de; SOUZA, João Henrique Corrêa de; DRUNN, Jonathan. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA TAXA DE RESFRIAMENTO NO PROCESSO DE PRESSHARDENING EM CHAPAS DE GRANDE ESPESSURA EM AÇO 22MnB5. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 13, n. 4, p. 346–355, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.1088>

ASAHI, Hitoshi. Effects of Mo addition and austenitizing temperature on hardenability of low alloy B-added steels. **ISIJ International**, v. 42, n. 10, p. 1150–1155, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1150>

BAKER, T. N. Microalloyed steels, **Ironmaking and Steelmaking**, v. 43, n. 4, p. 264–307, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000063>

CALLISTER, William D. Materials Science and Engineering: An introduction. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ÇETIN, Baris; MEÇO, Halim. Metallurgy of Steels. In: Billur E. (eds) **Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels**.: Springer International Publishing, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98870-2>

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.

- DEMERI, Mahmoud Y. *Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications*. 1 ed. Materials Park: **ASM International**, 2013.
- DIETER, George E. *Metalurgia Mecânica*. 2 ed. Rio de Janeiro: **Guanabara Dois**, 1981.
- FAN, D. W. *et al.* Critical review of hot stamping technology for automotive steels. **Materials Science and Technology Conference and Exhibition, MS and T'07 - "Exploring Structure, Processing, and Applications Across Multiple Materials Systems"**, v. 1, n. January, p. 98–109, 2007.
- FILHO, André Itman *et al.* Influence of niobium and molybdenum on mechanical strength and wear resistance of microalloyed steels. **Materials Research**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 1029–1034, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1101>
- FUHR, Tiago Alexandre. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO 22MnB5 + NbMo DE GRANDE ESPESSURA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO 22MnB5 + NbMo DE GRANDE ESPESSURA. p. 123, 2018.
- GORNI, A A. Aços avançados de alta resistência : microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte & Conformação de Metais**, p. 26-57, 2008.
- GORNI, A A. Novas tendências no processo de estampagem a quente. **Corte & Conformação de Metais**, 2011.
- GORNI, A. A. Novas tendências para o processo de estampagem a quente. **Corte & Conformação de Metais**, p. 62–77, 2010. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Jun2010.pdf
- HAN, Futao *et al.* Effect of molybdenum and chromium on hardenability of low-carbon boron-added steels. **Metals and Materials International**, v. 14, n. 6, p. 667–672, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3365/met.mat.2008.12.667>
- HANNULA, Jaakko *et al.* Evaluation of Mechanical Properties and Microstructures of Molybdenum and Niobium Microalloyed Thermomechanically Rolled High-Strength Press Hardening Steel. **Jom**, v. 71, n. 7, p. 2405–2412, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03478-9>
- HEIN, P. A Global Approach of the Finite Element Simulation of Hot Stamping. **Advanced Materials Research**, v. 6–8, p. 763–770, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.763>
- ION, John C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, procedure and industrial application*. 1 ed. **Elsevier**, 2005.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. *Manufacturing Engineering and Technology*. 6 ed. **Pearson**, 2009.
- KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2103–2118, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019>
- KRAUSS, George. *Steels: Processing, structure, and performance*. 2 ed. Materials Park: **ASM International**, 2015.
- MERKLEIN, Marion *et al.* Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review.

Journal of Materials Processing Technology, v. 228, p. 11–24, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.023>

"Metallography and Microstructures", Volume 9 of the *ASM Handbook*. *ASM International*, 2004.

MORI, K. *et al.* Hot stamping of ultra-high strength steel parts. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, p. 755–777, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.007>

NADERI, Malek. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels, Doctoral Theses. n. November, p. 190, 2007.

RADOVANOVIC, Miroslav; MADIC, Milos. Experimental investigations of CO2 laser cut quality: a review. **Revista de Tehnologii Neconventionale**, v. 15, n. 4, p. 35, 2011.

SPENA, Pasquale Russo. CO2 laser cutting of hot stamping boron steel sheets. **Metals**, v. 7, n. 11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met7110456>

STAHL, Jens *et al.* Effect of one- And two-stage shear cutting on the fatigue strength of truck frame parts. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, [s. l.], v. 4, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmmp4020052>

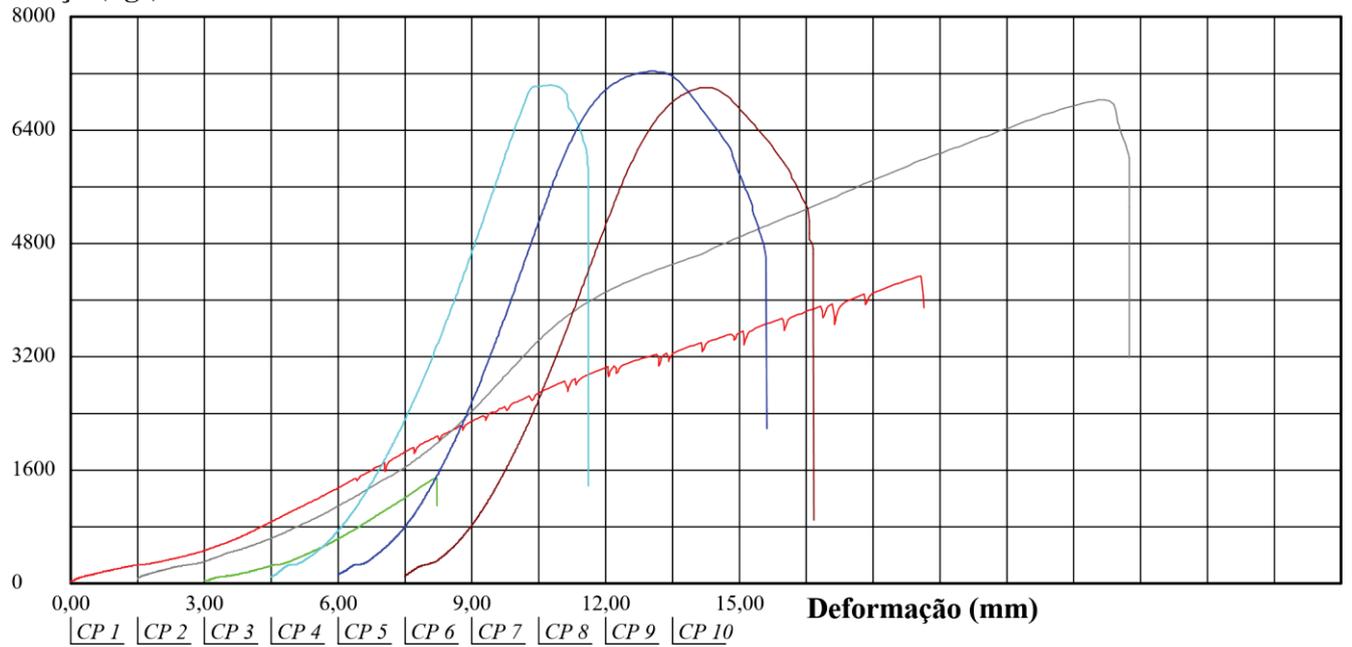
TAHIR, Abdul Fattah Mohd; AQIDA, Syarifah Nur. An investigation of laser cutting quality of 22MnB5 ultra high strength steel using response surface methodology. **Optics and Laser Technology**, v. 92, n. June 2016, p. 142–149, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.01.005>

THOMAS, *et al.* The influence of mechanical and CO2 laser cut-edge characteristics on the fatigue life performance of high strength automotive steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, p. 263-274, 2011. Disponível em: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.018

TURETTA, Alberto. Investigation of Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of Quenchenable High Strength Steels in Hot Stamping Operations. Doctoral Theses- Università degli Studi di Padova, 2008.

Mínimo	1502	275,8	268,0	12,41
Máximo	7234	1355	1288	52,95

Força (kgf)



Observação: CP1 ao CP4= TSFC3-1 CP5= TSFC3-2 CP6= TSFC3-3