UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

TAMY OSHIRO MATAYOSHI

Estampagem a quente do aço ao boro 22MnB5

São Paulo

2016

TAMY OSHIRO MATAYOSHI

Estampagem a quente do aço ao boro 22MnB5

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências**

**Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais**

**Orientador: Professor Livre-Docente
André Paulo Tschiptschin**

São Paulo

2016

Catálogo-na-publicação

Matayoshi, Tamy Oshiro

Estampagem a Quente do Aço 22MnB5 / T. O. Matayoshi -- São Paulo, 2016.

67 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Estampagem a quente 2.22MnB5 3.Aço de alta resistência
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

“O futuro pertence à aqueles que acreditam

na beleza de seus sonhos”

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio, carinho e suporte.

Agradeço ao meu companheiro, Michael, por todo todo amor, dedicação e atenção.

Agradeço aos meus amigos que me apoiaram e aconselharam em muitos dias de dificuldade.

Sem essas pessoas, não teria conseguido chegar até o final do mestrado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. André Paulo Tschiptschin, pela orientação, ajuda e conselhos.

Agradeço ao colega Anderson que desde que iniciei o trabalho me ajudou e trabalhou ao meu lado.

Agradeço aos colegas de departamento e laboratório, principalmente ao Guilherme, que me ajudaram em muitos momentos.

Sem essas pessoas, não teria conseguido desenvolver a dissertação.

Agradeço à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade de desenvolver a dissertação.

Agradeço a CAPES pela bolsa cedida a mim para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a FAPESP por ter financiado este projeto.

RESUMO

O processo de estampagem à quente é um dos métodos possíveis para a conformação de aços de alta resistência. Para isso é necessário o estudo das propriedades termomecânicas para obtenção de parâmetros ótimos para a construção de uma linha de estampagem eficiente. Neste trabalho, foram realizados ensaios para determinar os parâmetros para a estampagem a quente do aço 22MnB5, e posteriormente a construção de uma linha de estampagem a quente completa. Obteve-se ao fim do processo, uma microestrutura martensítica com dureza de 430 HV com resistência à tração de aproximadamente 1365 MPa.

Palavra-chave: 22MnB5, Aço de alta resistência, estampagem a quente.

ABSTRACT

The hot stamping process is one of the possible ways to high strength steel conformation. In this work, study of 22MnB5 steel thermomechanical properties was performed in order to obtain optimum parameters to hot stamping process. After, a complete hot stamping line was built. At the end of hot stamping process it was possible to obtain a martensitic microstructure with 1365 MPa strength resistance and 430 HV.

Key-words: 22MnB5, high strength steel, hot stamping.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. ESTAMPAGEM A QUENTE	4
3.1.1. Aquecimento.....	7
3.1.2. Projeto da ferramenta e conformação	10
3.1.3. Têmpera	12
3.2. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA	13
3.2.1. Elementos de liga	13
3.2.2. Aço ao boro	14
3.2.3. Revestimento de alumínio-silício	16
3.3. ENSAIOS MECÂNICOS E TERMOMECÂNICOS.....	17
3.3.1. Índice de anisotropia	17
3.3.2. Dilatometria	18
3.3.3. Simulador termomecânico	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1. AÇO 22MnB5	25
4.2. ÍNDICE DE ANISOTROPIA.....	25
4.3. DILATOMETRIA	26
4.4. LINHA DE ESTAMPAGEM.....	27
4.5. ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	30
4.6. MEDIÇÃO DE DUREZA	30

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. ÍNDICE DE ANISOTROPIA.....	31
5.2. DILATOMETRIA	31
5.3. ESTAMPAGEM A QUENTE	47
6. CONCLUSÕES PARCIAIS	61
7. BIBLIOGRAFIA.....	63

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é um dos processos de conformação mecânica mais utilizados para obtenção de peças e produtos que podem ser aplicados nas mais diversas áreas. Grande capacidade de produção, menor custo de produção, comparado a outros métodos, solidez das peças obtidas e grande precisão dimensional são alguns dos motivos que fazem a estampagem possuir vasta aplicação na indústria.

Devido a novas pesquisas e desenvolvimento de novos materiais para serem trabalhados, materiais utilizados para a fabricação de ferramentas e estabelecimento de dados e normas técnicas mais precisas, as possibilidades de sistemas de trabalhos aumentaram e melhoraram.

Entretanto, novos desafios também surgem e novos objetivos são traçados para satisfazer inúmeras necessidades, como diminuição do consumo de combustível, maior segurança para passageiros e pedestres, menor agressão ao meio ambiente e maior resistência mecânica das peças e componentes, tudo isso a um custo não muito elevado.

Este trabalho abordará um estudo sobre a estampagem a quente, um processo relativamente novo que pode trazer inúmeras vantagens e soluções para as necessidades atuais.

A idéia do trabalho é simular tempos e temperaturas de tratamentos térmicos, visando avaliar janelas de processo, para a estampagem a quente (*hot stamping*), também chamado de têmpera no molde (*die quenching*). Para tanto, serão realizados simulações e ensaios em dilatômetro de têmpera, utilizando parâmetros sugeridos por autores^{[1]-[7]} em suas pesquisas (temperatura e tempo de austenitização e velocidade de resfriamento) visando otimizar o processo de conformação mecânica a quente (*hot stamping*) e têmpera no molde (*die quenching*) a ser realizado neste trabalho.

Utilizando uma linha de estampagem, similar ao da indústrias automobilísticas, será realizado o processo de estampagem a quente de uma

peça em formato de calha, utilizando os parâmetros determinados nas simulações físicas em dilatômetro. Através da análise dos resultados de ensaios metalográficos e mecânicos serão estabelecidos os parâmetros ideais para este processo.

1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar o processo de estampagem a quente de um aço ao boro (22MnB5) e obter parâmetros ótimos para este processo tais como tempo e temperatura de austenitização, velocidade de resfriamento da chapa e velocidade de fechamento da ferramenta.

Desenvolver uma linha de estampagem a quente para uma peça em formato de calha. A peça será estampada com uma ferramenta de estampagem apropriada com sistema de resfriamento para que se possa temperá-la dentro da ferramenta. O sistema deve contar também com forno para a austenitização do blank.

Após a conformação da peça na linha de estampagem, serão retirados corpos de prova da peça estampada para análises em ensaios de dureza, tração e metalografia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTAMPAGEM A QUENTE

A produção de peças a partir de aços avançados de alta resistência (AHSS) tem se mostrado como possível solução para reduzir o peso do veículo, emissão de gases poluentes e melhora na segurança de pedestres e passageiros, pois esses aços podem produzir peças mais resistentes com espessuras menores, diminuindo seu peso.^[1] Entretanto, apesar de peças de aços de alta resistência terem propriedades mecânicas superiores, operações de estampagem nesses materiais se tornam difíceis devido a alta resistência à conformação. Com o aumento da resistência da chapa, a carga para a conformação aumenta e assim o retorno elástico (*springback*) se torna maior, particularmente para esse aço. Além disso, existem problemas adicionais tais como baixa moldabilidade, vida curta da ferramenta e ocorrência de fraturas.^[2] Com o aquecimento das chapas de metal, as operações de estampagem se tornam mais fáceis devido à diminuição na resistência à conformação mecânica e o aumento na ductilidade. A estampagem a quente de chapas de aços temperáveis se torna, então, atrativa para conformação de peças de aços de alta resistência.^[1]

A estampagem a quente surgiu na empresa sueca Plannja em 1977 (sob a patente GB1490535, 1977), que usou o processo para fabricação de lâminas de serra e lâminas cortadoras de grama. Somente em 1984 começou a ser implementado na indústria automobilística quando a companhia Saab Automobile AB aplicou este conceito no SAAB 9000, o primeiro veículo que adotou peças de aço contendo boro fabricadas por este processo. As peças estampadas a quente, como mostrado na Figura 1, são aplicadas na indústria automotiva principalmente para componentes de chassi-carroceria monobloco, como a coluna A, coluna B, para-choques, entre outros, sendo que o número de partes produzidas por este processo aumenta a cada ano.^[1] A estampagem a quente tem as seguintes vantagens: ^{[1], [2], [4], [5], [8], [9]} :

1. A carga para a conformação é consideravelmente reduzida devido a diminuição do limite de escoamento;
2. O retorno elástico é quase nulo (*springback*);

3. A conformabilidade é amplamente aumentada devido ao aumento na ductilidade;
4. A resistência à tração final de peças estampadas a quente é de aproximadamente 1500 MPa devido ao tratamento de têmpera no interior da matriz.

A conformação plástica em temperaturas elevadas permite obter geometrias complexas devido à elevada conformabilidade a quente do material, proporcionada pela fase austenítica de alta deformabilidade. Por outro lado, existem também desvantagens do processo de estampagem a quente que podemos citar são^{[1], [2], [5]}:

1. A carepa na superfície de peças estampadas a quente é notável devido ao aquecimento e descarbonetação, e por isso pode ser necessário jateamento para remover essa camada;
2. Para evitar o aparecimento de carepa na superfície dos materiais estampados a quente, devido à oxidação a altas temperaturas, têm sido utilizado revestimento de alumínio-silício^{[1], [4], [8], [9]} no entanto, esses revestimentos são relativamente caros;
3. A produtividade é baixa devido ao tempo de manutenção do blanque no forno e por causa do tempo necessário para a têmpera na matriz;
4. A tecnologia para execução do processo geralmente envolve equipamentos de grande porte, com custos elevados;
5. Devido à necessidade de aquecimento, a energia utilizada é maior.

Figura 1: Peças estampadas a quente em um carro médio.^[1]

Os processos de estampagem a quente existem atualmente em duas diferentes variantes principais: o método de estampagem a quente direto e o indireto. No processo de estampagem a quente direto, o blanque é aquecido em um forno, transferido para a matriz e subsequentemente conformado e temperado na ferramenta fechada (figura 2a). O processo de estampagem a quente indireto é caracterizado por uma pré-conformação a frio no blanque quase completa, após este processo o mesmo passa por austenitização e posterior processo de calibração de medidas e têmpera (figura 2b). Neste trabalho será utilizado o processo de estampagem a quente direto.

Figura 2: Cadeia de processos básicos da estampagem a quente (a) direto e (b) indireto. Fonte: Karbasian e Tekkaya (2010)

Muitos estudos que focam o processo e materiais da estampagem a quente foram publicados na última década^{[9]–[13]}. Esses estudos são sumarizados e classificados em 3 grupos:

- Que tratam das características do processo de estampagem a quente;
- De simulação numérica da estampagem a quente;
- Do desenvolvimento do processo de estampagem a quente e seus materiais, como no caso desse trabalho.

Muitas pesquisas^{[8], [13]–[15]} estão interessadas nas características da estampagem a quente como as propriedades de escoamento, conformabilidade a quente e curvas limites de conformação do aço 22MnB5, a transferência de calor na estampagem a quente, o comportamento de desgaste de ferramentas e medição do coeficiente de atrito.^[4] Neste trabalho, foram estudados os efeitos dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas e microestruturais formadas durante a estampagem a quente.

2.1.1. Aquecimento

O processo de estampagem a quente começa com o aquecimento do blank até sua temperatura de austenitização. Uma austenitização homogênea do blank é pré-requisito para que durante a têmpera se obtenha uma transformação martensítica total.^[1] De acordo com o diagrama de fase do aço 22MnB5 as temperaturas Ac_1 e Ac_3 do aço 22MnB5 são 740°C e 860°C, respectivamente. Uma temperatura maior que a Ac_3 deve ser aplicada para aquecer o blank para o processo de estampagem a quente.^[4]

A resistência a tração máximo de 1519 MPa ocorre quando o material é temperado de uma temperatura de austenitização de 900°C. De acordo com Guler et al.,^[16] uma temperatura de austenitização de 850°C também pode atingir uma alta resistência se o tempo de manutenção no forno for maior que 20 minutos, entretanto, um alto tempo de austenitização não é conveniente quando o objetivo é uma produção em série.

A dureza do aço 22MnB5 como entregue é por volta de 150 HV₃. Aços com dureza maior que 450HV₃ apresentam microestruturas totalmente

martensíticas; já amostras com dureza entre 200 HV₃ e 400 HV₃ apresentam uma microestrutura heterogênea, contendo martensita, bainita, ferrita e outras fases.^[1]

Na figura 3 observa-se que a tendência da dureza vs. temperatura de austenitização é similar ao da resistência à tração, o que sugere que a dureza e a resistência são controladas pelas determinantes microestruturais semelhantes.

Figura 3: (a) Resistência a tração e alongamento (b) e dureza Vickers das amostras aquecidas em diferentes temperaturas de austenitização.^[1]

Para a determinação da janela de processo ideal, testes de recozimento foram realizados por Lechler e Merklein^[17] considerando temperatura e tempo de austenitização. Nesses testes, as amostras foram temperadas através de uma pressão de contato metálico total de 40 MPa nos dois lados. O tempo mínimo de austenitização em diferentes temperaturas e diferentes espessuras de chapa para atingir a dureza máxima de 470 HV são mostradas na Figura 4.^[1]

Figura 4: (a) Influência do tempo e temperatura de austenitização tempo para atingir dureza máxima de 470HV em função da espessura da chapa (b) influência da espessura da chapa=1,75 mm. ^[17]

O resultado desse estudo mostra claramente a dependência da temperatura de austenitização (Figura 4a) e da espessura (Figura 4b) no tempo mínimo de tratamento térmico em relação a uma austenitização homogênea do aço temperável 22MnB5. Zhou et. Al.,^[4] encontraram em sua pesquisa que um tempo de permanência de 3 minutos em um forno de temperatura 950°C como sendo suficiente para obter uma quantidade máxima de martensita em uma amostra temperada com uma dureza máxima de 470 HV. Com a diminuição da temperatura do forno, o tempo de duração da austenitização aumenta.

A investigação de Lechler et. al.,^[11] mostrou que o procedimento de aquecimento do blanque tem influência nas propriedades mecânicas finais da peça, no tempo de processo e na relação custo-benefício da estampagem à quente. Um tempo curto de aquecimento que garanta temperatura homogênea em todo o blanque é um dos principais objetivos da estampagem a quente. O blanque pode ser aquecido usando diferentes fenômenos térmicos observados na figura 5: radiação em forno, indução e condução, sendo na indústria o forno de soleira de rolos (walking beam) é o utilizado atualmente.^[1]

Figura 5: Sistema de aquecimento (a) forno de soleira de rolos (b) aquecimento por indução (c) aquecimento por condução.^[1]

2.1.2. Projeto da ferramenta e conformação

Na intenção de evitar resfriamento significativo do blanque antes da conformação, o mesmo deve ser transferido o mais rápido possível do forno para a prensa. Posteriormente, a conformação deve ser completa antes do início da transformação martensítica. Assim, um fechamento mais rápido da ferramenta e processo de conformação eficiente são requisitos para um controle de processo bem sucedido. Após a conformação, a peça é temperada com a ferramenta fechada, que é resfriada por canais de água para transferir o calor para fora do sistema da ferramenta.^[1]

Para um resfriamento eficiente, a ferramenta tem que ser projetada visando se atingir uma taxa máxima de resfriamento e distribuição de temperatura homogênea em toda a peça estampada. Consequentemente, o sistema de resfriamento tem que ser integrado na ferramenta. Entretanto, a geometria dos dutos de resfriamento próximos ao contorno da ferramenta é restrito devido as restrições na perfuração e para um resfriamento eficiente, esses dutos devem ser colocados o mais próximo possível mas suficientemente longe da superfície para evitar deformação na ferramenta durante o processo de estampagem a quente. Para garantir boas características dos desenhos da peça, todas as partes ativas da ferramenta (punção, matriz e prensa chapa) precisam ser projetados para resfriar suficientemente.^[18]

Hoffmann^[18] selecionou diâmetros para os dutos de 8 mm e 12 mm para o punção, 12 mm e 16 mm para a matriz, 10 mm para o contra punção e 8 mm

para o prensa chapa que são mostrados na tabela 1, foram testados dois diferentes grupos de dimensões de dutos de resfriamento, denominados de variante 1 (V1) e variante 2 (V2).^[18]

	PUNÇÃO	CONTRA-PUNÇÃO	MATRIZ	PRENSA CHAPA
V1	8mm	8mm	8mm	8mm
V2	12mm	10mm	16mm	8mm

Tabela 1: diâmetro para dutos de resfriamento em uma ferramenta de estampo.^[18]

As taxas de resfriamento obtidos do blanque do ponto mais quente de 850°C para 170°C são de 40°C/s com V1 e 33°C/s com V2 no 10º ciclo e essas taxas são maiores do que a taxa mínima requerida de 27 °C/s. Além disso, V1 leva a um desempenho de resfriamento mais eficiente que V2. Um desempenho melhor para V1 comparado a V2 pode ser explicado com a restrição geométrica e o mínimo de espessura da parede. Um duto de resfriamento com diâmetro menor pode ser colocada mais próxima da parede da superfície em uma convexa e a quantidade de canais de resfriamento pode ser adicionalmente aumentada.^[2]

Figura 6: Projeto de ferramenta para o processo de estampagem a quente.^[2]

A operação de têmpera durante o processo de estampagem a quente não influencia apenas a economia do processo mas também as propriedades finais do componente. O objetivo dos canais de resfriamento é a têmpera da peça quente efetivamente e para atingir uma taxa de resfriamento de pelo menos 27°C/s para que a martensita se forme. O sistema de resfriamento da matriz é

econômico se o fluido resfriador, como a água, é usado, escoando através dos canais de resfriamento. A taxa de transferência de calor no componente conformado é dependente do fluxo de calor do componente para a ferramenta, o calor conduzido dentro da ferramenta, e o calor transferido da ferramenta para o líquido refrigerante. Para uma melhor transferência de calor entre o componente e a ferramenta, a superfície de contato não pode exibir imperfeições, trincas ou qualquer outro defeito que diminua a superfície de contato ou que dissipe o calor. A condução de calor dentro da ferramenta pode ser consideravelmente influenciada pela escolha do material da ferramenta. Outro fator importante com relação à taxa de transferência de calor é o *design* dos canais de resfriamento, que é definido pelo tamanho, localização e distribuição dos canais de resfriamento. A taxa de transferência de calor pode ser acelerada pelo uso refrigerante com baixa temperatura na intenção de aumentar a diferença de temperatura entre o refrigerante e a ferramenta e assim na resultante do fluxo de calor.^[18]

2.1.3. Têmpera

Depois da conformação do *blanque* aquecido na temperatura austenítica, a peça é temperada em uma ferramenta fechada visando a completa transformação martensítica em toda a peça. Estima-se que para o aço 22MnB5, uma taxa de resfriamento maior que 27 °C/s é necessária para se obter uma microestrutura totalmente martensítica. A formação de martensita no perfil estampado causa um aumento do limite de escoamento (Figura 7).^[1]

Figura 7: Curva de fluxo e microestrutura do 22MnB5 durante a estampagem à quente^[11]

2.2. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Os aços de alta resistência utilizados para fins estruturais são projetados para obtenção de combinações de propriedades de resistência e alongamento e suas propriedades são baseadas em combinações de microestruturas, obtidas por diferentes processos de fabricação incluindo, entre outros, DP (*dual-phase*), TRIP (*transformation induced plasticity*), HSLA (*high strength low alloy*), CP (*complex phase*), TWIP (*twinning induced plasticity*), e aços martensíticos. As propriedades desses aços multi-fásicos são derivados de uma combinação apropriada de elementos de liga e posterior processamento mecânico apropriado para cada aço. O desenvolvimento contínuo dos aços AHSS, designado para aplicações específicas, requer um controle cuidadoso da microestrutura para otimizar e especificar os mecanismos de endurecimento responsáveis pelas propriedades finais desejadas.^[6]

3.2.1. Elementos de liga

Adições de pequenas quantidades de boro aumentam significativamente a capacidade de endurecimento de aços de alta resistência que possuem baixo carbono e baixa liga. O mecanismo sugerido para o efeito de endurecimento do boro nos aços é baseado na premissa que os átomos de boro segregam para o contorno de grão da austenita dificultando a nucleação da ferrita nos contornos de grão, melhorando a temperabilidade. A quantidade ideal de boro para maximizar o efeito de endurecimento nos aços é entre 10 e 30 ppm; a adição de uma quantidade maior do que esta, degrada o efeito de temperabilidade do boro, possivelmente porque o excesso de átomos de boro no contorno de grão precipita na forma carboneto de boro, que age como locais preferenciais de nucleação para transformação de austenita para ferrita. Assim, a concentração e distribuição do boro no contorno de grão da austenita tem grande importância no efeito de temperabilidade do boro nos aços.^[19]

O manganês contribui significativamente para a capacidade de temperabilidade, principalmente em quantidades maiores que 0,8% em peso. O

efeito do manganês acima de 1% é mais forte em aços de baixo ou alto carbono do que em aços de médio carbono. Além disso, esse elemento é o principal estabilizador da austenita.^[20]

O manganês aumenta a dureza da martensita revenida pois retarda o coalescimento de carbonetos, que dificulta o crescimento de grão na matriz ferrítica. Esse efeito causa aumento substancial na dureza da martensita revenida à medida em que a porcentagem de manganês no aço aumenta.^[21]

3.2.2. Aço ao boro

O aço USIBOR1500 utilizado nesse trabalho é um tipo de aço de alta resistência (HSS) desenvolvido pela Arcelor. É mais conhecido como aço 22MnB5. Tem aumentado significativamente a necessidade de componentes de aço de alta resistência devido aos objetivos da indústria automobilística como veículos mais leves e melhor desempenho em caso de colisão. Devido ao melhor desempenho tal como melhora na plasticidade de chapa de aços em alta temperatura, o processo de estampagem a quente é normalmente aplicado a chapas do aço de alta resistência na intenção de obter componentes estruturais com formas complexas e de alta resistência mecânica final, quando temperados no interior da ferramenta de conformação mecânica^[13]

Naderi^[9] utilizando diferentes aços ligados contendo boro como 22MnB5, 27MnCrB5 e 37MnB4 obteve valores resistência mecânica acima dos 1400 MPa, associados a uma microestrutura completamente martensítica quando se utiliza ferramentas com sistemas de resfriamento.^[3] A classe de aço 22MnB5 é a mais utilizada em processos de estampagem a quente.^{[1], [3], [8], [12], [16], [22]–[25]}

Como mencionado anteriormente, uma taxa de resfriamento de no mínimo 27°C/s deve ser alcançada, isso para garantir a ocorrência de transformação martensítica, responsável pela alta resistência da peça final.^{[1], [26]}

AÇO	Al	B	C	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
20MnB5	0,04	0,001	0,16	0,23	1,05		0,01	0,40	0,034
22MnB5	0,03	0,002	0,23	0,16	1,18	0,005	0,12	0,22	0,040
8MnCrB3	0,05	0,002	0,07	0,37	0,75	0,006	0,01	0,21	0,048
27MnCrB5	0,03	0,002	0,25	0,34	1,24	0,004	0,01	0,21	0,042
37MnB4	0,03	0,001	0,33	0,19	0,81	0,006	0,02	0,31	0,046

	Temperatura de início de transformação de martensítica (°C)	Taxa de resfriamento crítica (°C/s)		Tensão de escoamento em MPa		Resistência à tração em MPa	
				Como recebido	estampado a quente	Como recebido	estampado a quente
20MnB5	450	30		505	967	637	1354
22MnB5	410	27		457	1010	608	1478
8MnCrB3				447	751	520	882
27MnCrB5	400	20		478	1097	638	1611
37MnB4	350	14		580	1378	810	2040

Tabela 2: Composição química e propriedades mecânicas do aço ao boro.^[1]

O aço 22MnB5, utilizado neste trabalho, apresenta uma microestrutura inicial ferrítica-perlítica com uma resistência à tração de 600 MPa. Após o processo de estampagem a quente, a peça final possui uma microestrutura martensítica com uma resistência final de 1500 MPa, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Propriedades mecânicas do aço 22MnB5.^[1]

As propriedades mecânicas do aço depois da têmpera mudam dependendo da quantidade de carbono presente e por consequência, a resistência depois da têmpera pode ser controlada por ajustes na quantidade de carbono.^[1]

3.2.3. Revestimento de alumínio – silício

Sob condições de austenitização ao ar, ocorre uma oxidação imediata quando o aço entra em contato com o O₂. Na intenção de evitar oxidação da superfície e descarbonetação, a maioria dos blanques de aço são revestidos com uma camada protetora. A proteção mais utilizada é uma camada de Al-Si que evita a formação de óxidos na superfície do aço durante a operação de estampagem a quente. Borsetto et al.,^[27] investigou a influência dos parâmetros de processos térmicos no comportamento químico da camada de proteção de Al-Si. Os autores encontraram que essa proteção metálica na superfície é gerada em um processo contínuo de recobrimento por imersão a quente e consiste de 10% de silício, 3% de ferro e 87% de alumínio. Durante o aquecimento de blanco protegido, o processo para a superfície revestida é termicamente ativada. O revestimento de Al-Si tem um ponto de fusão de aproximadamente 600°C. Entretanto, devido à presença de Fe em seu substrato, uma liga de Al-Fe com um ponto de fusão maior cresce da interface

com base de metal e rapidamente alcança a superfície. A liga de Al-Fe, que migra para a superfície, tem um ponto de fusão maior e isso evita que a camada de revestimento se funda. Devido aos baixos limites de formação da camada de Al-Si comparado com a base do material no estágio inicial a temperatura ambiente, as chapas aluminizadas por imersão a quente não podem ser usadas nos processos indiretos e eles não são adequados para processos de conformação a frio.^[28]

2.3. ENSAIOS MECÂNICOS E TERMOMECAÂNICOS

3.3.1. Índice de anisotropia

As propriedades mecânicas de um material podem variar conforme a direção em que foram realizadas as medições. Esse fenômeno é denominado anisotropia. A anisotropia aparece devido a orientação preferencial dos grãos do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico, por exemplo, o processo de laminação, ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada ou por causa também de um trabalho mecânico.^[29]

Um dos métodos para se avaliar a anisotropia é o índice de anisotropia r , que é definido pela relação entre a deformação real na largura, δ_w , dividida pela deformação real na espessura, δ_e , do corpo de prova durante o ensaio real. Medem-se a largura e a espessura em diversos pontos da parte útil do corpo de prova antes do ensaio e depois de ser atingida uma carga especificada (por exemplo, a carga máxima ou uma carga que dê uma deformação qualquer). Com os valores obtidos, calculam-se as deformações atingidas (δ_w e δ_e) e colocam-se essas deformações num gráfico, tendo δ_w em ordenada e δ_e em abscissas. Para a maioria dos metais, o gráfico resultará em uma linha reta. O valor de r será o coeficiente angular, podendo também ser obtida pela equação 1:^[29]

$$r = \frac{\delta_w}{\delta_e} = \frac{\ln (w_f/w_o)}{\ln (t_f/t_o)}$$

Equação 1- índice de anisotropia [29]

onde w_o e t_o são a largura e a espessura inicial medidas antes do ensaio e w_f e t_f , a largura e a espessura final, após uma carga (Q) específica. Observa-se que r é um valor adimensional. A medida da espessura, porém, pode ocasionar erros grandes caso a sua dimensão seja pequena comparada às medidas restantes, de modo que pode-se substituir a Equação 1 pode ser expressa pela equação 2, válida devido à consideração do princípio de conservação do volume durante a deformação plástica.^[29]

$$r = \frac{\ln (w_o/w_f)}{\ln (l_f w_f / l_o w_o)}$$

Equação 2- índice de anisotropia^[29]

onde l_o e l_f são os comprimentos inicial e final, respectivamente.

A variação dos valores de r , determinados em corpos de prova situados num mesmo plano de um metal trabalhado, porém, retirados em diferentes direções, é chamada anisotropia planar (Δr). Esse valor é muito importante, principalmente para estudos sobre estampagem dos metais, isso porque a direção em que será estampada a peça pode afetar as propriedades mecânicas finais caso o material seja anisotrópico. A equação 3 demonstra o cálculo de r .^[29]

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

Equação 3- anisotropia planar^[29]

onde os subíndices de r representam os valores de r para corpos de prova retirados a 0°, 45° e 90° da direção de laminação de chapa. Para um material perfeitamente isotrópico, r deverá ser igual a 1.

Outra maneira de variação de r é na direção normal à superfície da chapa laminada. O valor $\bar{r}$, denominado anisotropia normal, é dado pela expressão:[29]

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

Equação 4- índice de anisotropia planar^[29]

3.3.2. Dilatometria

Informações gerais sobre a cinética de transformação são importantes para atingir a microestrutura e propriedades desejadas de materiais processados termicamente. Dados cinéticos são normalmente obtidos em condições isotérmicas sobre um intervalo de temperatura. Na forma mais simples, o início e o fim da formação de uma fase em particular é registrado e apresentado no diagrama de transformação isotérmica (IT) ou diagrama de tempo-temperatura-transformação (TTT). Experimentos isotérmicos são conduzidos em uma série de temperaturas para diferentes períodos de manutenção na intensão de gerar as curvas correspondentes respectivas ao início e final da transformação.^[30]

Amostras para experimentos isotérmicos precisam ser trazidas, da temperatura de austenitização, para a temperatura de teste rapidamente por aquecimento e resfriamento rápido. Ao final do período de manutenção designado, a amostra é rapidamente temperada para temperatura ambiente de modo que as estruturas de alta temperatura sejam congeladas para análise quantitativa metalográfica subsequente. Entretanto, existem limitações práticas que previnem este método de ser capaz de caracterizar precisamente a transformação em algumas situações. Um destes exemplos é a transformação microestrutural durante a austenitização do aço em altas temperaturas.

Para evitar as dificuldades associadas com a caracterização dos processos de austenitização, é desejável usar técnicas que medem continuamente o progresso da transformação durante a simulação do processo para que não haja necessidade de interrupção durante os testes isotérmicos.

Entre outras, as técnicas de dilatometria constituem uma alternativa e possivelmente o método mais utilizado na determinação da cinética de transformação geral, particularmente para austenitização. Um dilatômetro mede a mudança volumétrica de um corpo de prova enquanto a mesma é aquecida e/ou resfriada através de um perfil pré-determinado de tempo-temperatura ou tempo-temperatura-carregamento. A mudança nas medidas da amostra é relacionada a expansão térmica e/ou transformação de fase.

A austenitização tem um papel importante no processo de manufatura de aços. O progresso de tal fenômeno pode afetar significativamente a microestrutura e propriedades no produto processado depois que eles são resfriados da temperatura de austenitização. Apesar da influência que tem em muitos processos térmicos, a austenitização ainda não foi entendida e caracterizada com a mesma profundidade que as transformações durante resfriamento. Tal deficiência se torna um problema mais sério que dificulta a compreensão dos mecanismos de transformação onde a taxa de aquecimento é alta, como por exemplo, em aquecimento por indução ou por infravermelho. Nesses processos rápidos, a distribuição de temperatura é bastante desigual, e o tempo para a austenitização é muito sensível à microestrutura inicial. Como resultado, o grau de austenitização pode ser bem difícil de controlar. Pelas mesmas razões, a microestrutura resultante e propriedades nos materiais processados podem variar significativamente com as condições de austenitização. Obviamente, existe uma grande necessidade de melhorar o entendimento do fenômeno metalúrgico que ocorre durante o processo de austenitização, mais especificamente quanto ao controle da transformação α para γ , dissolução de partículas carbonetos, e controle do tamanho de grão.

Poucos dados estão disponíveis sobre a cinética de austenitização geral. [3, 15-17] Alguns dados relacionados com o progresso da austenitização são expressados na forma de determinação das temperaturas Ac_1 e Ac_3 em taxas constantes de aquecimento.

3.3.3. Simulador termomecânico

Utilizando o simulador termomecânico acoplado à uma linha de raios-X de alto fluxo, em anel de luz Sincrotron, Gleeble 3S50TM, Echeverri et. al.^[31]

estudaram a influência da temperatura de deformação na microestrutura e na dureza de um aço ao boro. Utilizaram amostras planas com 20 mm de comprimento efetivo, 89 mm de comprimento total e 1,5 mm de espessura, cortadas de uma chapa de aço ao boro 15B26 com microestrutura ferrítico-perlítica e limites de escoamento de aproximadamente 500 MPa, limite de resistência de aproximadamente 640 MPa e alongamento de aproximadamente 25%.

Figura 9: corpo de prova para ensaio termomecânico[31]

No tratamento termomecânico realizado, as amostras foram aquecidas por efeito Joule até 920°C atingindo uma austenitização plena a uma taxa de 15°C/s, e mantidas nesta temperatura por 5 minutos. Após a austenitização, as amostras foram simultaneamente temperadas e deformadas em um processo não isotérmico. As amostras foram deformadas 30% com início a 850°C e 750 °C. As duas temperaturas de deformação foram aplicadas em ciclos de tratamentos termomecânicos diferentes. A velocidade de resfriamento, até a temperatura ambiente, foi de 40 °C/s. A taxa de deformação nominal em ambos os casos foi de 0,5 s⁻¹, valor dentro da faixa de taxas de deformação encontradas durante ensaios convencionais de estampagem a quente.^[32]

A definição deste parâmetro se torna importante uma vez que em baixas taxas de deformação (0,1 s⁻¹), a formação de ferrita bainítica é promovida devido à temperatura final de deformação ser menor à 650°C.

Figura 10: Esquematisação de condições térmicas e de deformação para diferentes temperaturas iniciais de deformação de (a) 850°C e (b) 750°C.[31]

A fim de evitar oxidação e descarbonetação dos corpos de prova, a câmara do simulador foi evacuada para uma pressão de aproximadamente 7×10^{-3} torr. A temperatura durante todo o ciclo termomecânico foi registrada utilizando-se termopares tipo K que foram soldados às amostras.[31]

Figura 1: microestrutura da peça deformada a 850°C em 30% ($\dot{\epsilon} = 0,5 \text{ s}^{-1}$) obtidas: por: (a) Microscopia óptica, aumento: 500x; (b) Microscopia eletrônica de varredura, aumento 3500x. M e F representam martensita e ferrita, respectivamente. Ataque Nital 2%. [31]

Figura 12: Microestrutura da peça deformada a 750°C em 30% ($0,5 \text{ s}^{-1}$) obtidas : por: (a) Microscopia óptica, aumento: 500x; (b) Microscopia eletrônica de varredura, aumento 3500x. M e F representam martensita e ferrita, respectivamente. Ataque Nital 2% ^[31]

Nas micrografias da Figura 11 e 12, para a amostra deformada a 750°C, se observa claramente que a ferrita nucleia principalmente nos contornos de grão da austenita previamente formada. Enquanto a microestrutura deformada a 850°C apresenta uma microestrutura quase totalmente martensítica, o que permite evidenciar a influência da temperatura de deformação nas transformações martensítica e ferrítica. Devido a essas diferenças microestruturais Echeverri et. al.,^[31] obtiveram variação nos resultados de microdureza das amostras tratadas, como mostrado nos mapas de distribuição apresentados na Figura 13.^[31]

Figura 13: Mapa de distribuição de dureza para as amostras deformadas em 30% ($0,5 \text{ s}^{-1}$) em: (a) 850°C; (b) 750°C.^[31]

Os mapas de dureza apresentados na figura anterior permitem evidenciar a heterogeneidade de distribuição das fases nos corpos de prova após o processo de deformação a quente.

Utilizando a técnica de estereologia, Echeverri et. al.,^[31] mediram os percentuais de ferrita nas microestruturas obtidas após o tratamento termomecânico de estampagem a quente e do ataque químico. Os resultados obtidos, mostram que a porcentagem de ferrita no aço deformado a 850 °C é de ~2% e para o aço deformado a 750 °C de ~24%. Este resultado é coerente com os resultados de microdureza que variaram entre 494 e 525 HV_{0,3} para o aço deformado a 850 °C, quando comparado com o aço deformado a 750 °C em que a variação foi entre 339 e 433 HV_{0,3}. Este comportamento se deve ao fato de que a deformação a 750°C acontece na zona ferrítica da curva de resfriamento contínuo, o que acelera e induz a transformação de fase de austenita em ferrita.^[31]

Os resultados microestruturais e de fração volumétrica mostraram que para obtenção de maior porcentagem de martensita, e portanto, maior resistência mecânica, é necessário que a janela do processo para a deformação a quente seja limitada à região austenítica. Enquanto que, se o objetivo for aumentar a ductilidade do material, sacrificando um pouco os resultados de resistência mecânica, uma deformação a 750°C poderia ser mais conveniente devido à formação de ferrita durante deformação produzida pelo efeito DIFT (do inglês, *Deformation Induced Ferrite Transformation*). Quando a deformação é aplicada à austenita sua energia livre de Gibbs aumenta o que causa um aumento do potencial termodinâmico para a transformação de ferrita a partir da austenita deformada. Essa transformação de fase é conhecida como efeito DIFT (Deformation Induced Ferrite Transformation). A transformação de ferrita por efeito DIFT difere da transformação comumente conhecida de ferrita, em que, enquanto na primeira a nucleação controla o processo de transformação, na segunda o crescimento do grão domina a transformação.^[31]

Desta forma, uma maior quantidade de ferrita possibilita uma maior ductilidade para o aço, o que garante uma maior absorção de energia em caso de impacto em peças, por exemplo, a coluna A ou coluna B em estruturas

monobloco de carrocerias de automóveis. Para a indústria automotiva este é um dos maiores objetivos em questão de segurança passiva.^[31]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Aço 22MnB5

Neste trabalho, foi utilizado o aço 22MnB5. O aço foi fornecido pela USIMINAS recozido em formas de chapa com 210 mm por 190 mm e com 1,5 mm de espessura com composição química de 0,24C-0,27Si-1,30Mn (% em peso). Inicialmente o material apresenta microestrutura ferrítico-perlítica com limites de escoamento e de resistência de ~500 MPa e 640 MPa, respectivamente e, alongamento de ~25%. As chapas não sofreram nenhum tratamento térmico para o corte dos corpos de prova.

Primeiramente foram realizados ensaios para a análise do material aqui trabalhado e obtenção e confirmação de parâmetros para a realização da estampagem à quente na chapa.

A segunda parte do trabalho consiste na estampagem de uma peça similiar a uma calha utilizando o processo de estampagem à quente.

3.2. Índice de anisotropia

A fim de obter maior precisão dimensional, foram cortadas por processo de eletroerosão a fio, três amostras em forma de gravata da mesma chapa para três direções, 0°, 45° e 90°, em relação ao sentido de laminação. O desenho da chapa com as amostras e as medidas das amostras são apresentadas na Figura 14:

Figura 14: amostra para ensaios de índice de anisotropia (medidas em mm)

Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina para ensaios de tração Time Group de 10 ton., aplicando uma deformação de 20% (redução da área) e taxa de deformação de 0.5mm/min. Após os ensaios, as amostras foram novamente ensaiadas para calcular-se o índice de anisotropia.

3.3. DILATOMETRIA

A fim de determinar a temperatura e o tempo ideal de austenitização para o aço em questão, foram cortadas 6 amostras para o ensaio de dilatométrica. O ensaio foi realizado no dilatômetro Bar. As amostras foram serradas e limadas a mão. A amostra possui 1,4 cm de comprimento total e 1

cm por 0,4 cm de área útil. As orelhas da amostra são utilizadas para colocar entre os tubos de vidros que seguram a amostra dentro do dilatômetro e possuem medida de 2 mm por 2 mm.

Figura 15: amostra para a dilatometria

As amostras foram divididas em 2 grupos: o primeiro grupo foi austenitizado por 4 minutos cada a 850°C, 920°C e 1000°C e temperadas a uma velocidade acima de 27°C/s. O segundo grupo, foi austenitizado a 900°C porém mantido durante tempos diferentes de austenitização: 1, 10 e 30 minutos e temperado também a uma velocidade acima de 27°C/s.

Foi soldado nas amostras um termopar do tipo K para fazer a medição da temperatura durante o ensaio. O dilatômetro foi configurado para trabalhar em vácuo de 5×10^{-4} mbar, para evitar possíveis reações com o oxigênio devido a alta temperatura em que serão tratadas. A têmpera foi realizada utilizando-se gás hélio. Antes do ensaio foi programado todo o ciclo de tratamentos térmicos que será aplicado à amostra.

As temperaturas e tempo escolhidos são baseados nas temperaturas mencionadas nas bibliografias pesquisadas.

3.4. Linha de estampagem

Após a montagem completa da linha de estampagem a quente foram realizados ensaios utilizando os parâmetros ótimos obtidos com os ensaios de dilatometria e dados de bibliografias citadas anteriormente.

Para o aquecimento da chapa na temperatura de austenitização foi utilizado um forno que utiliza um sistema de resistência. A linha de estampagem foi projetada para diminuir o tempo na transferência do blank para a prensa, portanto, o forno fica ao lado da prensa. Foram austenitizadas duas chapas de 22MnB5 com medidas de 200x170 mm a 920°C por 5 minutos. Após a austenitização a chapa foi rapidamente colocada na ferramenta de estampo, o tempo médio de transferência do forno até a prensa foi de 10 segundos, medida pelo operador. A prensa hidráulica utilizada é capaz de aplicar cargas de até 15 ton.. Ela possui velocidade controlável de acionamento de 30 mm/s e velocidade de retorno de 45 mm/s, o que permite testes em várias velocidades de fechamento da ferramenta. A prensa então foi fechada com sua velocidade máxima e a peça temperada dentro da mesma.

A ferramenta foi projetada para estampar uma peça semelhante a uma calha. É formada por uma matriz de conformação e um punção. A ferramenta de estampagem possui canais de resfriamento. O aço utilizado na fabricação da ferramenta (o P20) é específico para trabalhos sob grandes variações de temperaturas, ou seja, visando minimizar deformações de origem térmica. A ferramenta possui também, um prensa-chapa que aplica uma pré-carga segurando as laterais da chapa o que garante o escoamento do material para dentro da matriz, permitindo observar o fenômeno de escoamento e de dobra. A força do prensa-chapa pode ser regulada através da troca de molas da ferramenta.

Pelos canais de refrigeração da ferramenta passa água gelada fornecida por um chiller responsável pelo resfriamento da matriz e do punção através das mangueiras ligadas na parte superior e inferior da ferramenta, como se vê na figura 15. Os canais de resfriamento continuam água com temperatura controlada em fluxo de aproximadamente 6°C para rápido resfriamento da chapa e para garantir a têmpera do mesmo.

Figura 16: ferramenta de estampo

Figura 17: Ilustração da ferramenta de estampo

Figura 18: Ilustração do produto final estampado pela ferramenta

Figura 19: Prensa com a ferramenta já acoplada.

3.5. Análise metalográfica

As análises metalográficas das amostras tratadas foram realizadas seguindo os procedimentos de acordo com a norma ASTM E3-01.^[33] As amostras foram lixadas até a grana 1000 para o desbaste inicial mais grosseiro e posteriormente polidas até $1\mu\text{m}$. Para a revelação da microestrutura as amostras foram atacadas com nital 2%, álcool etílico e ácido nítrico por imersão durante aproximadamente 10 s.

3.6. Medição de dureza

Utilizando o microdurômetro FUTURE TECH, foram realizadas as medições de microdureza Vickers de todas as amostras. Foi utilizada uma carga de 0,3 kg com 15 segundos de penetração e foram realizadas 10 medições por amostra. As medições foram realizadas com distância suficiente para que uma medição não tivesse influência de outras medidas realizadas anteriormente nas amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Índice de anisotropia

As três primeiras amostras foram deformadas a uma velocidade muito abaixo da velocidade de estampagem, que normalmente é de 40mm/s, para que se pudesse analisar o comportamento da chapa em condições ideais. A tabela a seguir, mostra os valores obtidos no ensaio:

	medidas finais		
	largura (mm)	espessura (mm)	r
0°	6,0	1,5	0,6325
45°	5,9	1,5	0,8929
90°	5,9	1,5	0,8929

Tabela 3- medidas de largura e espessuras finais das amostras e índice de anisotropia

o que nos dá um valor de anisotropia planar Δr de 0,2604. Ou seja, o material apresenta uma pequena variação entre os índices de anisotropia, indicando que o material tem pouca influência da direção de laminação quando deformado em velocidades baixas.

Muitos autores^{[5], [9], [13], [34]} não levam em consideração o efeito da anisotropia em suas pesquisas para este aço, o que está de acordo com esse resultado, já que o material apresenta comportamento aproximadamente isotrópico na temperatura ambiente, tendo resultados melhores para temperatura mais altas, como no caso o deste trabalho.

4.2. Dilatometria

A primeira amostra do primeiro grupo foi austenitizada a uma temperatura de 850°C por 4 minutos, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 30°C/s. Pode-se observar nas micrografias a presença de uma quantidade grande de ferrita proveniente da microestrutura inicial que não deve ter sido austenitizada completamente. A temperatura de 850°C pode nem ter alcançado a temperatura de austenitização por ser próximo da Ac_3 e ter ficado abaixo da mesma.

Figura 20: Amostra austenitizada a 850 °C durante 4 minutos com resfriamento de 30 °C/s

Gráfico 1- Tempo x Temperatura e dilatação da amostra austenitizada a 850 °C durante 4 minutos com resfriamento de 30 °C/s

Dureza(HV)
379
410
398
406
455
432
438
400
421
414

Max. dureza (HV)	455
Min. dureza (HV)	379
Média dureza (HV)	415

Tabela 4 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 850°C por 4 minutos e resfriada dentro do molde refrigerado.

A segunda amostra do primeiro grupo foi austenitizada a uma temperatura de 920°C, mesma temperatura estudada por Echeverri et al.,^[31] por 4 minutos, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 100°C/s. Pode-se observar nas micrografias uma microestrutura martensítica. Isso porque a temperatura acima da A_{c3} garante que a amostra está no campo da austenitização no diagrama Fe-C, o tempo de 4 minutos garantiu a austenitização completa e o resfriamento de 100°C/s, acima dos 27°C/s, dado como velocidade de resfriamento ideal para obter uma microestrutura completamente martensítica para este aço, foi utilizada.

Figura 21: Amostra austenitizada a 920°C por 4 minutos e resfriamento de 100°C/s

Gráfico 2- Tempo x Temperatura e dilatação da amostra austenitizada a 920°C por 4 minutos com resfriamento de 100°C/s

Dureza(HV)
507
498
493
504
493
507
485
498
495
496

Max. durezas (HV)	507
Min. dureza (HV)	485
Média dureza (HV)	497

Tabela 5 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 920°C por 4 minutos

A terceira amostra do primeiro grupo foi austenitizada a uma temperatura de 1000 °C por 4 minutos, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 30 °C/s. Pode-se observar nas micrografias uma microestrutura martensítica grosseira. A temperatura de 1000°C está acima da Ac_3 e garante que a amostra está no campo da austenitização do diagrama Fe-C; o tempo de 4 minutos garante a austenitização completa da amostra e a velocidade de resfriamento acima de 27°C/s garante a têmpera do material.

Figura 22: amostra austenitizada a 1000 °C por 4 minutos e resfriamento de 30 °C/s

Gráfico 3 - Tempo x Temperatura e dilatação da amostra austenitizada a 1000°C por 4 minutos com resfriamento de 30°C/s

Dureza (HV)
467
474
480
469
462
480
480
459
474
469

Max. dureza (HV)	488
Min. dureza (HV)	459
Média dureza (HV)	475

Tabela 6 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 1000°C por 4 minutos

A primeira amostra do segundo grupo foi austenitizada a uma temperatura de 900 °C por 1 minuto, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 30 °C/s. As imagens de micrografia do aço mostram uma grande quantidade de ferrita. A temperatura de 900°C está acima da Ac_3 do diagrama Fe-C, estando no campo austenítico, entretanto o tempo de 1 minuto não garantiu uma austenitização completa. A microestrutura final para esta amostra apresenta uma grande quantidade de ferrita que provavelmente se origina da microestrutura original que não foi totalmente austenitizada mostrando que o tempo de 1 minuto não é ideal. Um tempo menor de austenitização é algo que interessa a indústria pois indica que será necessário menor quantidade de energia, produção mais rápida e portanto, maior, e no caso da utilização de fornos rolantes, um tempo menor de austenitização significa que pode-se utilizar máquinas menores. Entretanto, um tempo muito pequeno leva a microestruturas não desejadas.

Figura 23: Amostra austenitizada a 900°C por 1 minuto e resfriamento de 30 °C/s

Gráfico 4- Tempo x Temperatura e dilatação da amostra austenitizada a 900°C por 1 minuto e resfriamento de 30°C/s

Dureza(HV)
383
368
356
398
379
387
400
423
392
387

Max. dureza (HV)	423
Min. dureza (HV)	356
Mean dureza (HV)	387

Tabela 6 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 900°C por 1 minutos

A segunda amostra do segundo grupo foi austenitizada a uma temperatura de 900°C por 10 minutos, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 30°C/s. Pode-se observar nas imagens de micrografia uma microestrutura martensítica. A temperatura de 900°C está acima da curva Ac_3 do diagrama Fe-C estando no campo da austenita do mesmo e o tempo de 10 minutos garantiu uma austenitização completa. A velocidade de resfriamento de 30°C/s garantiu a têmpera do material.

Figura 24: Amostra austenitizada a 900°C por 10 minutos e resfriamento de 30°C/s

Gráfico 2- Tempo x Temperatura e dilatação da amostra austenitizada a 900°C por 10 minutos com resfriamento de 30°C/s

Hardness(HV)
482
496
493
464
477
493
482
472
488
477

Max. hardness (HV)	496
Min. hardness (HV)	464
Mean hardness (HV)	482

Tabela 7 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 900°C por 10 minutos

A terceira amostra do segundo grupo foi austenitizada a uma temperatura de 900 °C por 30 minutos, posteriormente foi temperada com uma velocidade de resfriamento de 30 °C/s. As micrografias mostram uma microestrutura martensítica mas extremamente grosseira. A temperatura de 900°C garante que o aço está no campo austenítico do gráfico Fe-C e o tempo de austenitização de 30 minutos garantiu uma austenitização plena. A velocidade de resfriamento de 30°C/s garantiu a têmpera do material.

Figura 25: Amostra austenitizada a 900 °C por 30 minutos e resfriamento de 30 °C/s

Gráfico 6- Tempo x Temperatura da amostra austenitizada a 900 °C por 30 minutos com resfriamento de 30 °C/s

Hardness(HV)
436
408
438
438
425
421
418
441
427
441

Max. dureza (HV)	441
Min. dureza (HV)	408
Dureza média (HV)	429

Tabela 8 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers para a amostra austenitizada a 900°C por 30 minutos

As amostras austenitizadas por 10 minutos e 30 minutos, apresentam microestrutura martensítica, entretanto, com grão maiores e microestrutura mais grosseira., Pode também ter ocorrido descarbonetação da amostra o que a torna menos resistente, não sendo a microestrutura final ideal para os objetivos deste trabalho, assim como a amostra autenitizada a 1000°C.

Sendo assim, uma temperatura de 900°C a 920°C por um tempo de 4 minutos com uma velocidade de resfriamento maior que 30°C/s foi encontrada como sendo o ideal para se obter uma microestrutura totalmente martensitica com um tamanho de grão que garante maior resistência.

Turetta afirma que uma austenitização de 900°C por 5 minutos e resfriamento de 30°C/s é o ideal para operações de estampagem a quente para o aço 22MnB5. Tekkaya et. al.,^[1] afirmam que uma austenitização de 950°C por 3 minutos e um resfriamento de 27°C/s são suficientes para que se obtenha uma microestrutura totalmente martensitica, também sendo ideal para a estampagem a quente sendo corente com os resultados obtidos neste trabalho.

O estudo de Lechler e Merklein^[17] mostra forte dependência da temperatura de austenitização para a microestrutura e dureza do aço, o que foi confirmado pelas diferentes micrografias obtidas no presente estudo em diferentes temperaturas de austenitização apesar de utilizado o mesmo tempo para todas as amostras e todas terem as mesmas dimensões no grupo 1.

De acordo com Guler^[16], uma temperatura de austenitização de 850°C também pode atingir uma alta resistência se o tempo de imersão é maior que vinte minutos. Entretanto, um alto tempo de imersão, assim como uma alta temperatura, significa um maior gasto de energia e menor produtividade, o que não é interessante para aplicação industrial. Por outro lado, uma austenitização de tempo muito reduzido pode levar a uma austenitização incompleta, o que nos dá uma microestrutura final com resistência reduzida já que não apresentará uma microestrutura completamente martensítica. Portanto, a menos que haja necessidade, como no caso de chapas com espessuras mais elevadas, um longo tempo de austenitização não deve ser utilizado.

Os picos nos gráfico de Tempo x Dilatação demonstram a mudança de fase nas amostras. Observa-se que nos extremos dos picos ocorrem o início e o fim da transformação de fase. O primeiro pico é relacionado ao início e o fim da austenitização do material. O trecho constante no gráfico é relacionada ao tempo que o material é mantido na temperatura de austenitização. Após a têmpera do material observamos um novo pico nos gráficos, relacionado as microestruturas que observa-se no final do tratamento térmico, a martensita. Pode-se observar o ponto em que se inicia e termina a formação da martensita.

Através das curvas pode-se observar a temperatura de início e fim das transformações de fase para o aço estudado, sendo estas as temperaturas a serem trabalhadas quando forem se realizar a estampagem a quente da calha.

Através do estudo de simulações realizadas na Gleeble^{[14], [31]} podem ser estudadas as melhores temperaturas para o início da deformação do corpo de prova. Sabe-se^{[2], [5], [9], [35]} que a amostra deve ser deformada enquanto estiver austenitizada portanto, as informações sobre temperatura de início e fim das transformações de fase são essenciais para uma estampagem à quente bem

sucedida bem como a temperatura ideal para o início da deformação para que esta favoreça a microestrutura desejada.

Após realizadas as metalografias, foram realizadas as medidas de dureza das amostras. Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com uma carga de 0,3 kg e tempo de penetração de 15 s. Para cada amostra foram realizadas 10 medições, com distância considerável entre uma medida e outra para que não houvesse interferência em suas medidas final.

A amostra austenitizada por 1 minuto a 900°C com uma taxa de resfriamento de 30°C/s apresenta uma dureza média de 388 HV, tendo esta o valor mais baixo entre as amostras. Dado a análise da micrografia e este valor de dureza, pode-se afirmar que apesar de ter sido austenitizada a 900 °C, como é indicado em inúmeras bibliografias^{[2], [3], [11], [22], [36]}, o tempo de 1 minuto não é suficiente para austenitizar completamente a amostra, o que deixa uma quantidade grande de ferrita que provém da microestrutura original, apresentando um baixo valor de dureza e por consequência, um baixo valor de resistência.

Entretanto, um tempo muito alto de austenitização pode não ser ideal para se atingir uma alta dureza. Comparando-se a dureza das amostras austenitizadas durante 10 minutos e 30 minutos com a mesma temperatura de 900 °C, pode-se observar uma grande diferença de dureza. Enquanto a amostra austenitizada durante 10 minutos tem uma dureza média de 483 HV a amostra austenitizada durante 30 minutos apresenta dureza média de 430 HV. Analisando as micrografias pode-se concluir que isso se deve ao tamanho de grão maior da amostra austenitizada durante 30 minutos quando comparada a amostra austenitizada durante 10 minutos, ou seja, os grão são mais grosseiros apresentando menor refino de grão.

A amostra austenitizada a 920°C por 4 minutos e resfriamento de 100°C/s obteve dureza média de 498 HV, apresentando a maior dureza entre todas as amostras analisadas. Pode-se concluir então, que estes valores para temperatura e tempo de austenitização são ideais para obter um valor máximo de dureza e por consequência um maior valor de resistência. Pode-se concluir também, que um alto valor de 100°C/s de taxa de resfriamento garante uma

maior dureza. Muitos autores^{[9], [11], [14], [18]} mencionam uma taxa de resfriamento maior de 27°C/s é necessária para se obter altas durezas, então o resultado obtido é coerente.

Podemos observar que as amostras austenitizadas a 920°C e 1000°C a 4 minutos cada, possuem microestrutura martensítica, porém a 1000 °C, os grão se mostram maiores assim como as fases presentes. Grãos maiores e mais grosseiros apresentam uma menor dureza, não sendo ideal para os objetivos deste trabalho. A temperatura de 1000°C exige também, uma maior quantidade de energia, o que aumentam os custos. A amostra austenitizada a 1000 °C por 4 minutos apresentou uma dureza média de 471 HV, tendo valor de dureza menor que a amostra austenitizada a 920°C por 4 minutos, não sendo uma temperatura ideal.

Gráfico 7 – Temperatura x Dilatação do aço austenitizado a 920°C por 4 minutos com taxa de resfriamento de 100°C.

Observando o gráfico 7 de dilatação x temperatura pode-se obter os valores das temperaturas Ac_1 , Ac_3 , M_s e M_f . Observa-se que a temperatura Ac_3 para este aço é de 850°C, como é necessário que a austenitização deve ser

realizada acima da temperatura A_{c3} uma temperatura por volta 850°C não é adequada devido a incerteza que pode causar na austenitização final. E considerando que essa temperatura pode ter variações de acordo com a chapa devido a uma microestrutura heterogênea para um mesmo aço, deve-se utilizar valores acima da A_{c3} que garantam a austenitização completa. Um valor menos que 850°C é impraticável para o aquecimento da chapa pois não estaria no campo da austenitização de acordo com o diagrama ferro-carbono.

A diferença entre os valores de M_s e M_f é significativa, por volta de 175°C , o que reafirma que uma maior velocidade de resfriamento irá garantir uma dureza e também um maior refino de grão da martensita. Isso porque, uma velocidade muito lenta durante o processo de resfriamento pode aumentar o tamanho de grão e diminuir a dureza.

4.3. Estampagem à quente

A última etapa do estudo foi a realização da estampagem a quente.

Utilizando os parâmetros obtidos nos ensaios realizados anteriormente, foi realizado o ensaio de estampagem a quente. As chapas foram austenitizadas a uma temperatura de 920°C por 5 minutos. Após a austenitização os corpos de prova foram transferidos para a prensa, levando 10 segundos para esta transferência.

A temperatura da água que circulava pelos canais de resfriamento da prensa era de 6°C , controlada pelo chiller, enquanto a temperatura da prensa era de 10°C , medida através de termômetro infravermelho.

A estampagem foi iniciada, assim que o blank foi assentado na metade inferior da ferramenta. Inicialmente a prensa chapa entrou em contato com as abas do perfil, de forma garantir que não houvesse escorregamento da chapa sobre o molde. Em seguida, o punção atuava promovendo a deformação plástica desejada. Ao final a chapa fica no interior da prensa sob resfriamento forçado para garantir a transformação martensítica dentro do molde.

Figura 26 –Peças após o processo de estampagem a quente

O ensaio foi realizado, como planejado, entretanto, observou-se descarbonetação da chapa como mostrado na Figura 26. Pode-se observar pela imagem que as chapas formaram grande quantidade de carepa devido à descarbonetação ocorrida no forno de austenitização em alta temperatura. Essa é uma das desvantagens mencionadas por Tekkaya et. al., Mori et al., Turetta et. al.^{[1], [2], [5]} para o processo de estampagem a quente.

Devido à formação da carepa, foi medida a dureza no perfil das amostras cortadas. Entretanto, não se observou variação significativa da microdureza. Essa uniformidade da dureza da amostra, apesar da carepa, pode ter relação com a pequeno intervalo de tempo em que a chapa ficou no forno de austenitização. Da literatura^{[8], [10], [23]} temos que o coeficiente de difusão do C na austenita CFC a 920°C é $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Calculando a distância de difusão para 300 s de tempo de austenitização usando a expressão:

$$x \cong \sqrt{(Dt)}$$

Temos que $x \approx 42 \mu\text{m}$ ou 4 centésimos de milímetro.

Mori^[2] cita que o aquecimento por resistência tem as seguintes vantagens em relação ao aquecimento por forno:

1. O aquecimento é bem rápido, levando apenas 2 segundos para chegar a uma temperatura de 900°C ;
2. Dificilmente se forma carepa devido ao aquecimento rápido.

Figura 27 – Comparação entre peças estampadas a quente (a) aquecimento no forno (b) aquecimento por resistência^[2]

Entretanto, há uma séria desvantagem para o aquecimento por resistência para a estampagem a quente já que sua aplicação é efetiva apenas para peças de formato retangular pois caso contrário o aquecimento pode ficar heterogêneo. Por isso, para se utilizar esse tipo de aquecimento é necessário estudo prévio para garantir que a microestrutura final seja homogênea.

Figura 28 – diferença de springback entre a peça estampada a frio e a peça estampada a quente

Após estampagem observou-se que a peça estampada não apresentava springback, como usualmente ocorre com chaps e blanks estampados a frio. A Figura 28 mostra a superposição das duas chapas (a de cima mais clara estampada a frio, que apresenta springback e a de baixo estampada a quente que não apresentou springback, formando as abas laterais exatamente o mesmo ângulo da cavidade e do punção existentes na ferramenta.

Observando a imagem pode-se verificar a diferença de springback. A peça que está em cima, é uma chapa de 22MnB5 estampada a frio, já a segunda peça, em baixo, foi estampada a quente. Como mencionado por Mori et. al.^[2] com o aumento da resistência da chapa, a carga para a conformação aumenta e assim o retorno elástico (springback) se torna maior. Quanto maior o springback da peça menor é sua precisão dimensional sendo esta uma das grandes vantagens da estampagem a quente.

A diferença de springback abre portas para a produção de peças com formas mais complexas e com resistência final alta que garante grande aplicabilidade na indústria automotiva principalmente para peças de segurança e também na intenção de diminuir o peso do veículo.

Após o processo de estampagem a quente foram cortadas amostras para análises. Foi utilizado o processo de eletroerosão a fio para evitar modificações possíveis na microestrutura devido ao aquecimento durante o corte.

As amostras foram embutidas e após o lixamento, polimento e ataque foram realizado análise metalográfica e de microdureza.

Figura 29 – Microestrutura do material como recebido, estampado a frio.
Ataque: Nital 2%

Figura 30 – Microestrutura do material estampado a quente. Ataque: Nital 2%

É possível observar que a amostra apresenta microestrutura martensítica. A rápida transferência da amostra do forno para a prensa e o rápido resfriamento devido à água gelada que circulava pelo sistema garantiu que a têmpera foi realizada com sucesso. O tempo de transferência entre o forno e a prensa se mostra uma das variáveis mais significativas. Na primeira amostra estampada a quente o tempo de transferência do forno para a prensa foi maior que 10 segundos, tendo atingido aproximadamente 15 segundos. O maior tempo de transferência levou a uma microestrutura com maior quantidade de ferrita, o que diminuiu a dureza do material para um adureza média de 350 HV.

Figura 31 – Microestrutura do material estampado a quente com tempo entre a saída do forno de austenitização e o assentamento da chapa na prensa de 15 segundos.

Para tempo de transferência de 10 s obteve-se dureza mínima de ≈ 420 HV_{0,3}. Já a amostra estampada à frio apresentou dureza de aproximadamente 200 HV_{0,3}, ou seja, em comparação com o valor final dureza da peça

estampada a quente é mais que duas vezes maior que a peça estampada à frio.

A Tabela 9 mostra os valores de medidas de dureza da chapa estampada a quente com 10 s de tempo de transferência e microestrutura 100% martensítica. A Tabela 10 mostra os valores de microdureza da chapa estampada a frio.

Dureza(HV)
421
428
434
434
431
429
430
423
443
433

Max. dureza (HV)	443
Min. hardness (HV)	421
Mean hardness (HV)	430

Tabela 9 – Valores de microdureza Vickers para a chapa estampada a quente com tempo de transferência entre forno e prensa de 10 segundos

Hardness(HV)
201
201
210
203
204
206
210
198
199
195

Max. hardness (HV)	210
Min. hardness (HV)	195
Mean hardness (HV)	203

Tabela 10 – Valores de microdureza Vickers para a chapa estampada a frio

Hardness(HV)
321
310
352
355
344
331
354
350
343
362

Max. hardness (HV)	362
Min. hardness (HV)	310
Mean hardness (HV)	342

Tabela 11 – Valores de microdureza Vickers para a chapa estampada a quente com tempo de transferência entre prensa e chapa maior que 10 segundos

Foi realizado ensaio de tração com corpos de provas retirados das peças estampadas à quente.

Gráfico 8 – Ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 950°C por 5 minutos

FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/mm ²	LIMITE DE ESCOAMENTO kgf/mm ²	ALONGAMENTO %	PI (mm) 1,00 kgf	PI (mm) 1,50 kgf/mm ²	PI (kgf) 250,00 %
1312,00	145,78	137,25	23,92	242,00	43,78	3,92

Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 950°C por 5 minutos com tempo de transferência entre forno e prensa de 10 segundos

Gráfico 9 – Ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 920°C com tempo de transferência entre forno e prensa maior que 10 segundos

FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/mm ²	LIMITE DE ESCOAMENTO kgf/mm ²	ALONGAMENTO %	PI (mm) 1,00 kgf	PI (mm) 1,50 kgf/mm ²	PI (kgf) 250,00 %
990,00	110,00	93,37	19,72	314,00	53,78	3,20

Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 920°C com tempo de transferência entre forno e prensa maior que 10 segundos

Gráfico 10 – Ensaio de tração do corpo de prova estampado à frio

FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/mm ²	LIMITE DE ESCOAMENTO kgf/mm ²	ALONGAMENTO %	PI (mm) 1,00 kgf	PI (mm) 1,50 kgf/mm ²	PI (kgf) 250,00 %
505,00	56,11	36,83	41,56	289,50	37,44	3,26

Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração do corpo de prova estampado à frio

Gráfico 11 – Ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 920°C por 5 minutos com tempo de transferência entre forno e prensa de 10 segundos

FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/mm ²	LIMITE DE ESCOAMENTO kgf/mm ²	ALONGAMENTO %	PI (mm) 1,00 kgf	PI (mm) 1,50 kgf/mm ²	PI (kgf) 250,00 %
1252,00	139,11	122,57	20,92	316,00	54,00	3,08

Tabela 15 – Resultado do ensaio de tração do corpo de prova austenitizado a 920°C por 5 minutos com tempo de transferência entre forno e prensa de 10 segundos

O corpo de prova austenitizado a 950°C por 5 minutos teve um tempo de transferência entre forno e prensa de 10 segundos. No ensaio de tração obteve um limite de resistência de 145,78 kgf/mm², aproximadamente 1430 MPa. Muitos autores^{[1], [4], [8], [13], [16], [18]} mencionam uma resistência de tração de aproximadamente 1500 MPa de resistência para o aço 22MnB5 estampado a quente com parâmetros ideais.

Um maior tempo de transferência do forno para a prensa levou os corpos de tração austenitizado à mesma temperatura de 920°C possuírem limite de resistências diferentes. Quando as amostras foram analisadas, pode

ser observado que havia uma grande quantidade de ferrita na amostra que levou mais de 10 segundos para a transferência e o resultado de resistência à tração desse corpo de prova foi de 110 kgf/mm², aproximadamente 1080 MPa, enquanto o corpo de prova que teve um tempo de transferência de 10 segundos teve sua resistência à tração de 139,11 kgf/mm², aproximadamente 1365 MPa.

O corpo de prova estampado a frio apresentou uma resistência à tração de 56,11 kgf/mm², aproximadamente 550 MPa, sendo muito abaixo da resistência do corpo de prova estampado à quente.

A ferramenta não apresentou nenhuma deformação ou trinca após o processo de estampagem a quente e a prensa não teve nenhum problema de sobrecarga o que garante que o aço ferramenta P20 é adequado para este tipo de trabalho. A prensa tem 15 toneladas de força, mais que suficiente para estampar a peça a quente.

Deve-se notar também que o fechamento da ferramenta foi de aproximadamente 2 segundos. O tempo de fechamento da ferramenta deve ser o menor possível para evitar a perda de calor da chapa e possíveis transformações na microestrutura do material. Nos ensaios de dilatométrica foi encontrado que temperatura A_{c3} para este material é de 850°C, o processo de conformação deve ser realizado antes que se atinja essa temperatura.

Tratamento térmico posterior não é necessário quando realizado o processo de estampagem a quente. Esta é a principal vantagem do processo, devido à diminuição dos custos e do tempo de produção da peça. Entretanto, deve-se observar que uma usinagem posterior para peças estampadas a quente apresentará uma dificuldade e custo muito maior sendo o ideal a peça não necessitar de qualquer trabalho posterior para poder ser utilizada. Como na estampagem a quente é possível estampar formas mais complexas devido ao baixo springback, deve-se usar essa vantagem para obter a peça já com as características desejadas.

A obtenção de alta resistência final do material e quase nenhum springback garantem ao processo de estampagem a quente suas vantagens em relação a

estampagem a frio quando é analisado sua aplicabilidade, principalmente para a indústria automotiva, que busca vantagens como redução no peso do carro para diminuir o consumo de combustível e consequentemente diminuir a agressão ao ambiente, aumentar a segurança do carro por peças que protejam os passageiros do veículo entre outras necessidades.

5. CONCLUSÃO

Com o estudo da anisotropia do material, pode-se concluir que o uso de material laminado não implica em possíveis mudanças das propriedades mecânicas finais da peça independente do sentido em que se faz a estampagem.

Os ensaios realizados no dilatômetro revelaram que uma temperatura de austenitização de 900 °C a 920 °C por 4 minutos e um resfriamento maior ou igual a 30 °C/s são ideais para se obter uma microestrutura completamente martensítica que não possui grão muitos grandes ou microestrutura grosseira. Um tempo muito maior que 4 minutos ou uma temperatura muito acima de 900 °C causam um crescimento de grão o que diminui a dureza final. No contraponto, tem-se que um tempo muito pequeno, não é o suficiente para austenitizar completamente a amostra, deixando grande quantidade de ferrita na microestrutura final, o que também causa diminuição na dureza da microestrutura final, e por consequência, uma menor resistência.

Esta análise mostra uma grande dependência da microestrutura do material em relação ao tempo de imersão, temperatura e taxa de resfriamento, sendo estas variáveis as que vão controlar as propriedades mecânicas finais da peça estampadas.

Neste trabalho foi possível construir uma linha de estampagem a quente completa. Cada item da linha foi desenvolvida e produzida através de pesquisas bibliográficas e ensaios para a obtenção de parâmetros para o êxito do processo. A ferramenta de estampagem foi projetada para um resfriamento rápido e que suportasse a grande variação de temperatura do processo sem que houvesse deformações ou trincas na mesma.

Utilizando os parâmetros estudados no início do projeto, foi possível fazer a estampagem à quente com sucesso onde se obteve uma microestrutura 100% martensítica com 420 HV de dureza mínima para a peça final. A redução de springback é visível em comparação a peça conformada à frio, que possui menos da metade da dureza da peça estampada a quente, o que abre portas para estampagem de peças com formatos mais complexos.

A alta resistência final do material e quase nenhum springback garantem ao processo de estampagem a quente suas vantagens em relação a estampagem a frio em relação à sua aplicabilidade principalmente para a indústria automotiva que busca vantagens como redução no peso do carro para diminuir o consumo de combustível e consequentemente diminuir a agressão ao ambiente, aumentar a segurança do carro por peças que protejam os passageiros do veículo entre outras necessidades, características mencionadas por inúmeros autores.^{[1], [2], [4], [5], [7], [35]}

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Karbasian and a. E. Tekkaya, "A review on hot stamping," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2103–2118, Nov. 2010.
- [2] K. I. Mori, "Smart hot stamping of ultra-high strength steel parts," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 22, no. October, pp. s496–s503, 2012.
- [3] M. Naderi, a. Saeed-Akbari, and W. Bleck, "The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 487, no. 1–2, pp. 445–455, Jul. 2008.
- [4] J. Zhou, B. Y. Wang, M. D. WangHuang, and D. Cui, "Effect of hot stamping parameters on the mechanical properties and microstructure of cold-rolled 22MnB5 steel strips," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 544–555, 2014.
- [5] a. Turetta, S. Bruschi, and a. Ghiotti, "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, pp. 396–400, 2006.
- [6] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor, and P. J. Gibbs, "RECENT DEVELOPMENTS IN ADVANCED HIGH STRENGTH SHEET STEELS FOR," vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2012.
- [7] M. Geiger, M. Merklein, and C. Hoff, "Basic Investigations on the Hot Stamping Steel 22MnB5," *Adv. Mater. Res.*, vol. 6–8, pp. 795–804, 2005.
- [8] H. So, D. Faßmann, H. Hoffmann, R. Golle, and M. Schaper, "An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 2, pp. 437–449, Feb. 2012.
- [9] M. Naderi, M. Ketabchi, M. Abbasi, and W. Bleck, "Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 1117–1125, 2011.
- [10] Z. W. Xing, J. Bao, and Y. Y. Yang, "Numerical simulation of hot stamping of quenchable boron steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 499, no. 1–2, pp. 28–31, 2009.
- [11] M. Merklein, J. Lechler, and M. Geiger, "Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 229–232, Jan. 2006.
- [12] P. F. Bariani, S. Bruschi, a. Ghiotti, and a. Turetta, "Testing formability in the hot stamping of HSS," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, pp. 265–268, 2008.
- [13] J. Min, J. Lin, J. Li, and W. Bao, "Investigation on hot forming limits of high strength steel 22MnB5," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 326–332, 2010.
- [14] R. S. Lee, Y. K. Lin, and T. W. Chien, "Experimental and Theoretical Studies on Formability of 22MnB5 at Elevated Temperatures by Gleeble Simulator," *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 1682–1688, 2014.

- [15] a. Barcellona and D. Palmeri, "Effect of plastic hot deformation on the hardness and continuous cooling transformations of 22MnB5 microalloyed boron steel," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 40, pp. 1160–1174, 2009.
- [16] H. Güler, R. Ertan, and R. Özcan, "Investigation of the hot ductility of a high-strength boron steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 608, pp. 90–94, Jul. 2014.
- [17] M. Merklein and J. Lechler, "Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, pp. 452–455, 2006.
- [18] H. Hoffmann, H. So, and H. Steinbeiss, "Design of hot stamping tools with cooling system," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 269–272, 2007.
- [19] D. J. Mun, E. J. Shin, Y. W. Choi, J. S. Lee, and Y. M. Koo, "Effects of cooling rate, austenitizing temperature and austenite deformation on the transformation behavior of high-strength boron steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 545, pp. 214–224, 2012.
- [20] a. Grajcar, R. Kuziak, and W. Zalecki, "Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 334–341, Sep. 2012.
- [21] T. Materials, "The Materials Information Company," *Technology*, vol. 2, p. 3470, 2001.
- [22] H.-H. Bok, S. N. Kim, D. W. Suh, F. Barlat, and M.-G. Lee, "Non-isothermal Kinetics Model to Predict Accurate Phase Transformation and Hardness of 22MnB5 Boron Steel," *Mater. Sci. Eng. A*, Dec. 2014.
- [23] J. Zhou, B. Wang, and M. Huang, "Two constitutive descriptions of boron steel 22MnB5 at high temperature," *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 738–748, Nov. 2014.
- [24] M. Nikraves, M. Naderi, and G. H. Akbari, "Influence of hot plastic deformation and cooling rate on martensite and bainite start temperatures in 22MnB5 steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 540, pp. 24–29, Apr. 2012.
- [25] R. S. Lee, Y. K. Lin, and T. W. Chien, "Experimental and Theoretical Studies on Formability of 22MnB5 at Elevated Temperatures by Gleeble Simulator," *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 1682–1688, 2014.
- [26] M. Merklein and M. Wieland, "Investigations on Austenitization Parameters Influencing Wear Behavior Within Hot Stamping," *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 1695–1700, 2014.
- [27] a. Ghiotti, S. Bruschi, and F. Borsetto, "Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 11, pp. 1694–1700, 2011.
- [28] Z. X. Gui, W. K. Liang, Y. Liu, and Y. S. Zhang, "Thermo-mechanical behavior of the Al-Si alloy coated hot stamping boron steel," *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 26–33, 2014.
- [29] S. A. De Souza, "Ensaio Mecanicos de Materiais Metalicos - Fundamentos mecânicos e práticos." p. 286, 1982.

- [30] T. . Tszeng and G. Shi, "A global optimization technique to identify overall transformation kinetics using dilatometry data—applications to austenitization of steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 380, no. 1–2, pp. 123–136, 2004.
- [31] E. Anderson and A. Echeverri, "Efeito da temperatura de deformação não isotérmica no processo de estampagem a quente," 2015.
- [32] J. Min, J. Lin, and Y. Min, "Effect of thermo-mechanical process on the microstructure and secondary-deformation behavior of 22MnB5 steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 6, pp. 818–825, 2013.
- [33] N. Search, L. Out, R. Publications, G. Information, and A. Methods, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1," vol. 01, no. Reapproved 2007, pp. 1–13, 2012.
- [34] M. Naderi, L. Durrenberger, a. Molinari, and W. Bleck, "Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 478, no. 1–2, pp. 130–139, Apr. 2008.
- [35] B. Abdulhay, B. Bourouga, and C. Dessain, "Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 5, pp. 674–685, 2011.
- [36] P. Åkerström and M. Oldenburg, "Austenite decomposition during press hardening of a boron steel-Computer simulation and test," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 174, pp. 399–406, 2006.