

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS

JULIA MARTINS DALMOLIN

**Estudo da viabilidade técnica da aplicação da estampagem a quente do aço
AISI 15B30 no processo de fabricação de facas para o corte de cana-de-
açúcar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da USP, como requisito para
Graduação no curso de Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Eduardo Franco de Monlevade

São Paulo

Novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Eduardo Franco de Monlevade, pela dedicação aos alunos, e pela orientação nesse projeto ao longo de todo o último ano; ao André Kraszczuk, Anderson Ariza, José Rubens e Antônio Lívio Nunes, pelo direcionamento e acompanhamento durante ensaios experimentais, e por toda a ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa; ao Rafael Rocha Maia, pelo apoio durante a graduação.

Agradeço aos meus pais, Rosely e Laércio, por me darem todas as condições para chegar até aqui.

Por fim, agradeço aos que fizeram parte da longa jornada até a formatura: os companheiros de curso, em especial Jefferson, Jady, Lucas e Laura; os colegas do Grêmio Politécnico (gestões 2013 a 2018), pelo trabalho, pelos ensinamentos, pelas experiências inesquecíveis, e principalmente pela amizade que levarei comigo; os que de alguma outra forma entraram na minha vida para não sair mais, em especial Gabriela, Fabiana, Tainah e João.

RESUMO

Esse projeto tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de se produzir facas de corte de cana-de-açúcar (utilizadas nas colheitadeiras) a partir do aço AISI 15B30 pelo processo de estampagem a quente. A eliminação de etapas proporcionada pela implementação poderia reduzir tempo e custo geral do processo, contribuindo para o aumento da produtividade, além de possivelmente conferir propriedades mecânicas mais desejáveis ao produto final, como maior dureza e resistência.

Foi feita uma análise preliminar na qual a aplicabilidade do processo foi julgada utilizando como parâmetros apenas dureza (escala Rockwell C) e fases presentes na microestrutura, avaliados a partir de ensaios com durômetro e análises no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura. Para isso, partiu-se de uma chapa grossa (6,3 mm) desse aço, e avaliou-se a dureza e a microestrutura da peça antes e depois do recalque e dos tratamentos térmicos, verificando a possibilidade de se obter uma estrutura 100% martensítica ao longo de toda a espessura, além de conseguir atingir as especificações da faca produzida atualmente (espessura de 3,5 mm e dureza entre 52 e 54 HRC).

Os resultados não comprovaram a viabilidade técnica de alterar o processo atual, mas indicam que é possível obter uma transformação total de microestrutura mesmo com grande espessura de chapa. Seria necessário fazer alguns ajustes no processo (como utilizar prensa com maior capacidade de carga, taxa de resfriamento mais baixa, entre outros), e realizar estudos mais aprofundados de outros parâmetros para de fato poder aplicar a estampagem a quente para esse fim futuramente.

ABSTRACT

This project was developed to evaluate the technical feasibility of manufacturing blades for sugar cane harvesting machines by a hot-stamping process using AISI 15B30 steel. The elimination of steps could reduce processing time and global cost of the procedure, contributing to an increase in productivity, while also possibly granting desirable mechanical properties to the final product, such as increased hardenability and resistance.

A preliminary analysis was carried out, in which the applicability of the process was measured only by the material's hardness (in Rockwell C scale) and the microstructural phases present, evaluated by tests with a durometer and microscopical analysis. In this study, a thick sheet of steel (6,3 mm) was submitted to hardness tests and microstructure analysis, both before and after press-hardening and heat treatments, verifying the possibility of reaching a fully martensitic structure throughout the sheet's thickness, as well as obtaining the required specifications for the blade (3,5 mm thickness, and hardness between 52 and 54 HRC).

The results did not prove the modification of the process to be viable, but did indicate possible a complete microstructural transformation in spite of the sheet's large thickness. It would be necessary to adjust the process (for instance, use a higher load capacity press, a lower cooling rate, etc) to obtain results more adequate to the final objective, and study other parameters more profoundly to ultimately apply hot-stamping in this case.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas produtivas de cana-de-açúcar no Brasil.....	1
Figura 2 – Pré-colheita através da queima de cana-de-açúcar	2
Figura 3 – Máquina colhedora de cana-de-açúcar e seus principais mecanismos.....	3
Figura 4 - Vista superior esquemática de uma típica faca utilizada no corte basal	4
Figura 5 – Facas utilizadas no corte basal, durante seu processo de fabricação	4
Figura 6 – Esquema relacionando etapas do processo, com transformações e propriedades envolvidas	7
Figura 7 – Esquemas dos tipos de estampagem a quente: acima, a direta (a); abaixo, a indireta (b)	8
Figura 8 – Gráficos mostrando os resultados dos testes de Lechler e Merklein (2008): à esquerda (a), uma relação de tempos e temperaturas de austenitização, fixada uma espessura de chapa; à direita (b), uma relação de tempos de austenitização e espessuras de chapa	9
Figura 9 – Perfis de temperatura nos ensaios de Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016), com temperatura de água de resfriamento de 15°C: à esquerda, pressão de contato da prensa foi 18 MPa; à direita, 64 MPa.....	11
Figura 10 - Perfis de temperatura nos ensaios de Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016), com temperatura de água de resfriamento de 5°C: à esquerda, pressão de contato da prensa foi 28 MPa; à direita, 64 MPa	11
Figura 11 - Forno mufla (com bomba de vácuo acoplada) utilizado	13
Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada	14
Figura 13 - Unidade de água gelada utilizada	14
Figura 14 - Conjunto utilizado nos ensaios (forno à esquerda e prensa hidráulica à direita) ..	15
Figura 15 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 100x.....	18
Figura 16 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 200x.....	19
Figura 17 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 500x.....	19
Figura 18 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 100x.....	20

Figura 19 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 200x.....	20
Figura 20 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 500x.....	21
Figura 21 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, no aumento de 10000x ...	22
Fonte: Arquivo pessoal	22
Figura 22 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, no aumento de 2500x	22
Figura 23 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, evidenciando uma inclusão na microestrutura.....	23
Figura 24 – Microestruturas da chapa I (proveniente do 1º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	27
Figura 25 – Microestruturas da chapa 1 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	27
Figura 26 – Microestruturas da chapa 2 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	28
Figura 27 – Microestruturas da chapa 3 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	28
Figura 28 – Microestruturas da chapa 4 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	28
Figura 29 – Microestruturas da chapa I (proveniente do 1º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	29
Figura 30 – Microestruturas da chapa 1 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	29
Figura 31 – Microestruturas da chapa 2 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	29
Figura 32 – Microestruturas da chapa 3 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	30
Figura 33 – Microestruturas da chapa 4 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x.....	30
Figura 34 - Microestrutura da amostra temperada, capturada no MEV, sob o aumento de 10000x.....	31
Figura 35 - Microestrutura da amostra revenida, capturada no MEV, sob o aumento de 10000x	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição típica de um aço AISI 15B30	6
Tabela 2 – Propriedades típicas de um aço AISI 15B30.....	6
Tabela 3 – Composição química geral em peso da amostra inicial	23
Tabela 4 - Composição química da inclusão em destaque na Figura 22	23
Tabela 5 - Relação de tempo de austenitização, tempo de transição e espessura final das chapas utilizadas no 1º ensaio.....	24
Tabela 6 - Relação de tempo de austenitização, tempo de transição e espessura final das chapas utilizadas no 2º ensaio.....	24
Tabela 7 - Relação de dureza medida nas chapas temperadas e revenidas	25

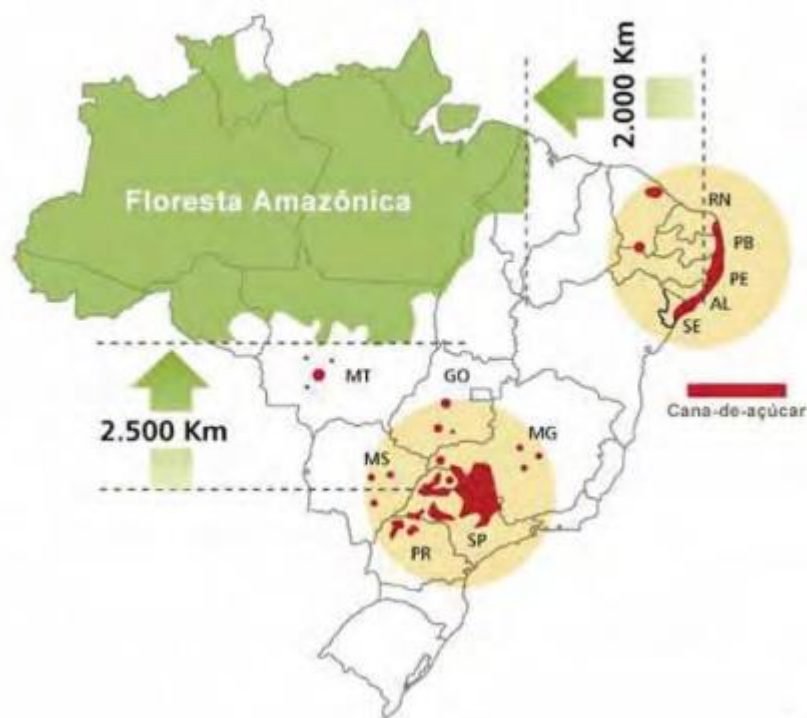
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	Aços com boro	5
2.2.	Aço AISI 15B30	6
2.3.	Processo de estampagem a quente	7
2.4.	Estampagem a quente em chapas de grande espessura	10
2.5.	Processo de fabricação atual da faca vs. Processo proposto	12
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1.	Caracterização do material como recebido	14
3.2.	Ensaio no forno e prensa	15
3.2.1.	1º ensaio	16
3.2.2.	2º ensaio	16
3.3.	Preparação das amostras ensaiadas	16
4.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	18
5.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	34
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

Desde o século XVI, a produção de cana-de-açúcar tem grande importância socioeconômica no Brasil. Segundo a Sebrae, é o setor que teve maior participação na história do país, pois a planta encontrou em território brasileiro condições muito favoráveis ao seu desenvolvimento, e sua expansão foi extremamente rápida: os primeiros engenhos foram instalados pelos colonizadores portugueses a partir de 1530, e em meados de 1550 o país já era o maior produtor mundial de açúcar. Hoje, o Brasil ainda é líder na produção mundial de cana-de-açúcar, com uma área plantada de mais de 8 milhões de hectares, responsável pela produção de mais de 600 milhões de toneladas de cana por ano (Conab - Companhia Nacional de Abastecimento, 2019) [1][2]. A produção nacional se encontra concentrada principalmente em São Paulo, Paraná, na região do Triângulo Mineiro e na Zona da Mata Nordestina (**Figura 1**), sendo São Paulo o maior produtor do país (MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2014) [3].

Figura 1 – Áreas produtivas de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Adaptado de [4]

O ciclo econômico da cana ajudou a alavancar os alicerces da sociedade e economia brasileiras, sendo considerado um setor de tradição no país. O Brasil tornou-se referência mundial nessa área não só pelo alto volume produzido, mas também pelo caráter pioneiro no desenvolvimento tecnológico direcionado a maior sustentabilidade. Um exemplo disso é a utilização de resíduos do processo de colheita, como o bagaço, na produção de etanol, contribuindo para a inclusão de biocombustíveis na matriz energética [3].

Apesar dos benefícios desses avanços, há também desvantagens e pontos possíveis de melhoria no processo produtivo. A colheita, por exemplo, apresenta uma grande necessidade de avanço. Ambos os métodos mecanizado e manual são tradicionalmente precedidos pela queima da plantação (**Figura 2**), que reduz o risco de acidentes de trabalho para os cortadores de cana, e facilita a operação de máquinas na lavoura [5]. Porém, essa prática provoca degradação das terras agrícolas e poluição atmosférica pela emissão de gases de efeito estufa (CO₂), fumaça e cinzas, que prejudicam a qualidade do ar e a saúde da população vizinha das áreas de cultivo [3]. Além disso, a colheita manual também apresenta desvantagens, como o aumento do custo de uma mão-de-obra que vem se tornando cada vez mais escassa, e a resistência por parte de cortadores em trabalhar em canaviais onde não é realizada a queima em função da maior dificuldade operacional [4].

Figura 2 – Pré-colheita através da queima de cana-de-açúcar



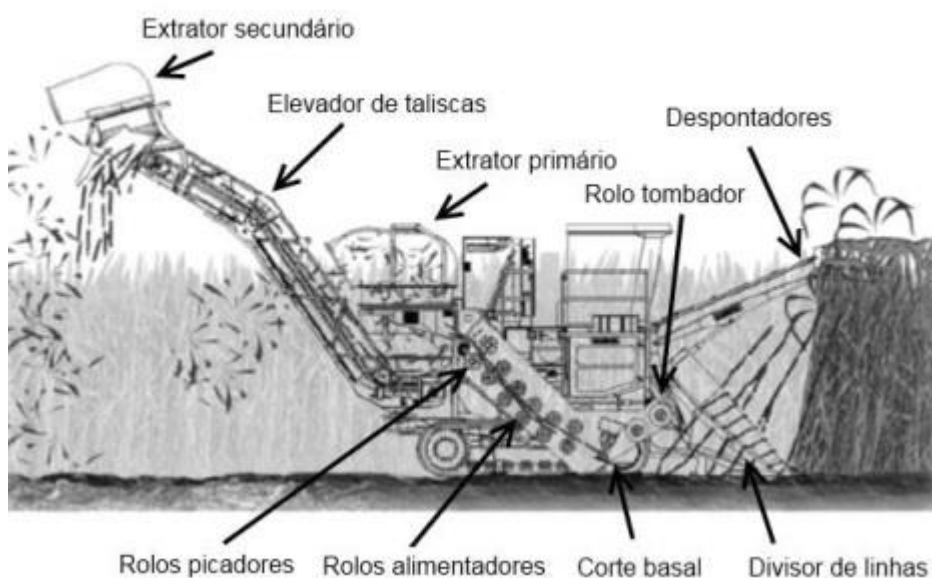
Fonte: [6]

Assim, o desenvolvimento contínuo da colheita mecanizada tem se mostrado uma alternativa de solução mais sustentável. O crescente uso de máquinas colhedoras nas lavouras tem apresentado como vantagens uma redução de custos, maior rapidez e eficiência da

operação, e oportunidade de explorar maiores áreas de plantação. Além disso, há máquinas com tecnologia de acompanhamento integrada, que oferecem informações da operação em tempo real, auxiliando a otimização do processo e favorecendo a chamada agricultura de precisão com os dados coletados. Dessa forma, a mecanização do processo de colheita vem aumentando, principalmente nos últimos 15 anos, substituindo os métodos de queima e de colheita manual [5][6].

Na região Centro-Sul do Brasil, a expansão da mecanização ocorreu de forma acelerada. Em São Paulo, há uma Lei Estadual que estabelece prazos para a eliminação da queima de cana, favorecendo ainda mais a mecanização. Mas há diversas dificuldades e desafios a serem considerados nessa transição. Um dos maiores problemas do uso de colhedoras de cana (**Figura 3**) é a perda de produtividade das áreas cultivadas devido a danos causados pelo corte basal [5].

Figura 3 – Máquina colhedora de cana-de-açúcar e seus principais mecanismos



Fonte: Adaptado de [4]

Foram realizadas diversas pesquisas no campo para melhorar o processo de corte, como a de Santos (2008), que determinou a influência negativa do desgaste das facas no corte basal sobre a rebrota da cana-de-açúcar. A cana é uma safra de colheita aproximadamente anual (o período de vida em geral varia entre 12 e 18 meses), e pode ter até 6 ciclos antes de ser replantada. No entanto, a deformação do caule durante o corte com faca mal calibrada é um dos grandes responsáveis pelos danos à soqueira, fazendo com que aquele pé não cresça

mais [4][6]. Ou seja, perdem-se pés que poderiam ser produtivos novamente em futuras safras.

Portanto, a fabricação de facas mais resistentes e a baixos custos é de extremo interesse na busca por otimização e melhoria da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Esse é o foco do trabalho a seguir, cujo objetivo é verificar a possibilidade de fabricar uma faca propícia para ser utilizada nas máquinas colhedoras de cana (**Figuras 4 e 5**) pelo processo de estampagem a quente de uma chapa de aço AISI 15B30. O sucesso do método indicaria a possibilidade de ganhar produtividade, já que ao realizar a têmpera na matriz de estampagem, elimina-se etapas de processamento, diminuindo os custos de fabricação da faca.

Figura 4 - Vista superior esquemática de uma típica faca utilizada no corte basal



Fonte: Adaptado de [4]

Figura 5 – Facas utilizadas no corte basal, durante seu processo de fabricação



Fonte: Imagem capturada do vídeo PW HIDRO – Linha Canavieira [18]

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aços com boro

Desde a década de 1930, pesquisas têm relatado a influência do boro no aumento da temperabilidade dos aços. Em meados de 1950, estudos determinaram que pequenas quantidades de boro no aço podem ter grandes efeitos na temperabilidade, mas que essa influência é dependente também de outros fatores, como teor de carbono, teores de nitrogênio e desoxidantes, temperatura de austenitização e tamanho de grão [7]. Assim, ao longo dos anos foram feitos diversos estudos para verificar a viabilidade de substituir elementos de liga caros (como cromo, níquel e molibdênio) por boro (uma alternativa mais econômica) [8].

A adição de boro ao aço aumenta a sua dureza pois o boro livre dissolvido segrega para os contornos de grão, diminuindo a energia interfacial de grãos austeníticos adjacentes, retardando assim a nucleação de ferrita. O boro essencialmente promove uma estabilização da austenita [8][9]. Porém, um excesso de boro (acima de 50 ppm) pode atuar diminuindo a dureza, pois a precipitação de borocarbonetos ou boronitretos nos contornos de grão austenítico pode favorecer a nucleação de ferrita, causando diminuição do endurecimento. Segundo investigações de Melloy, Slimmon e Podgursky (1973), a quantidade de boro para se atingir máxima temperabilidade e aumento de dureza varia entre 3,3 e 25 ppm [8][10].

Quando dissolvido em aço, o boro tem grande afinidade com elementos como oxigênio e nitrogênio, combinando-se facilmente a eles. Portanto, é comum adicionar elementos de liga sequestradores de O e N, para que se combinem antes do boro, deixando-o livre no aço. Assim, costuma-se fabricar aços com silício ou alumínio atuando como desoxidantes, e zircônio ou titânio impedindo a formação de nitreto de boro [11].

Um importante fator que influencia na temperabilidade do aço com boro é a temperatura de austenitização, cujo aumento causa o aumento da temperabilidade. Porém, esse aumento da temperatura de austenitização também está relacionado ao aumento do tamanho de grão austenítico, que por sua vez causa fragilização desses aços [8]. Por isso, ainda são bastante estudados métodos de controle do tamanho de grão, com o objetivo de se obter um aço mais barato com a melhor combinação de propriedades mecânicas apresentadas anteriormente, ao evitar um excessivo crescimento de grão durante a fabricação.

2.2. Aço AISI 15B30

O aço AISI 15B30 (objeto de estudo desse trabalho) é um aço ao boro com médio percentual de carbono, o que lhe confere boa conformabilidade e tenacidade, além de melhor soldabilidade em relação a aços com maior teor de carbono. Sua composição e principais propriedades mecânicas podem ser analisadas respectivamente nas **Tabelas 1 e 2** a seguir [10]:

Tabela 1 – Composição típica de um aço AISI 15B30

ELEMENTO	%
C	0,27 – 0,35
Mn	1,15 – 1,50
Si	0,15 – 0,35
P	0,03 máx
S	0,025 máx
Cr	0,20 máx
Mo	0,06 máx
Ni	0,30 máx
Cu	0,25 máx
Ti	0,01 – 0,06
B	0,0005 – 0,003

Fonte: Adaptado de [10]

Tabela 2 – Propriedades típicas de um aço AISI 15B30

PROPRIEDADE	VALOR
Limite de escoamento (MPa)	320 – 400
Limite de resistência (MPa)	560 – 640
Alongamento	16 – 28 (% em 200 mm)
Dureza (HB)	160 - 200

Fonte: Adaptado de [10]

O aço AISI 15B30 é bastante utilizado para fins agrícolas (como na fabricação de facas para corte de cana, colheita e descaroçamento de algodão, e lâminas roçadeiras de grama, etc), onde é exigida resistência ao impacto e ao desgaste. Também é usado em molas estáticas,

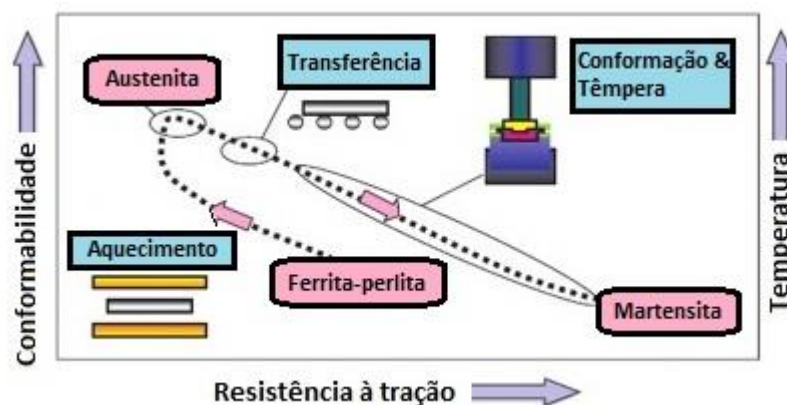
ferramentas de construção civil (espátulas e desempenadeiras), ferramentas manuais (picaretas e enxadas) e autopeças (linguetas de cinto de segurança, componentes de embreagem e presilhas para contrapeso da roda automotiva) [10]. Há um crescente interesse nesse aço por parte das indústrias automobilística e ferroviária, devido a presença de propriedades almejáveis para essas aplicações, como maior dureza e resistência à fadiga [12].

2.3. Processo de estampagem a quente

O processo de estampagem a quente (conhecido também como “hot-stamping” ou ainda “press-hardening”) foi desenvolvido e patenteado em 1977 pela Plannja, uma empresa sueca que usou o procedimento para fabricar lâminas de serras e de cortadores de grama. Nas décadas seguintes, o processo passaria a ser cada vez mais estudado, principalmente devido ao grande interesse por parte da indústria automobilística, que começaria a utilizar aços ao boro de alta resistência em componentes de automóveis [13].

De acordo com pesquisas de Naderi, Saeed-Akbari e Bleck (2008), a estampagem a quente pode ser dita um processo não isotérmico de conformação a altas temperaturas, que possibilita produzir peças de alta resistência e evitar nelas a ocorrência de retorno elástico [14]. O procedimento consiste no aquecimento do material até a austenitização, conformação e subsequente têmpera da peça na mesma matriz de estampagem resfriada [15]. A microestrutura austenítica se transforma em martensítica devido ao rápido resfriamento, conferindo ao material conformado propriedades como um alto limite de escoamento, alta resistência a tração e alta dureza [14]. A **Figura 6** abaixo representa as transformações envolvidas no processo:

Figura 6 – Esquema relacionando etapas do processo, com transformações e propriedades envolvidas



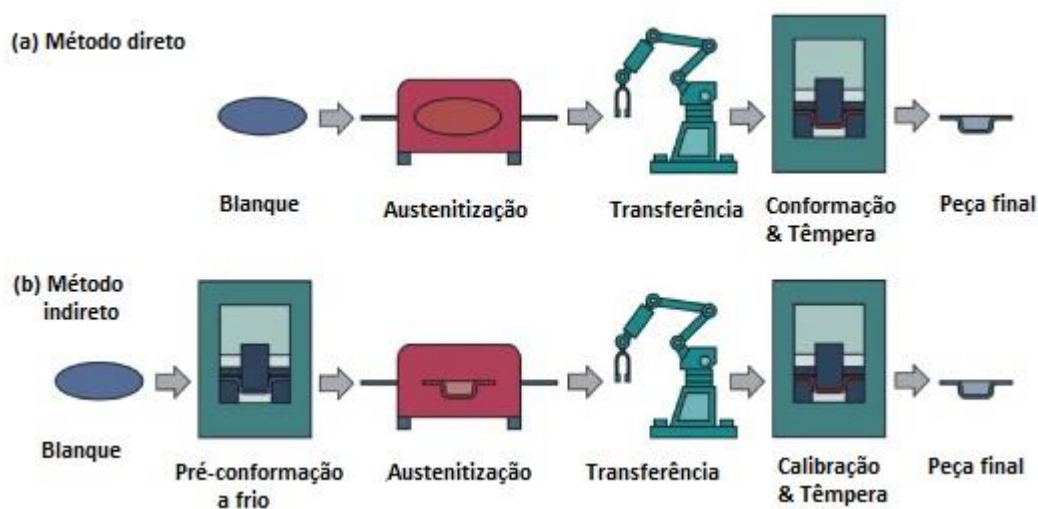
Fonte: Adaptado de [13]

Uma vantagem desse processo é justamente a combinação da conformação e da têmpera em uma única etapa. Ao eliminar uma fase de aquecimento separada, elimina-se também a quantidade de equipamentos utilizada no procedimento, e reduz-se o gasto com energia, o que é interessante dado o crescente custo de energia e a recente preocupação com o panorama ambiental [15]. A estampagem a quente também representa um grande avanço em relação à conformação a frio, pois tem melhor desempenho em aços de alta resistência, e reduz o retorno elástico na peça final. Isso permite por exemplo a fabricação de componentes de geometria complexa, que exigem alta performance em testes de colisão enquanto reduzida razão Massa/Resistência, características bastante procuradas pela indústria automobilística [14][15].

Os materiais mais utilizados na estampagem a quente são os aços ao boro, especialmente o AISI 22MnB5 [15]. Nesse material, o processo pode induzir um limite de escoamento de até 1000 MPa e uma resistência a tração de até 1500 MPa, resultados acima dos obtidos por uma conformação a frio [16].

Há dois tipos de estampagem a quente (esquematisados na **Figura 7**): direta (em que o material é aquecido até austenitização e então transferido a uma prensa, onde ocorre a conformação e têmpera na mesma matriz) e a indireta (onde um material já pré-conformado a frio é levado a temperatura de austenitização e então transferido para a prensa, onde ocorre apenas uma calibração e têmpera) [13].

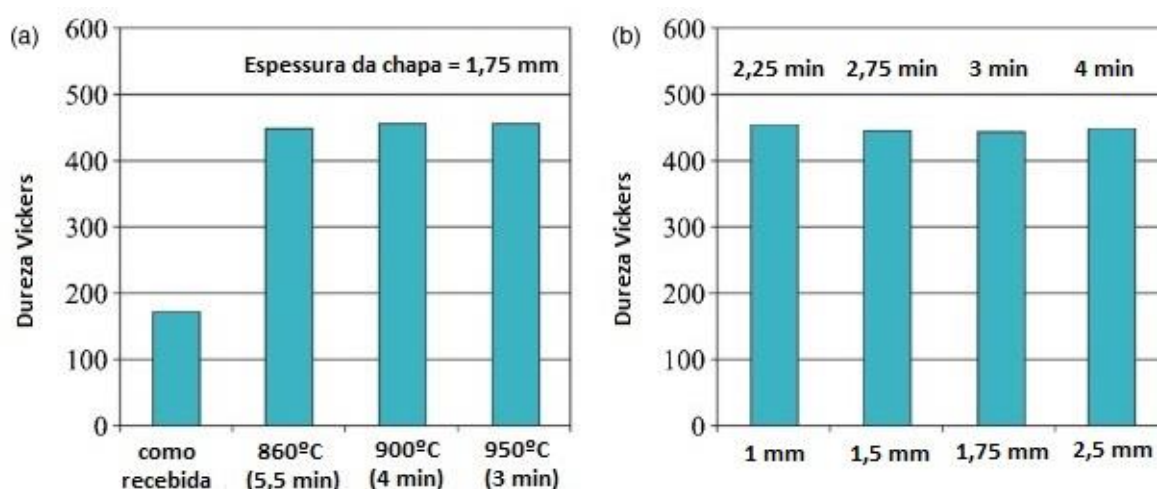
Figura 7 – Esquemas dos tipos de estampagem a quente: acima, a direta (a); abaixo, a indireta (b)



Fonte: Adaptado de [13]

Na etapa de aquecimento do processo, após atingir a temperatura de austenitização, o material deve ser mantido a uma temperatura constante por um determinado tempo, para garantir uma austenitização completa e uma estrutura homogênea na peça [15]. Estudos de Lechler e Merklein (2008) apontaram que, para o aço AISI 22MnB5, o tempo de austenitização mínimo para atingir máxima dureza de 470 HV no processo é dependente da espessura do material e da temperatura de austenitização, como mostrado na **Figura 8** abaixo:

Figura 8 – Gráficos mostrando os resultados dos testes de Lechler e Merklein (2008): à esquerda (a), uma relação de tempos e temperaturas de austenitização, fixada uma espessura de chapa; à direita (b), uma relação de tempos de austenitização e espessuras de chapa



Fonte: Adaptado de [13]

Foi possível concluir que quanto maior a espessura da chapa, maior deve ser o tempo de austenitização. Em contrapartida, quanto maior a temperatura de austenitização, menor deve ser o tempo mínimo necessário [13]. É importante pontuar que enquanto altas temperaturas de austenitização e altos tempos de austenitização favorecem a obtenção de uma estrutura austenítica homogênea (sem formação de carbonetos ou outras fases), também induzem o aumento de grão austenítico, causando fragilização do material. Portanto, é necessário equilibrar os parâmetros corretamente para obter uma estrutura mais refinada e tenaz [17].

Há três métodos de aquecimento do material na etapa de austenitização: radiação, indução e condução. A radiação ocorre em geral dentro de fornos de viga móvel (que podem se estender por mais de 30 metros), e é o mais utilizado atualmente. As principais desvantagens do processo são o grande espaço ocupado pelo equipamento e o tempo gasto nessa etapa. Nesse sentido, a condução e a indução vêm como alternativas a serem mais exploradas.

Na condução, a peça é presa por eletrodos por onde passa corrente elétrica, e a resistência do material causa o seu aquecimento. Tem melhor performance em tubos e fios, por exemplo, devido a maior resistência presente em peças mais longas. Porém, não garante homogeneidade de temperatura ao longo de toda a peça, e há uma dificuldade de aplicação em geometrias mais complexas.

Na indução, a eficiência é determinada pela posição do indutor, que determina a posição do campo magnético em relação a peça. Embora seja interessante que o indutor esteja próximo ao material, é necessário considerar a deformação da peça quando aquecida, que pode acabar danificando o sistema de aquecimento.

Na etapa da conformação, o tempo de transferência do aço entre forno e prensa deve ser o menor possível, evitando tanto a excessiva perda de calor (que prejudica a conformabilidade do material), como também a oxidação e decarbonetação da chapa caso não seja revestida com uma camada protetora (que induz a formação de uma camada dura na superfície e causaria maior desgaste da matriz na prensagem). Além disso, a conformação deve ser finalizada antes do início da transformação martensítica, para garantir um comportamento termomecânico uniforme da peça e reduzir ocorrência de falhas. Assim, é importante também que a prensa seja capaz de fechar rapidamente [13][20].

A etapa da têmpera é determinante para as propriedades finais do material. Os canais de resfriamento embutidos na matriz devem ser capazes de promover uma taxa de resfriamento suficiente para a obtenção de uma estrutura 100% martensítica, evitando a formação de bainita (estudos indicaram que, para o aço AISI 22MnB5, essa taxa mínima é de 27°C/s) [13]. Para taxas de resfriamento mais baixas que a crítica, não há tempo para a transformação completa da austenita em martensita, formando então a bainita [21].

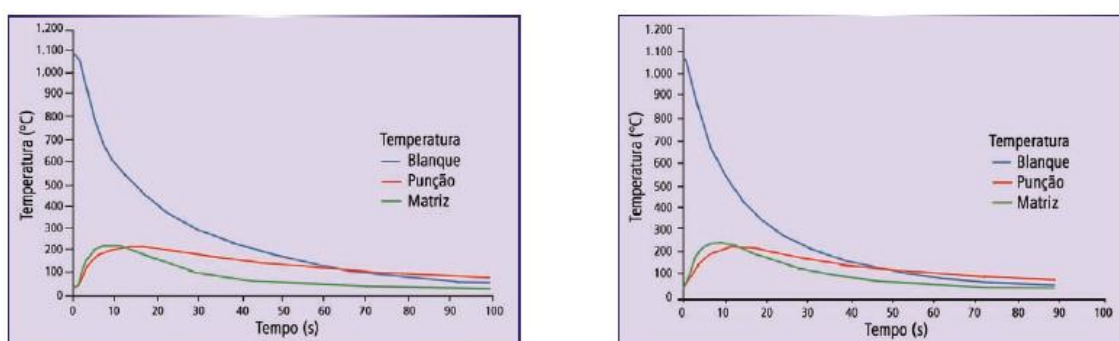
2.4. Estampagem a quente em chapas de grande espessura

Em geral, a estampagem a quente tem sido usada em chapas finas (de 0,8 mm a 2,5 mm, aproximadamente), de modo que seria necessário estudar e implementar algumas adaptações de equipamentos e parâmetros do processo, para aplicá-lo a chapas mais espessas. A tendência é que os problemas do processo seriam amplificados ao utilizar chapas de grande espessura, principalmente a não uniformidade de temperatura, de microestrutura e, consequentemente, de propriedades mecânicas finais ao longo da peça [21].

Nesse sentido, foram feitas investigações por Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016), onde chapas de aço AISI 22MnB5 com 8 mm de espessura foram submetidas a ensaios simulando

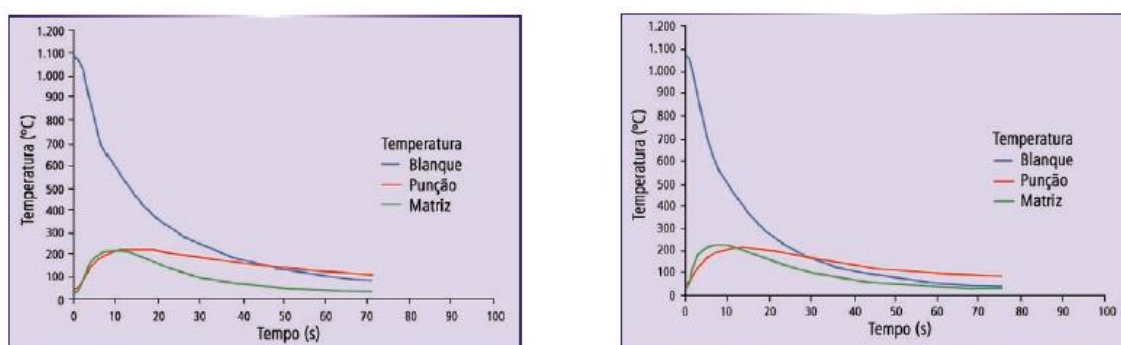
diversas condições do processo de estampagem a quente. Partindo-se de chapas austenitizadas por 5 minutos sob temperatura e 950°C, variou-se pressão exercida pela prensa e temperatura da água para o resfriamento. Nesses experimentos, foi possível obter estrutura martensítica homogênea nas peças, mesmo dada a grande espessura inicial. Além do sucesso na transformação microestrutural, foi possível concluir que a aproximação da temperatura do blanque (chapa inicial) com a temperatura da matriz durante prensagem e têmpera é mais rápida para maiores pressões exercidas, ou seja, a taxa de resfriamento é maior quanto maior a pressão que a prensa exerce. O estudo indica então que se não houver capacidade de promover baixas temperaturas de refrigeração da matriz, deve-se aplicar maiores pressões na prensagem para garantir a mesma taxa de resfriamento. Da mesma forma, se não houver capacidade de carga suficiente na prensa, deve-se utilizar temperaturas mais baixas nos canais de refrigeração embutidos na matriz [21]. As **Figuras 9 e 10** abaixo mostram os resultados desse ensaio que comprovou isso:

Figura 9 – Perfis de temperatura nos ensaios de Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016), com temperatura de água de resfriamento de 15°C: à esquerda, pressão de contato da prensa foi 18 MPa; à direita, 64 MPa



Fonte: [21]

Figura 10 - Perfis de temperatura nos ensaios de Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016), com temperatura de água de resfriamento de 5°C: à esquerda, pressão de contato da prensa foi 28 MPa; à direita, 64 MPa



Fonte: [21]

2.5. Processo de fabricação atual da faca vs. Processo proposto

Na linha de produção atual de facas para corte de cana-de-açúcar, o aço AISI 15B30 já é um dos utilizados. Sua composição garante uma vantagem em soldabilidade devido ao teor mais baixo de carbono. Além disso, o aço ao boro é capaz de induzir propriedades mecânicas finais mais desejáveis à aplicação em questão. Em geral, as chapas utilizadas têm espessura inicial entre 4,75 e 6 mm, e ao final produzem facas de corte com espessura 3,5 mm, com dureza esperada na faixa de 52 a 54 HRC [19].

Inicialmente, o aço passa por uma laminação a quente com chanfro, seguido de aplainamento e corte dos blanques, para ficar com o formato da faca final (chapa de largura 90 mm x comprimento 270 mm, com chanfro dos 2 lados de angulação 11°). São feitos os característicos furos da parte central da faca logo no blanche, à frio. As chapas são individualmente aquecidas por alguns segundos para garantir conformabilidade, e então levadas à prensa para a etapa da estampagem. Seguem-se etapas de têmpera, revenimento, revestimento e afiação, depois das quais o produto é embalado para comercialização [18][19].

A proposta de utilização da estampagem a quente nessa linha de produção otimizaria o processo descrito acima: o blanche seria aquecido até a austenitização, e então levado à prensa, onde seria conformado e temperado no mesmo equipamento. Além da economia de espaço, tempo, recursos energéticos e financeiros envolvidos quando o processo estivesse implementado, a utilização do aço AISI 15B30 conferiria propriedades mais interessantes ao produto final, como alta dureza e resistência ao desgaste (importantes para garantir que o corte basal pela colheitadeira ocorra corretamente e não danifique o pé de cana). No panorama geral, a implementação desse processo representaria um ganho em produtividade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Toda a etapa experimental foi feita utilizando a estrutura e os equipamentos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP (PMT - EPUSP).

Os ensaios de dureza foram feitos com o durômetro Dia Testor 2Rc da marca Otto Wolpert-Werke, com as cargas e pontas adequadas seguindo as normas para cada escala utilizada.

As análises microestruturais foram feitas com microscópio óptico Olympus BX60M, microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30 com detector de elétrons secundários e retroespalhados, e espectômetro de raios X EDS EDAX.

Os procedimentos envolvendo austenitização, prensagem e têmpera foram realizados com um conjunto de equipamentos, detalhados a seguir:

- um forno mufla da marca INTI Fornos e Equipamentos, com um controlador pelo qual é possível determinar tempo, temperatura e taxa de aquecimento para cada experimento (**Figura 11**)
- uma prensa hidráulica à óleo com capacidade de 15 toneladas, fabricada pela MV Maq. Equipamentos Hidráulicos, capaz de temperar a chapa conformada através de um sistema de canais internos por onde passa água refrigerada (**Figura 12**)
- uma unidade de água gelada (também chamada de “chiller”) do modelo GA 90/AR, que refrigera a água até 9°C (**Figura 13**)

Figura 11 - Forno mufla (com bomba de vácuo acoplada) utilizado



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 13 - Unidade de água gelada utilizada



Fonte: Arquivo pessoal

3.1. Caracterização do material como recebido

Uma chapa de aço AISI 15B30 de 6,3 mm de espessura foi doada pela empresa Aperam para esse projeto de pesquisa. Ela foi inicialmente cortada em faixas de cerca de 2 cm de largura, formando chapas menores para os diversos testes realizados.

Com uma faixa, obteve-se dureza média inicial da peça, a partir de 20 medições. A faixa foi então cortada em pequena seção transversal e longitudinal para análises microestruturais.

Na etapa de preparação de amostras, os dois pedaços foram embutidos em baquelite, lixados (com uma sequência de lixas de 100, 180, 220, 320, 600 e 1200) e polidos (com panos de 3 μm e 1 μm). O ataque químico foi feito com Nital 2%.

Durante a sessão no MEV, foram feitas imagens de maior aumento e também uma análise EDS, que detectou a composição química da amostra inicial e revelou algumas inclusões na amostra.

3.2. Ensaios no forno e prensa

Foram conduzidos dois experimentos: um com temperatura de austenitização de 920°C, e outro com temperatura de austenitização 950°C.

Antes de iniciar os ensaios, foram realizadas purgas utilizando a fonte de argônio e a bomba de vácuo acopladas ao forno, garantindo uma atmosfera com pressão estabilizada para iniciar os procedimentos. A unidade de água gelada mantinha a circulação de água fria (a aproximadamente 9°C) para a matriz da prensa, onde seria feita a conformação e têmpera das chapas testadas.

Figura 14 - Conjunto utilizado nos ensaios (forno à esquerda e prensa hidráulica à direita)



Fonte: Arquivo pessoal

3.2.1. 1º ensaio

No primeiro ensaio, quatro chapas foram colocadas ao mesmo tempo no forno já aquecido à temperatura de austenitização (920°C), e retiradas uma por vez após um tempo de 15 minutos nessa condição. Ao serem retiradas do forno, foram colocadas rapidamente na prensa, com o menor tempo de transição entre forno e prensa possível, em uma tentativa de minimizar a perda de calor por irradiação e deformar as peças mais facilmente a uma temperatura maior. A posição próxima do forno e da prensa era importante para ajudar a atingir um mínimo de tempo de transição (**Figura 14**).

A espessura final das chapas foi medida com um paquímetro analógico e, devido a resultados muito próximos e abaixo do esperado, foi discutida a alteração de alguns parâmetros para que o segundo ensaio fosse mais adequado aos objetivos.

3.2.2. 2º ensaio

O segundo ensaio foi dividido em duas partes:

- Na primeira parte, um par de chapas (1 e 2) foi colocado no forno no início do seu aquecimento (aquecendo junto com o forno); após forno e chapas atingirem a temperatura de austenitização (950°C), as chapas permaneceram ali austenitizando por 30 minutos; depois, foi feito um procedimento de prensagem análogo ao primeiro ensaio
- Na segunda parte, outro par de chapas (3 e 4) foi colocado no forno já aquecido à 950°C; após um tempo de austenitização de 30 minutos, foi realizado o procedimento de prensagem, porém dessa vez sem circulação de água refrigerada na matriz da prensa, em uma tentativa de retardar o início da têmpera para depois da conformação das peças (pois pensou-se que isso poderia ser uma das explicações para os resultados abaixo do esperado no primeiro ensaio, dada a boa temperabilidade do aço AISI 15B30)

3.3. Preparação das amostras ensaiadas

Após os dois ensaios, as chapas ensaiadas apresentaram um aspecto de descarbonetação nas superfícies, portanto foram submetidas a jato de areia para eliminar a camada superficial oxidada. Em seguida, as chapas foram cortadas ao meio: uma metade seria analisada na

condição temperada, e outra metade seria analisada após revenimento a 260°C por 45 minutos (temperatura e tempo utilizados na indústria), visando eliminar tensões residuais (diminuindo dureza, porém aumentando tenacidade) [19].

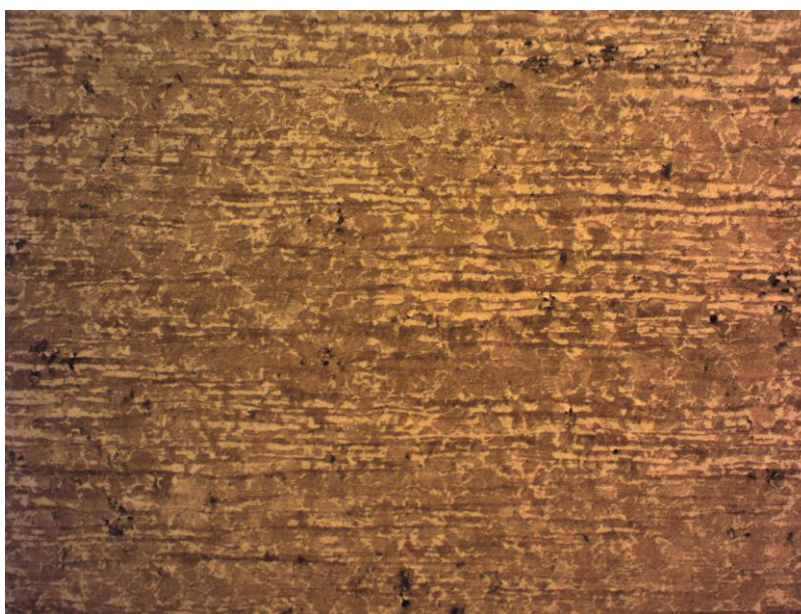
As chapas foram então cortadas em seção transversal para preparação de amostras para análise metalográfica (análoga à preparação de amostras da chapa original como recebida), e a parte restante de cada chapa foi utilizada para os ensaios de dureza.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na etapa de caracterização do material como recebido, inicialmente mediu-se uma dureza média da peça de 54 HRB (escala Rockwell B).

Após preparação de amostras para análises metalográficas, foram obtidas as imagens apresentadas nas **Figuras 15 a 20**, feitas com o microscópio óptico sob diversos aumentos.

Figura 15 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 100x



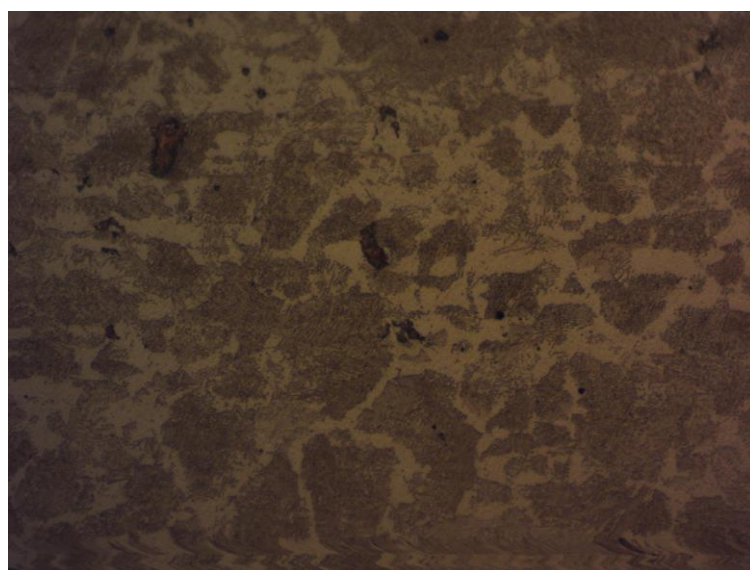
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 16 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 200x



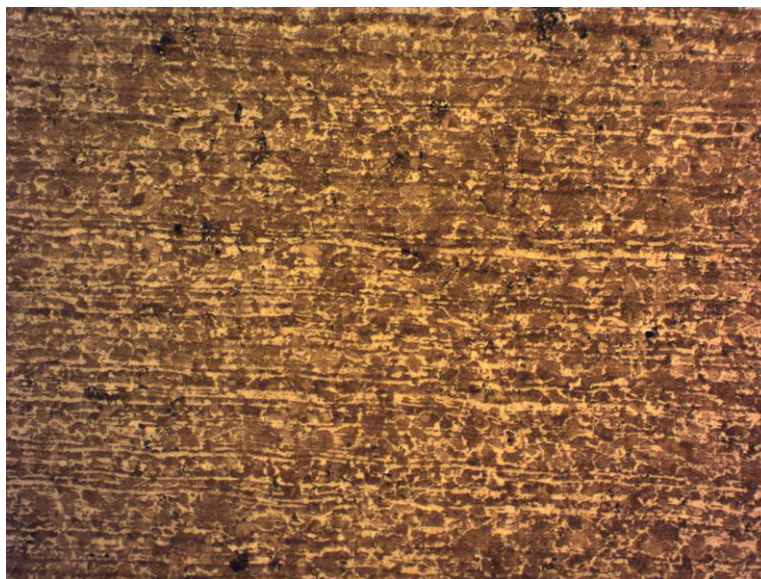
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 17 – Microestrutura do material como recebido: corte longitudinal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 500x



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 18 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 100x



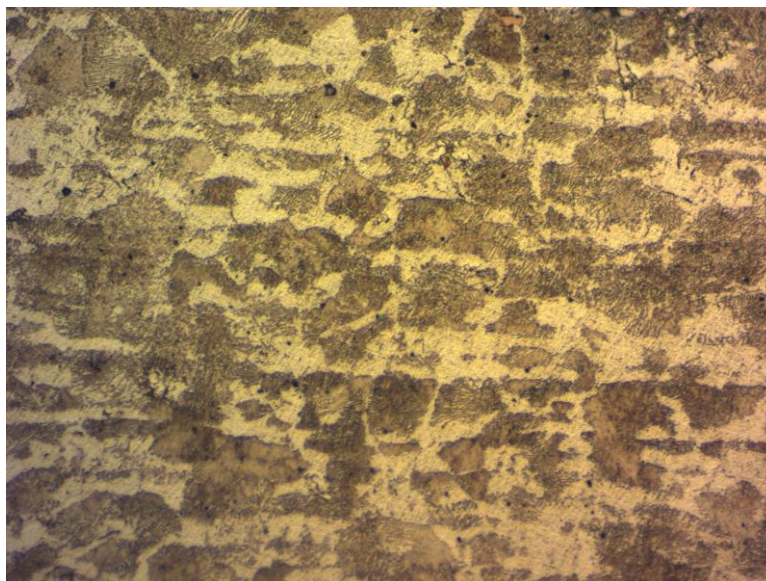
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 19 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 200x



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 20 – Microestrutura do material como recebido: corte transversal, visto pelo microscópio óptico, no aumento de 500x



Fonte: Arquivo pessoal

Percebe-se uma microestrutura basicamente ferrítica (partes mais claras) e perlítica (partes mais escuras). É nítida a estrutura lamelar das fases, evidenciando a segregação de boro nos contornos de grão, como era esperado. É importante notar também que a estrutura nas duas seções são muito semelhantes, comprovando que a microestrutura é uniforme na peça. Portanto, para análises seguintes foi utilizada apenas o corte em uma das direções (por facilidade, foi escolhido o corte transversal para as amostras seguintes).

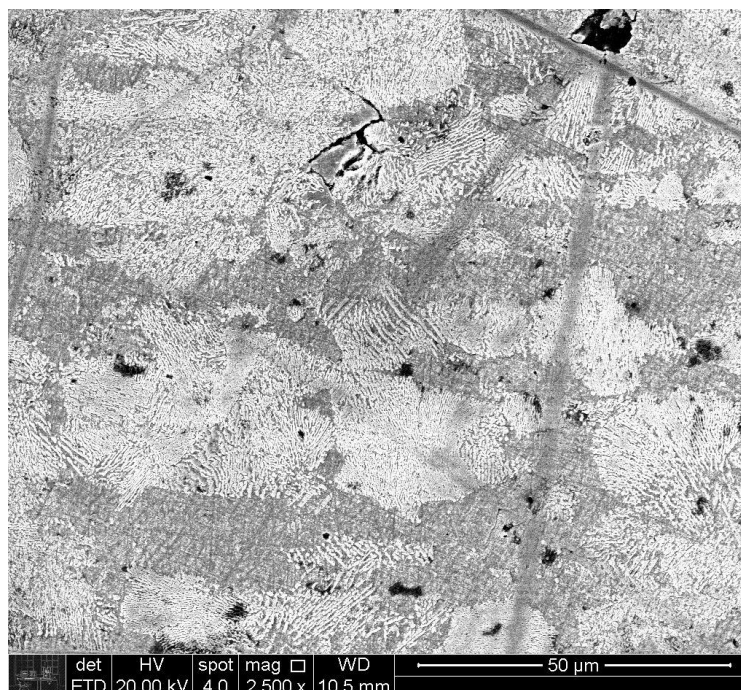
As imagens em maior aumento obtidas no MEV e apresentadas nas **Figuras 21 e 22** também mostram essa estrutura lamelar do material como recebido. A composição química da amostra detectada por EDS está apresentada na **Tabela 3**.

Figura 21 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, no aumento de 10000x



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 22 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, no aumento de 2500x



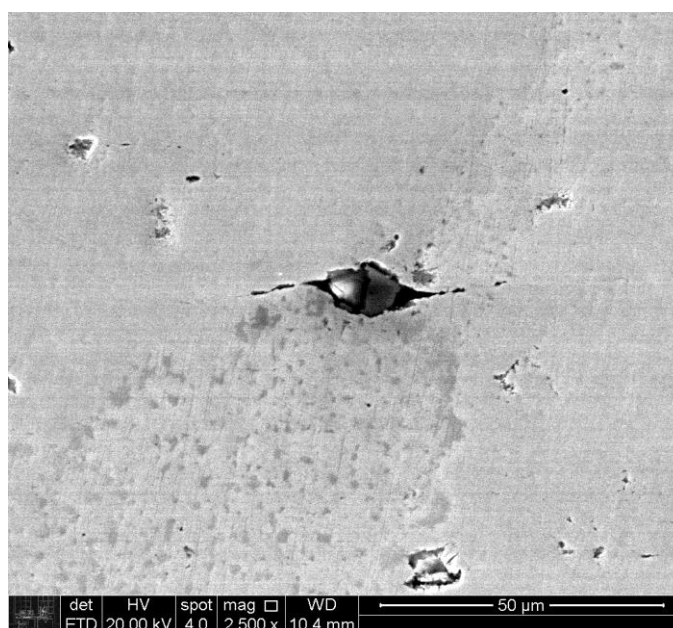
Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 3 – Composição química geral em peso da amostra inicial

ELEMENTO	PESO (%)
Si	0,26
Cr	0,49
Mn	1,37
Fe	97,88

Na **Figura 23** abaixo é exibida a imagem capturada no MEV de uma típica inclusão encontrada na microestrutura, cuja composição está relacionada na **Tabela 4**.

Figura 23 – Microestrutura da amostra inicial, capturada no MEV, evidenciando uma inclusão na microestrutura



Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 4 - Composição química da inclusão em destaque na Figura 22

ELEMENTO	PESO (%)
O	33,66
Al	0,21
Ca	31,91
Ti	32,67
Fe	1,55

A composição geral detectada na amostra está de acordo com o esperado para um aço AISI 15B30 (**Tabela 1**), com presença de Mn, Si, Cr, e inclusões ricas em Ti (adição comum em aços ao boro, para atuar como sequestrador de N).

Após a caracterização inicial do material, passou-se para os testes de estampagem a quente. Os resultados do 1º ensaio em forno e prensa estão dispostos na **Tabela 5** a seguir.

Tabela 5 - Relação de tempo de austenitização, tempo de transição e espessura final das chapas utilizadas no 1º ensaio

CHAPA	TEMPO DE AUSTENITIZAÇÃO (min)	TEMPO DE TRANSIÇÃO (s)	ESPESSURA FINAL (mm)
I	17	8±0,5	6,17±0,05
II	19	10±0,5	6,17±0,05
III	21	6±0,5	6,17±0,05
IV	25	8±0,5	6,17±0,05

Nota-se que as espessuras finais foram muito próximas entre si e também muito próximas à espessura original da chapa como recebida. Portanto, apenas uma dessas quatro chapas (chapa I) foi escolhida para uma análise metalográfica e ensaio de dureza. Além disso, foi discutida a alteração de alguns parâmetros para o 2º ensaio, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Relação de tempo de austenitização, tempo de transição e espessura final das chapas utilizadas no 2º ensaio

CHAPA	TEMPO DE AUSTENITIZAÇÃO (min)	TEMPO DE TRANSIÇÃO (s)	ESPESSURA FINAL (mm)
1	32	8±0,5	5,99±0,05
2	33	6±0,5	6,11±0,05
3	31	7±0,5	5,95±0,05
4	32	6±0,5	6,10±0,05

Percebe-se uma sutil melhora no resultado do 2º ensaio, apesar de em nenhum dos dois experimentos ter sido possível deformar o aço suficientemente (o esperado era reduzir a espessura em aproximadamente 2 a 3 mm). Os fatores que mais podem ter influenciado isso são a capacidade de carga da prensa utilizada, e o tempo de transferência das chapas entre forno e matriz, detalhados a seguir:

- Devido à grande espessura da chapa, é razoável assumir que uma prensa industrial, com maior capacidade de carga seria capaz de promover maior redução de espessura. O trabalho de Tolotti, Drunn, Harter e Souza (2016) [21] utilizou uma prensa de capacidade 100 toneladas, que conseguiu deformar chapas de 8 mm de um aço ao boro.
- O difícil manuseio das chapas contribuiu muito para o tempo de transição observado nos ensaios. Isso impacta diretamente na conformação, devido ao impacto da perda de calor na conformabilidade da chapa. O controle manual do fechamento da prensa utilizada também pode ser considerado um impeditivo para a suficiente minimização do tempo de transição.

Após os dois testes utilizando forno e prensa, a chapa I do primeiro ensaio e as quatro chapas do 2º ensaio foram analisadas quanto à dureza e microestrutura, tanto na condição temperada quanto revenida. Abaixo, a **Tabela 7** apresenta os resultados de dureza (medida na escala Rockwell C) de cada chapa:

Tabela 7 - Relação de dureza medida nas chapas temperadas e revenidas

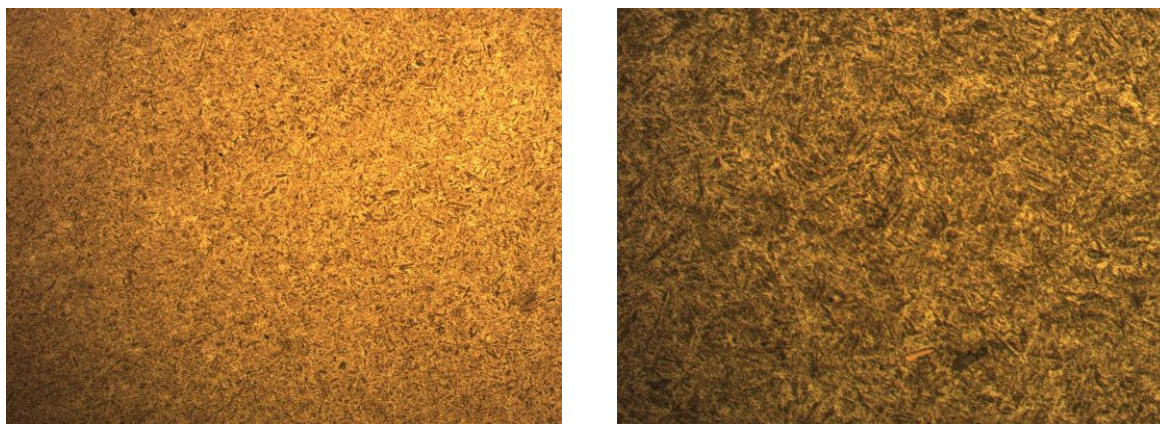
CHAPA	TEMPERADA (HRC)	REVENIDA (HRC)
I	43,5±0,5	44,0±0,5
1	41,0±0,5	35,5±0,5
2	41,0±0,5	30,5±0,5
3	37,0±0,5	36,0±0,5
4	39,0±0,5	36,5±0,5

Comparando-se essas durezas finais obtidas, algumas conclusões podem ser tiradas e hipóteses feitas:

- A chapa I, proveniente do 1º ensaio na prensa, teve um comportamento diferente das quatro chapas provenientes do 2º ensaio, apresentando a maior dureza tanto no estado temperado quanto no revenido, e obtendo inclusive uma dureza semelhante ao temperado após o revenimento. Esse resultado pode ser devido a um bom controle do tamanho de grão austenítico nessas amostras, devido aos menores tempos e temperaturas de austenitização empregados no 1º ensaio e em especial à chapa I (mostrado na **Tabela 5**). O resultado de dureza semelhante ao temperado após revenimento pode ser devido a alguma não-uniformidade na área específica da chapa que foi utilizada para esses testes de dureza, resultando em uma inconsistência pontual. Pode-se supor então que o tempo e temperatura de austenitização utilizados no 1º ensaio foram bem ajustados, faltando apenas uma prensa de maior capacidade de carga para garantir a rápida deformação até a espessura desejada.
- Houve pequena diferença entre as durezas finais nas quatro chapas provenientes do 2º ensaio. Infelizmente, a variação de alguns parâmetros ao longo do mesmo ensaio impossibilita afirmar o que mais influenciou os resultados. Apesar do tempo e temperatura de austenitização terem sido iguais para as quatro chapas (com alguns desvios, como mostrado na **Tabela 6**), as chapas 1 e 2 foram aquecidas juntamente com o forno, e as chapas 3 e 4 foram colocadas no forno já aquecido; isso pode ter tido alguma influência na uniformidade da microestrutura austenítica, já que a abertura do forno para colocar as chapas 3 e 4 desestabiliza a atmosfera criada no aquecimento do forno, o que pode explicar o pequeno mas perceptível melhor resultado das chapas 1 e 2. Além disso, as chapas 3 e 4 foram ensaiadas sem circulação de água refrigerada na matriz da prensa, o que pode ter tido efeito negativo na têmpera desses corpos de prova, pois apesar da boa temperabilidade do aço em questão, a matriz da prensa absorveu calor durante os ensaios das chapas 1 e 2, e talvez não tenha tido tempo para resfriar efetivamente, contribuindo para uma queda na taxa de resfriamento nos ensaios das chapas 3 e 4.
- Nenhuma das chapas atingiu a dureza esperada para o produto final do processo de fabricação avaliado nesse projeto, porém deve-se considerar que nos ensaios realizados foi feita uma simples compressão uniaxial das chapas, que melhor simulariam a parte do meio da faca; ou seja, não havia chanfro no material, onde seria possível e necessário obter maior taxa de resfriamento e consequentemente maior dureza.

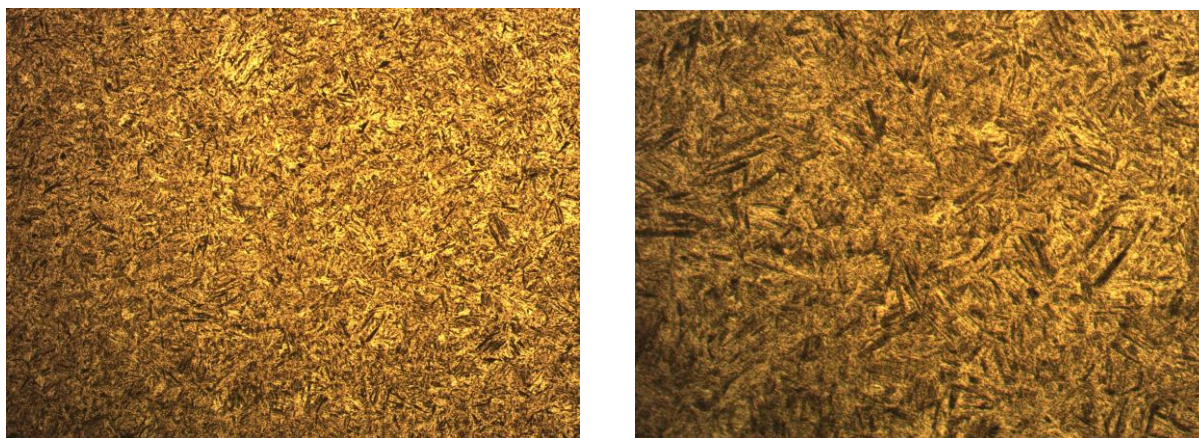
As imagens a seguir foram capturadas no microscópio óptico, para observar a microestrutura das chapas após os ensaios e tratamentos realizados (**Figuras 24 a 28** correspondem às chapas temperadas, e **Figuras 29 a 33** correspondem às chapas revenidas):

Figura 24 – Microestruturas da chapa I (proveniente do 1º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



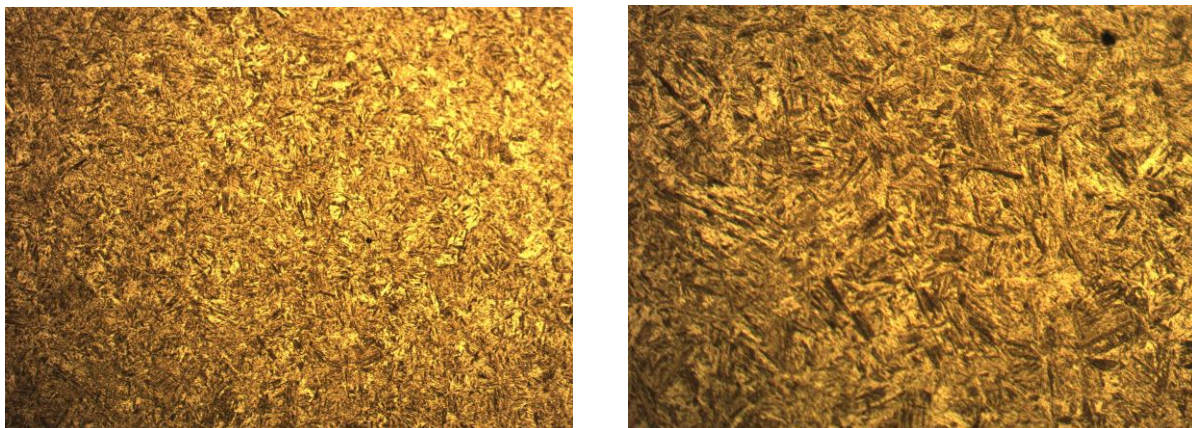
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 25 – Microestruturas da chapa 1 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



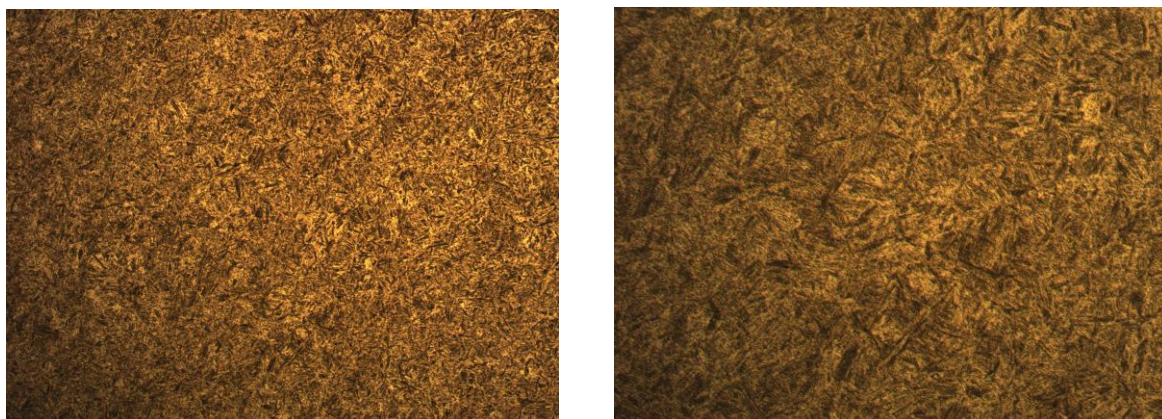
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 26 – Microestruturas da chapa 2 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



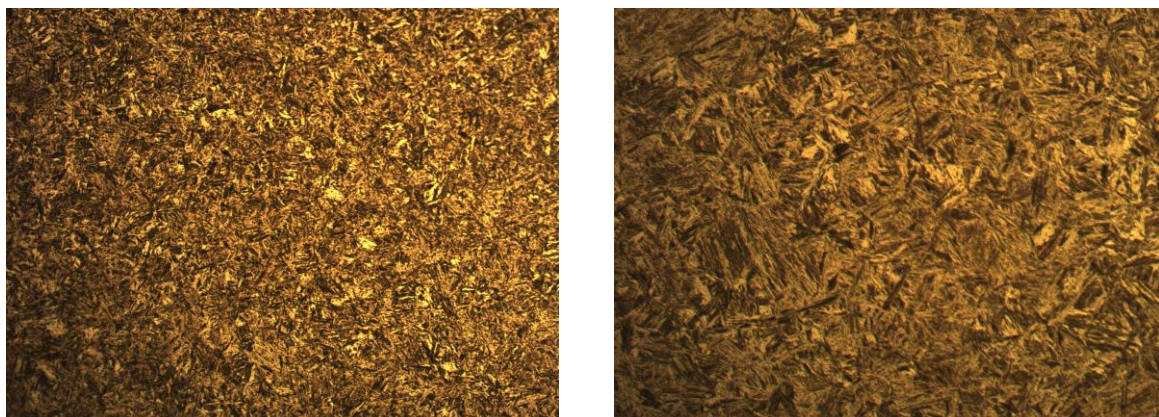
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 27 – Microestruturas da chapa 3 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



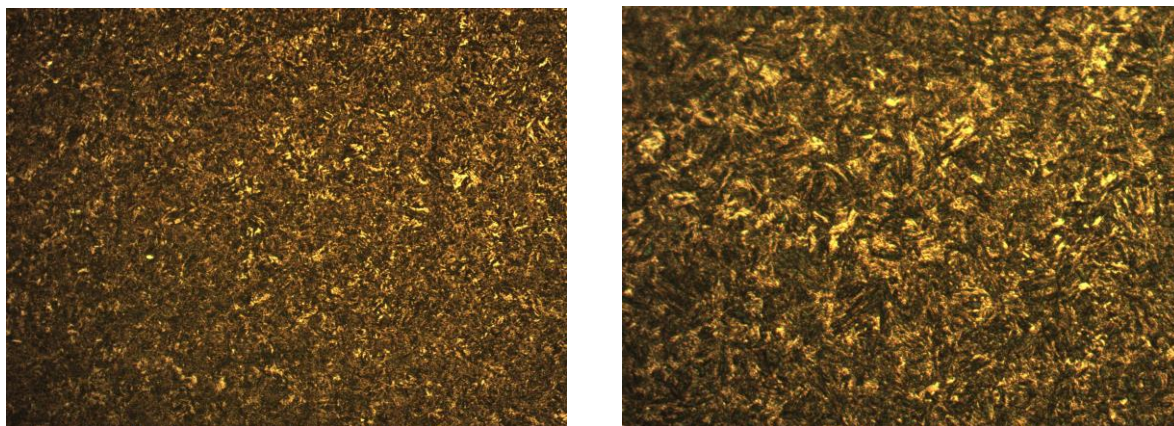
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 28 – Microestruturas da chapa 4 (proveniente do 2º ensaio), no estado temperado: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



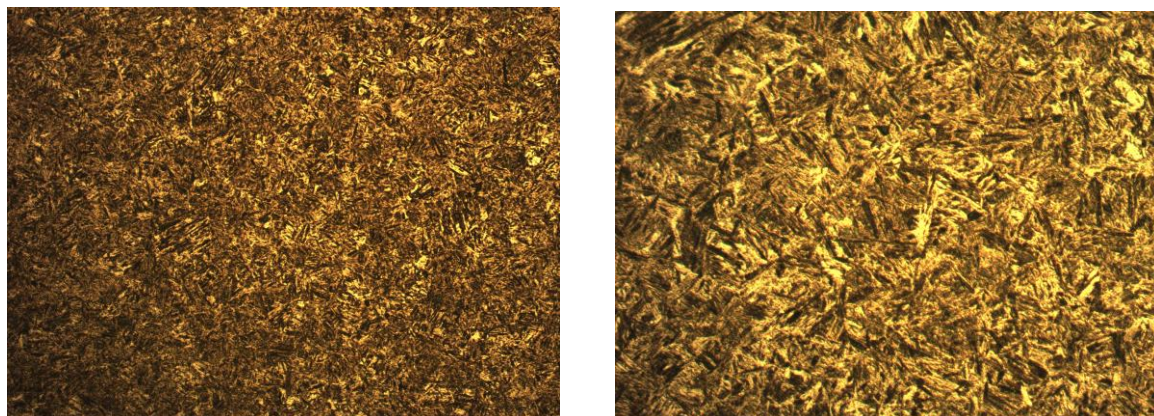
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 29 – Microestruturas da chapa I (proveniente do 1º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



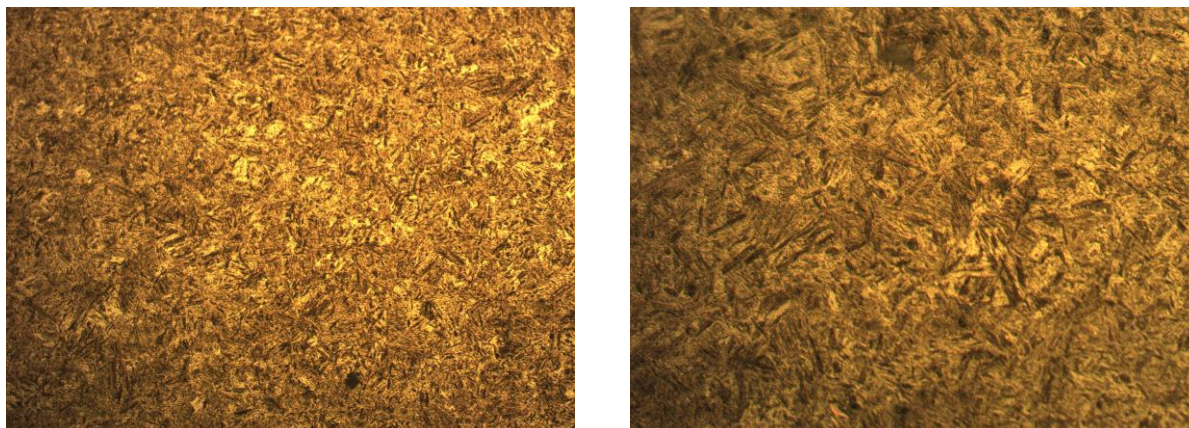
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 30 – Microestruturas da chapa 1 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



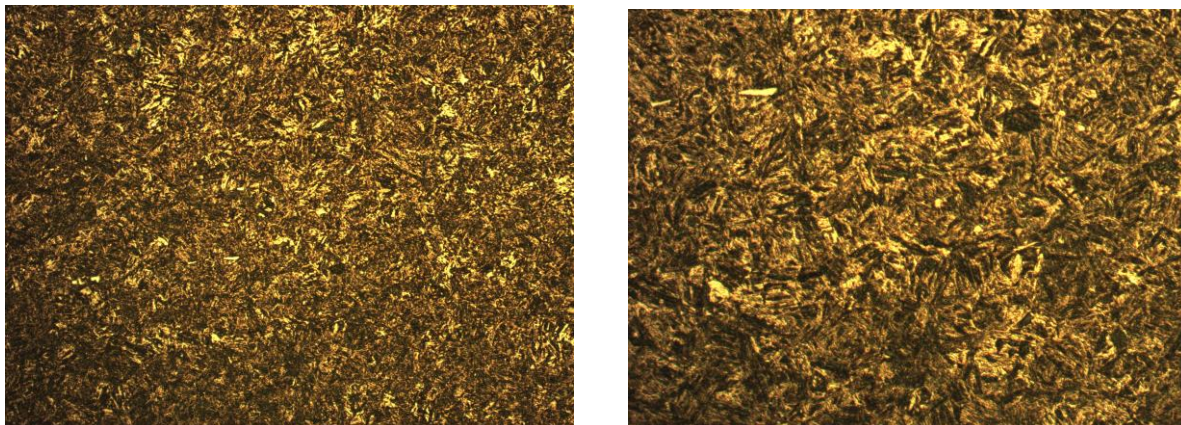
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 31 – Microestruturas da chapa 2 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



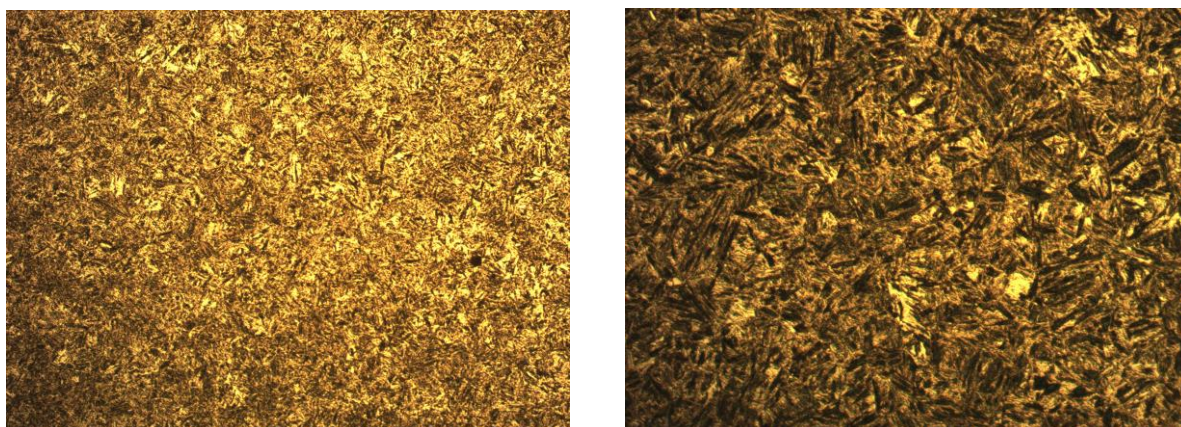
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 32 – Microestruturas da chapa 3 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



Fonte: Arquivo pessoal

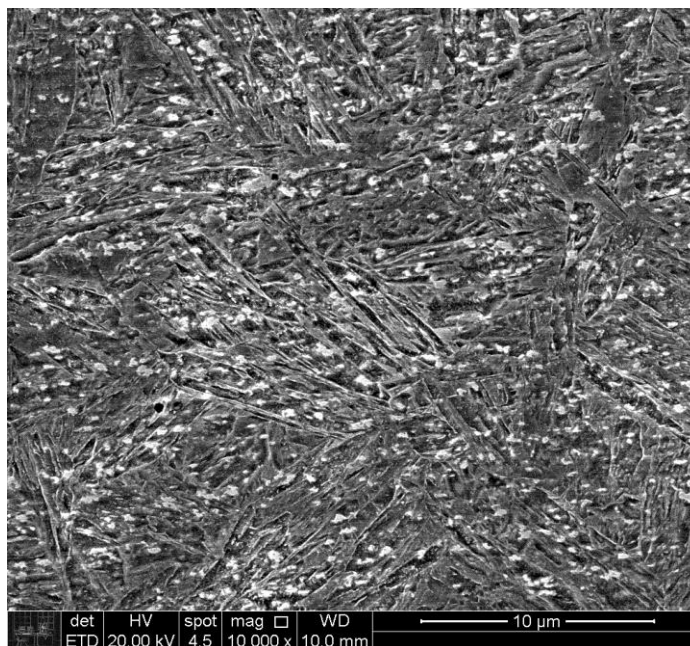
Figura 33 – Microestruturas da chapa 4 (proveniente do 2º ensaio), no estado revenido: à esquerda, no aumento de 200x; à direita, no aumento de 500x



Fonte: Arquivo pessoal

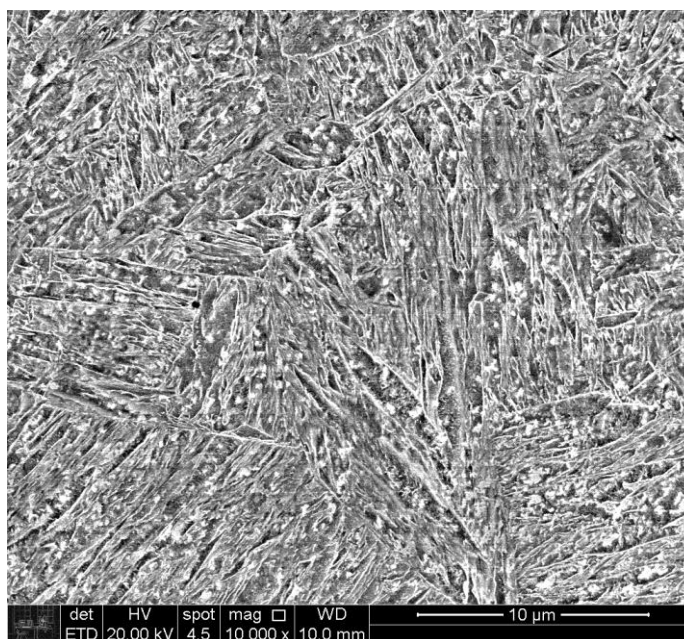
Como as microestruturas encontradas em todas as amostras acima foram semelhantes, apenas um par temperado-revenido da mesma chapa foi escolhido para ser analisado no MEV. As **Figuras 34 e 35** apresentam a microestrutura das duas amostras vistas sob maior aumento.

Figura 34 - Microestrutura da amostra temperada, capturada no MEV, sob o aumento de 10000x



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 35 - Microestrutura da amostra revenida, capturada no MEV, sob o aumento de 10000x



Fonte: Arquivo pessoal

Analisando as **Figuras 24 a 28** do material depois de temperado, observa-se uma completa mudança em relação à microestrutura inicial, e a eliminação da segregação do boro. Pode-se observar formação de martensita, mas pela dureza medida dessas amostras (**Tabela 7**) ser abaixo do esperado para uma estrutura 100% martensítica, é mais seguro dizer que

houve também formação de bainita. Vários fatores dos ensaios podem ter influenciado esse resultado, com destaque para a temperatura e tempo de austenitização, e a taxa de resfriamento imposta na matriz. Esses fatores são detalhadamente discutidos a seguir:

- A relação Tempo x Temperatura de austenitização não pôde ser bem avaliada nesse trabalho, devido à baixa quantidade de ensaios realizados e à variação dos dois parâmetros simultaneamente, impossibilitando verificar o efeito isolado de apenas um deles. Porém, baseando-se na literatura [13][15][17], pode-se supor outras combinações de tempo x temperatura, diferentes das utilizadas, que poderiam resultar em uma microestrutura austenítica homogênea na etapa de aquecimento e auxiliar assim a obtenção de uma microestrutura final 100% martensítica. É razoável propor, considerando a grande espessura das chapas utilizadas, um ensaio em que o aço é aquecido a 980°C por 15 minutos (mas deve-se atentar à possibilidade de fragilização do aço com o emprego dessas condições de austenitização, devido ao excessivo crescimento de grão austenítico induzido por esse ajuste de parâmetros).
- A temperatura da água que circulava nos canais de refrigeração da matriz era uma limitação do chiller utilizado, e a falta de termopares para o acompanhamento das temperaturas de chapa e matriz ao longo dos ensaios não permitiu que fosse calculada a taxa de resfriamento imposta. Porém, os resultados indicam que a taxa de resfriamento não foi suficientemente alta para a formação de uma microestrutura 100% martensítica. Dada a grande espessura da chapa e a baixa capacidade de carga da prensa (15 toneladas), a literatura [21] sugere que seria necessário empregar temperaturas menores nos canais, para obter maiores taxas de resfriamento. Pode-se supor que resfriando a água a 5°C poderia ajudar nesse sentido, ou então até utilizar outras substâncias de resfriamento nos canais, como nitrogênio (que atinge temperaturas mais baixas que água no estado líquido). No entanto, deve-se tomar cuidado nesse ajuste, considerando a boa temperabilidade do aço AISI 15B30, para não iniciar a têmpera antes do fim da conformação.

Comparando as **Figuras 24 a 28** (amostras temperadas) com **Figuras 29 a 33** (amostras revenidas), não foram encontradas grandes disparidades na microestrutura. Na avaliação visual, foi possível identificar uma pequena diferença: no revenido havia presença de pequenos pontos escuros uniformemente distribuídos na amostra, evidência de que houve precipitação de carbonetos, o que explica a queda de dureza nessas amostras em relação às temperadas. Isso também explica o tom em geral mais escuro das imagens de amostras

revenidas (diferença mais fácil de identificar nas figuras), pois os carbonetos alteram a forma de ataque do Nital 2%.

Nas **Figuras 34 e 35** capturadas no MEV, pode-se observar melhor a completa eliminação da microestrutura ferrítica-perlítica lamelar que havia nas amostras como recebidas (**Figuras 20 e 21**). Infelizmente, devido ao tamanho muito reduzido, não foi possível identificar os carbonetos do revenido utilizando EDS.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A viabilidade técnica de se realizar a estampagem a quente com aço AISI 15B30 foi avaliada a partir de análises microestruturais e resultados de dureza antes e depois de ensaios simulando o processo, porém não foi totalmente comprovada a partir dos testes realizados para esse projeto.

A partir das imagens feitas com o microscópio óptico, já é observada uma completa mudança na microestrutura das peças. Apesar de não haver suficiente alteração de espessura e não obter os resultados esperados de dureza devido a formação de bainita, esse resultado é de grande importância tecnológica pois reforça que é possível ter uma transformação microestrutural termicamente induzida ao longo de toda a peça, mesmo tendo grande espessura inicial.

Portanto, apesar de não obter os resultados esperados, é indicado seguir otimista em pesquisas com maiores aprofundamentos nessa técnica futuramente, focando na alteração de alguns parâmetros para de fato conseguir deformar a peça na prensa (diminuindo sua espessura até a ideal para a fabricação da faca de corte de cana-de-açúcar em questão) e obter uma microestrutura 100% martensítica (para garantir as propriedades mecânicas desejadas).

Os testes feitos nesse projeto levantaram algumas questões, que poderiam ser resolvidas com uma melhor abordagem em futuras pesquisas. Entre alguns exemplos:

- Utilização de uma chapa de aço com espessura inicial menor, mais similar a utilizada no processo atual
- Utilizar uma prensa com maior capacidade de carga
- Simular o processo com chanfro no material ensaiado, para avaliar se é possível obter a dureza esperada na seção da faca na qual ela é mais necessária
- Realizar pares de ensaios que variem apenas temperatura de austenitização ou apenas tempo de austenitização, para entender melhor os efeitos individuais de cada um desses parâmetros
- Estudar o gradiente de temperatura na matriz da prensa, e a transferência de calor entre chapa e matriz (pela superfície de contato), para conseguir avaliar mais precisamente os parâmetros necessários para o resultado desejado nesse procedimento
- Projetar sistema de resfriamento mais eficiente para os objetivos, por exemplo com canais mais próximos às áreas que necessitam de maior dureza

- Analisar a variação de outras propriedades e parâmetros não abordados nesse trabalho, como ductibilidade, resistência a abrasão e tamanho de grão austenítico, para melhor controlar as propriedades finais do material.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BIOFUEL PRODUCTION: RECENT DEVELOPMENTS AND PROSPECTS, Croatia: InTech, 2011
- [2] *Safra brasileira de cana em 2019/20 deve atingir 615,98 milhões de t, diz Conab – 2019 –* Disponível em:
<<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cana/noticia/2019/05/globo-rural-safra-brasileira-de-cana-em-201920-deve-atingir-61598-milhoes-de-t-diz-conab.html>>.
Acesso em: 13 nov. 2019
- [3] *Corte de cana manual x mecanizada: Um olhar na sustentabilidade – 2016 –* Disponível em: <<https://singep.org.br/5singep/resultado/266.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- [4] TOLEDO, Anderson de, *Qualidade do corte basal na colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua. 2012. 106f. Tese de Doutorado – Unesp, Jaboticaba, 2012.*
- [5] *Colheita Mecanizada: conheça o sistema que reduz custos de produção e garante elevada eficiência operacional –* Disponível em: <<https://tecnologianocampo.com.br/colheita-mecanizada/>>. Acesso em: 16 jul. 2019.
- [6] RÍPOLI, T.C.C.; MOLINA, W.F.; RÍPOLI, M.L.C., *Energy Potential of Sugar Cane Biomass in Brazil*. Scientia Agricola, Piracicaba, v.57, n.4, Outubro/Dezembro 2000
- [7] RESTREPO, H.S.; TOBÓN, D.M., *Resistencia a la abrasion vs. Resistencia al impacto del acero AISI 15B30, templado y revenido*. DYNA, v.74, n.153, p. 125-133, 2007
- [8] HWANG, B.; SUH, D.; KIM, S., *Austenitizing temperature and hardenability of low-carbon boron steel*. Scripta Materialia, v.64, n.12, p. 1118-1120, Junho 2011
- [9] OLDENBURG, M.; AKERSTROM, P., *Austenite decomposition during press hardening of a boron steel—Computer simulation and test*. Journal of Materials Processing Technology, v.174, n. 1-3, p.399-406, Maio 2006
- [10] VERÍSSIMO, T.C., *Levantamento experimental da curva TTT do aço 15B30. 2012. 102f. Trabalho de Conclusão de Curso – FEI, São Bernardo do Campo, 2012*

- [11] LIN, H.; CHENG, G., *Analysis of hardenability effect of boron*. Materials Science and Technology, v.6, n.8, 1990
- [12] VIÁFARA, C.C.; CASTRO, M.I.; VÉLEZ, J.M.; TORO, A., *Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels*. Wear, v.259, n. 1-6, p.405-411, Julho/Agosto 2005
- [13] KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A.E., *A review on hot-stamping*. Journal of Materials Processing Technology, v.210, n.15, p.2103-2118, Novembro 2010
- [14] NADERI, M.; KETABCHI, M.; ABBASI, M.; BLECK, W., *Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping*. Journal of Materials Processing Technology, v.211, n.6, p. 1117-1125, Junho 2011
- [15] KOLLECK, R.; VEIT, R.; MERKLEIN, M.; LECHLER, J.; GEIGER, M., *Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels*. CIRP Annals, v.58, n.1, p.275-278, 2009
- [16] SO, H. et al. *An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process*. Journal of Materials Processing Technology, v.212, n.2, p. 437-449, Fevereiro 2012
- [17] NADERI, M.; KETABCHI, M.; ABBASI, M.; BLECK, W., *Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different Hot Stamped B-bearing Steels*. Steel Research International, 2010
- [18] Vídeo PW HIDRO – Linha Canavieira, concedido por Gilberto Belan (Newport Steel)
- [19] Informação verbal por Prof. Eduardo Franco de Monlevade e Gilberto Belan
- [20] *Simulação numérica – Investigação Experimental: Processo de estampagem à quente em chapas de grande espessura* – 2018 - Disponível em: <
<https://www.revistaferramental.com.br/artigo/simulacao-numerica-investigacao-experimental-processo-estampagem-quente-chapas-grande-espessura>>. Acesso em: 13 nov. 2019
- [21] TOLOTTI, D.; DRUNN, J.; HARTER, I.; SOUZA, J.H.C., *Análise da estampagem a quente para o processamento de chapas grossas de aço 22MnB5*. Corte & Conformação de Metais, n.136, Agosto 2016