

Projeto de doutorado

DESENVOLVIMENTO DE UM AÇO PARA ESTAMPAGEM A QUENTE SEM REVESTIMENTO RESISTENTE À OXIDAÇÃO

Aluno: Daniel Alexandre da Costa Ximenes
Orientador: Prof. Dr. Hugo Ricardo Zschommler Sandim
PPGEM-EEL-USP

Resumo

O presente projeto de doutorado pretende desenvolver um novo tipo de aço ao boro para posterior aplicação via prensagem a quente de um aço ao boro sem a presença de revestimentos protetores metálicos externos contra a oxidação. Estes revestimentos metálicos clássicos à base de zinco, alumínio e silício são protegidos por patente, inviabilizando sua aplicação por outras empresas. O objetivo desta Tese de Doutorado é desenvolver uma liga com teores de $Cr + Si + Mo < 5\%$ com elevada capacidade de resistência à formação de óxidos durante a curta etapa de transferência do forno à prensa no processo de estampagem a quente. As composições iniciais do aço serão definidas por meio de estudos baseados em simulação termodinâmica via Thermo-Calc®. Diversas técnicas de caracterização microestrutural serão utilizadas. As curvas de transformação sob resfriamento contínuo para avaliar a temperabilidades destes novos aços serão levantadas por meio de um simulador termomecânico Gleeble 3500. Além da capacidade de evitar a formação de óxidos não aderentes ao substrato, este aço também deve apresentar temperabilidade compatível com a taxa que hoje é praticada neste processo, em torno de 30°C/s , além de apresentar propriedades mecânicas superiores às aquelas encontradas em outros aços para estampagem a quente comercializados atualmente.

1 – OBJETIVOS

O volume de peças estampadas a quente em aços de alta resistência para o setor automotivo vem aumentando. Pretende-se estudar o comportamento de diferentes aços em termos da composição química frente a um processo de conformação a quente. Outras classes de aços revestidos foram desenvolvidas, mas encontram-se protegidas por patentes. Durante o processo de conformação a quente de chapas não revestidas, sabe-se que o material é submetido a temperaturas acima da temperatura de austenitização em um forno com atmosfera controlada. Este material então é transferido para uma prensa de estampagem refrigerada e, durante a etapa de transferência que ocorre entre o forno e a prensa, o material é exposto a atmosfera ambiente, rica em oxigênio. A exposição ao oxigênio, faz com que o material apresente uma camada de oxidação que, além de atrapalhar a transferência de calor durante a tempera na prensa, deve ser removida como etapa final do processo atual por meio de jateamento, a fim de melhorar a qualidade superficial.

O objetivo desta Tese de Doutorado consiste em desenvolver um aço com teores de $\text{Cr} + \text{Si} + \text{Mo} < 5\%$, a fim de obter, neste tipo de aço, capacidade de resistência à formação de óxidos durante a etapa de transferência em um processo de estampagem a quente. Além da capacidade de evitar a formação de óxidos, este aço também deve apresentar temperabilidade compatível com a taxa que hoje é praticada neste processo, em torno de 30°C/s , além de apresentar propriedades mecânicas superiores às aquelas encontradas em outros aços para estampagem a quente comercializados atualmente. A fim de alcançar os resultados mencionados acima, diversos vazamentos com diferentes composições químicas, laminações a quente e frio, TRC's e processo de estampagem a quente via Gleeble e caracterizações dos óxidos formados, serão realizados. Para tal, equipamentos tais como forno de fusão por indução a vácuo (VIM), simulador termomecânico tipo Gleeble, microscopia eletrônica de varredura (EDS) difração de raios X e espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS), entre outros, serão utilizados durante a realização das caracterizações do produto estudado e dos óxidos formados, objetivando a comparação com o material utilizado atualmente pela indústria, quando possível.

2 – JUSTIFICATIVAS

Aços estampados a quente, também conhecidos como aços ao boro, foram desenvolvidos na década de 70 com objetivo de serem aplicados em máquinas de implementos agrícolas sem a necessidade da utilização do processo de estampagem a quente. Porém, com o avanço dos requisitos de segurança veicular e ambientais nos últimos anos, a indústria automotiva vem buscando soluções em aço que permitam combinar redução na emissão de gases de efeito estufa e ofereçam segurança ao condutor em uma eventual colisão.

Existem atualmente dois tipos de produtos amplamente utilizados em carrocerias de automóveis provenientes do processo de estampagem a quente, os revestidos com alumínio e silício e os não revestidos, sendo este último o pioneiro. Em relação ao substrato de aço, ambos os produtos possuem as mesmas características, apresentando composição química típica de um 22MnB5 e microestrutura ferrítico-perlítica. A razão pela qual o primeiro é revestido está relacionada com a oxidação, pois o material revestido é capaz de ser aquecido em um forno sem atmosfera controlada. Ademais, o produto revestido não apresenta oxidação superficial durante a etapa de transferência para prensa, ainda que esta proteção, oferecida pelo revestimento de Al-Si, seja somente por barreira.

No entanto, mesmo que o material revestido apresente as vantagens apontadas acima, é relevante mencionar que o processo de revestimento contínuo na siderúrgica impacta fortemente no custo do produto. Outrossim, várias empresas que utilizam o processo de estampagem a quente já possuem seus processos adequados para realizar aquecimento e encharque com atmosfera redutora, ou seja, estão preparados para estampar produtos sem revestimento e, por consequência, seguem obrigados a realizar uma etapa final de jateamento buscando a remoção da camada de oxidação superficial gerada durante a etapa de transferência da chapa do forno para a prensa.

Então, fica claro que há uma necessidade clara e uma janela de oportunidades para o desenvolvimento de uma ou mais ligas que apresentem resistência a oxidação superficial durante a etapa de transferência da chapa do forno para a prensa, assim como atingir ou até mesmo elevar as propriedades mecânicas esperadas para este produto, evitando assim a necessidade de realização da etapa final de jateamento, reduzindo custos e mantendo a competitividade do produto não revestido e do processo de estampagem a quente de chapas não revestidas.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA RELEVANTE

3.1 – Introdução

Os aços automotivos podem ser classificados de diferentes maneiras, sendo uma delas é pelo nível de resistência, sendo: Aços Convencionais (*Mild Steels*); Aços Convencionais de Alta Resistência (*HSS - High Strength Steel*); Carbono Manganês; BH (*Bake Hardenable*); IF (*Interstitial-free*) de Alta Resistência; ARBL (Alta Resistência Baixa Liga), e; Aços Avançados de Alta Resistência (*AHSS – Advanced High Strength Steel*). A última classe é subdividida em: *Dual Phase* (DP); TRIP (Plasticidade Induzida por Transformação); *Complex Phase*. Ainda existem os UHSS (*Ultra High Strenght Steel*), que são os Aços de Ultra Alta Resistência, dentre eles, os TWIP (*Twinning-Induced-Plasticity*) e os conformados a quente (*Hot Stamping*), que geralmente apresentam limite de escoamento e resistência maiores que 550 e 700 MPa, respectivamente (WORLD AUTO STEEL, 2013).

A Figura 1 ilustra as classes de aços mencionadas anteriormente com base nas resistências e alongamentos típicos de cada uma delas. As elipses preenchidas de cinza escuro representam os aços de menor resistência, porém, apresentam maior conformabilidade. Em cinza claro, os aços tradicionais de alta resistência, apresentando

uma moderada capacidade de conformação. Destacados em verde e amarelo, os aços AHSS, que apresentam mais de uma fase em sua microestrutura, sendo, em azul, os aços martensíticos, também conhecidos como aços estampados a quente (*Hot Stamping*), objeto de estudo desta proposta.

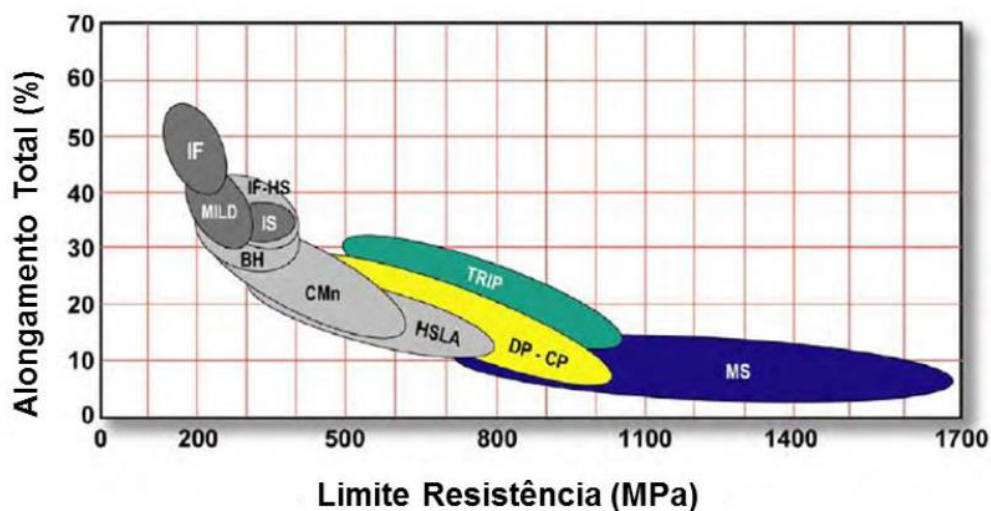


Figura 1: Comparação entre os AHSS (coloridos) com aços de baixa resistência (cinza escuro) e os tradicionais HSS (cinza claro). (Adaptado de WORLD AUTO STEEL, 2013).

3.1 - Aços estampáveis a quente (HF, Hot Forming)

Normalmente com adições de boro, os aços estampados a quente podem assumir formas complexas sem apresentar efeitos de retorno elástico (*backspring effect*). Durante o processo de conformação destes aços, os mesmos são elevados a uma temperatura acima de A_{c3} por um tempo que garanta a homogeneidade da temperatura e, então, em forma de chapas metálicas, são transferidos para uma prensa refrigerada que possui as funções de dar forma ao material e, ao mesmo tempo, resfriar a peça já conformada sob taxas que garantam a completa têmpera.

Existe uma variedade de aços ao boro dedicados à conformação a quente. Os mais utilizados industrialmente são os aços 20MnB5 e 22MnB5. Na Tabela 1, é possível observar algumas composições químicas típicas e suas propriedades antes e depois do processo de estampagem a quente, que será mais detalhado no item 3.3.

Tabela 1: Composição química e propriedades de aços ao boro antes e depois da conformação a quente (Adaptado de H. Karbasian et al, 2010).

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	0,07	0,75	0,006	0,01	0,21	0,048
27MnCrB5	0,03	0,002	0,25	0,25	1,24	0,004	0,01	0,21	0,042
37MnB4	0,03	0,001	0,33	0,33	0,81	0,006	0,02	0,31	0,046

Aço	Limite de Escoamento (MPa)		Limite Resistência (MPa)	
	Antes da estampagem	Após estampagem	Antes da estampagem	Após estampagem
20MnB5	505	967	637	1354
22MnB5	457	1010	608	1478
8MnCrB3	447	751	520	882
27MnCrB5	478	1097	638	1611
37MnB4	580	1378	810	2040

3.2 - Influência de alguns elementos de liga

Cada elemento de liga possui uma função determinada na composição química de um aço. Para os aços ao Boro, alguns elementos são imprescindíveis, sobretudo para a obtenção das propriedades mecânicas e microestruturas desejadas. Além disso, estes elementos de liga podem ser adicionados de forma combinada com o objetivo de adicionar ao aço uma leve resistência à corrosão.

- Carbono – elemento que possui maior influência nas propriedades, sendo o maior endurecedor por solução sólida dos aços. A dureza e o limite de resistência aumentam consideravelmente para valores maiores que 0,85%C, porém a soldabilidade e a ductilidade são prejudicadas (M. NADERI, 2007).
- Manganês – principal elemento economicamente viável para estabilização da austenita e aumento do campo bifásico em temperaturas usualmente utilizadas (AF CRAWLEY, 1979). Na Figura 2 é mostrada a interferência do manganês nas temperaturas de equilíbrio do campo bifásico.

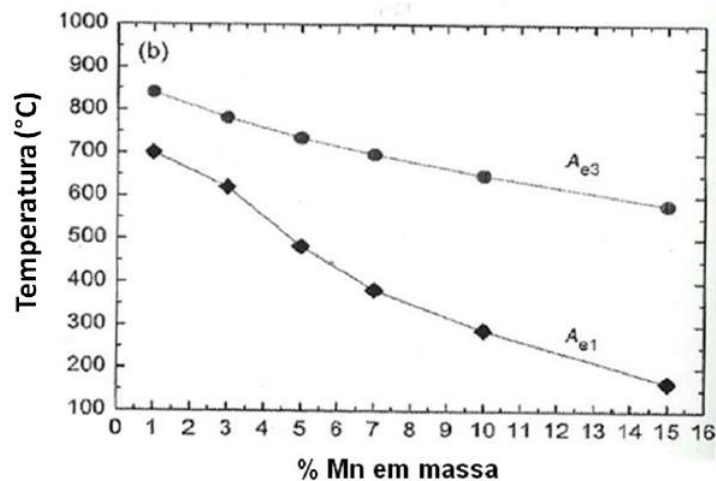


Figura 2: Influência do percentual de manganês nas temperaturas de equilíbrio do campo bifásico (Adaptado de QIHANG HAN et al, 2015).

O manganês é o principal elemento utilizado nos aços para estampagem a quente, pois de acordo com a Equação 1 (AV SVERDLIN, 1997), representa o segundo elemento mais importante para reduzir a temperatura de M_i (*Martensitic Start Temperature*), sendo o primeiro e mais importante do tipo substitucional. Por aumentar o campo bifásico, o elemento em questão aumenta a solubilidade do carbono na austenita, atrasando as transformações difusionais como a bainítica e perlítica, possibilitando a utilização de menores taxas de resfriamento no processo de estampagem a quente.

$$M_i(^{\circ}C) = 520 - 320\%C - 50Mn - 30\%Cr - 20(Ni + Mo) - 5(\%Cu + \%Si) \quad (1)$$

- Nióbio – Amplamente utilizado para formação de precipitados, sequestrando o carbono em solução em altas temperaturas. Responsável por refinar a microestrutura, este elemento também atrasa as transformações ferríticas e perlíticas, pois a formação de carbonetos e carbonitretos de nióbio ricos em carbono deixa menos carbono em solução na austenita (M. NADERI, 2007).
- Cromo – Tende a aumentar a resistência mecânica, além de atrasar a transformação bainítica, fato evidenciado pelo atraso do *bainitic nose* (BILLUR, 2017). O efeito combinado do cromo com os elementos manganês, titânio e boro, presentes nos aços dedicados à estampagem a quente, fornece um aumento de resistência sem comprometer a conformabilidade (NADERI, 2007). Conforme (WANG, 2020), além do aumento da resistência, o elemento cromo é capaz de

aumentar a resistência à corrosão quando combinado com outros elementos tais como silício e molibdênio.

- Silício - Não é um elemento austenitizante (M. NADERI, 2007), o que ajudaria no processo de estampagem a quente. Contudo, ele é adicionado em poucas quantidades para atrasar a formação de cementita, que não deve estar presente nos aços ao boro. Em maiores quantidades, em torno de 2%, e na presença de manganês, pode dificultar o processo de galvanização contínua.
- Titânio - Este elemento é utilizado para retardar o crescimento de grão austenítico, elevando assim os valores de dureza. O titânio também tem a função de melhorar a sanidade interna do aço, transformando inclusões de sulfeto em globular, além de aumentar a ductilidade na direção transversal (M. NADERI, 2007). Outra função muito importante do titânio é garantir a não formação de BN, formando assim TiN, preservando o efeito de temperabilidade do boro.
- Boro - Este elemento, quando adicionado em pequenas quantidades, reduz a formação de perlita e de ferrita poligonal, afastando a curva de transformação bainítica. O boro segrega no contorno de grão aumentando sua resistência à decoesão. Logo, este elemento, mesmo que em pequenas adições torna o aço extremamente temperável.

3.3 – Processo de estampagem a quente

Como já mencionado ao longo deste trabalho, o processo de estampagem a quente consiste em aquecer uma chapa de aço, a uma taxa determinada, até a temperatura de completa austenitização, mantê-la nessa temperatura durante alguns minutos (de 3 a 6 min), deformá-lo e resfriá-lo de maneira a obter uma microestrutura 100% martensítica. Neste item, as características de cada etapa do processo serão tratadas com mais detalhes.

3.3.1 - Processo indireto

O processo indireto de estampagem a quente está cada vez mais caindo em desuso. Esse processo, conforme mostra a Figura 3, consiste em realizar a conformação antes do aquecimento e, então, austenitizar a peça e temperá-la na prensa. A razão de tal processo ser utilizado em chapas galvanizadas reside no fato de não haver conformação a quente,

mas somente uma calibração, evitando assim que ocorra o fenômeno LME (*liquid metal embrittlement*), em aços revestidos de zinco por exemplo, (XIMENES, 2019). Entretanto, a conformação a frio limita muito o nível de deformação que o material é capaz de absorver nessa temperatura.

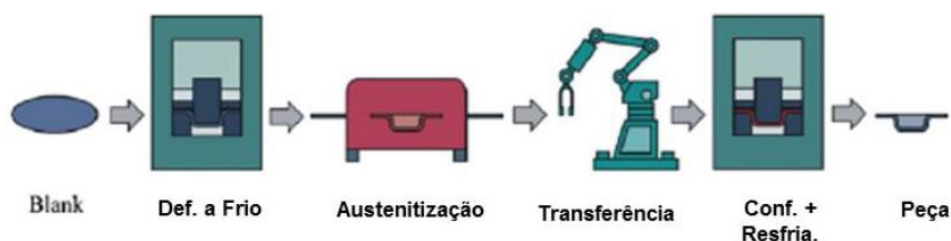


Figura 3: Esquema do processo de estampagem a quente indireto (Adaptado de H. Karbasian, et al, 2010).

3.3.2 - Processo direto

A grande diferença entre o processo de estampagem a quente direto e o indireto é que, no primeiro, a conformação ocorre de uma só vez na prensa final. Logo, o resfriamento e a conformação acontecem simultaneamente, como mostrado na Figura 4. O processo direto vem sendo cada vez mais utilizado, sobretudo em materiais revestidos de Al-Si e não revestidos.

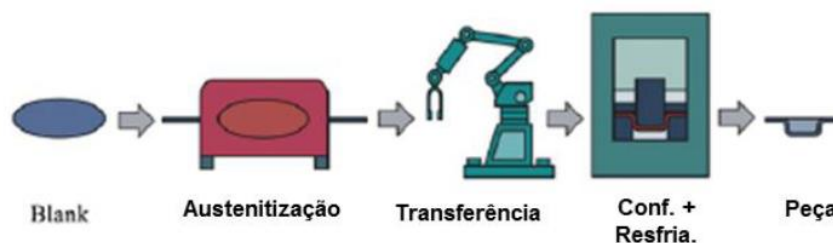


Figura 4: Esquema do processo de estampagem a quente direto (Adaptado de H. Karbasian, et al, 2010).

3.3.3 - O aquecimento

De acordo com GHAMBARI et al. (2015), as taxas de aquecimento utilizadas nas linhas de estampagem a quente são em torno de 20 °C/s. Porém, MAENO et al. (2015), conduziram estudos que demonstraram que, com o aumento da taxa de aquecimento há um refino no grão austenítico e, conseqüentemente, um refino na microestrutura martensítica final para tempos pequenos de encharque (10 s), aumentando os valores de resistência do material. Logo, a taxa de nucleação e tempo de encharque são

determinantes para o refino da austenita e, por consequência, da martensita. Segundo MATSUMOTO et al. (2015), a variação da taxa de aquecimento também influencia o tamanho do grão martensítico. Em seu estudo, amostras foram aquecidas a diferentes taxas, encharcadas e resfriadas em água, conforme mostra a Figura 5.

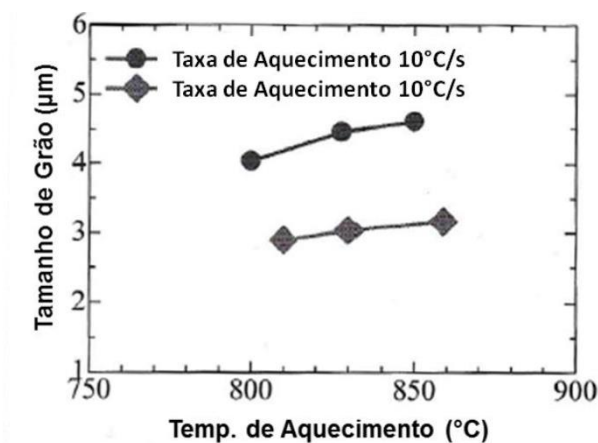


Figura 5: Influência da taxa de aquecimento no tamanho do grão martensítico (Adaptado de MATSUMOTO et al, 2015).

Sabe-se que, quanto maiores as taxas de aquecimento, maior o deslocamento das temperaturas de transformação. Este trabalho tem como um de seus objetivos dimensionar a real magnitude da influência da taxa de aquecimento em tais temperaturas de transformação para as ligas desenvolvidas.

3.3.4 - O encharque: temperatura e tempo

O tempo e a temperatura de encharque influenciam diretamente as propriedades finais do material conformado a quente. Conforme explicado no item 3.3.3, a temperatura e o tempo de encharque possuem uma grande influência no tamanho do grão austenítico. Essa relação pode ser verificada na Figura 6. De acordo com esta figura, para tempos de até 2 min na etapa de encharque, não há grandes diferenças no tamanho de grão austenítico nas 3 temperaturas estudadas. Porém, para 5 min de encharque, foi identificada a maior diferença na medida de tamanho de grão austenítico, tendo a menor temperatura apresentado o maior tamanho de grão. Ainda conforme a Figura 6, as melhores temperaturas e tempo para otimização das propriedades dos materiais, ou seja, menor grão austenítico, são 900 °C e 950 °C, austenitizados por 5 min ou por poucos segundos. Não obstante, esses resultados devem ser mais bem entendidos.

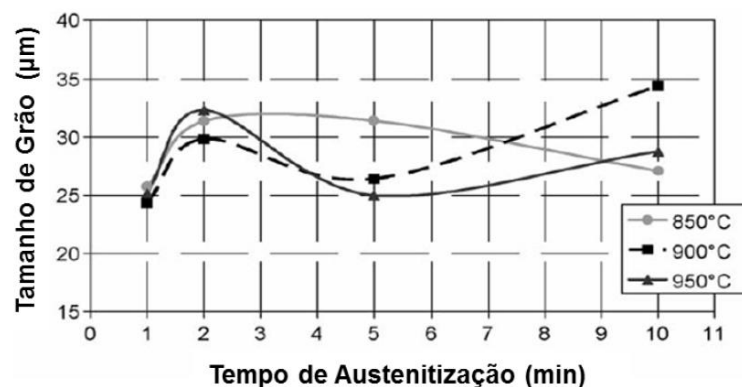


Figura 6: Tamanho do grão austenítico de amostras em diferentes tempos e temperaturas (Adaptado de A. TURETTA, 2008)

3.3.5 - Efeito térmico da transição do esboço para a prensa

Segundo SOUZA, a perda de temperatura entre o forno e a prensa pode ser maior ou menor, dependendo da espessura do material. Logo, um excessivo tempo de transferência pode reduzir a temperatura da chapa de tal maneira a afetar a capacidade de estampagem do material, considerando uma mesma capacidade de resfriamento da prensa.

O fenômeno mencionado acima pode acarretar alguns problemas, como por exemplo a ocorrência localizada de transformação da austenita em outras fases difusionais durante a estampagem, conduzindo a uma descontinuidade no comportamento termomecânico do material. HONGSHENG LIU et al. (2011) afirmaram que o tempo ideal de transição do forno para a prensa deve ser menor que 6,5 s e a forma de perda de calor durante essa etapa se dá por convecção e por radiação.

3.3.6 - Resfriamento

O resfriamento constitui-se na última etapa do processo de conformação a quente. Os valores de taxas críticas de resfriamento já foram discutidos e estendem-se de 27 a 50 °C/s, variando com a composição química do material, tempo de austenitização e percentual de deformação. Segundo LIU et al. (2011), a temperatura de início de conformação pode influenciar a microestrutura final, conforme mostram as Figuras 7 e 8, e a forma de perda de calor dentro da prensa ocorre predominantemente por condução.

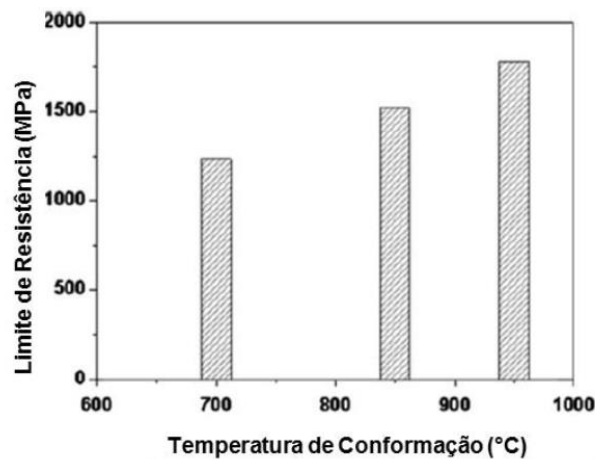


Figura 7: Relação do Limite de Resistência e a temperatura de início de conformação (Adaptado de HONGSHENG LIU et al, 2011).

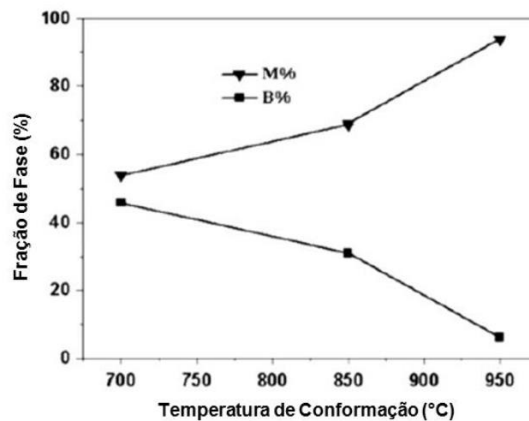


Figura 8: Fração dos constituintes martensita e bainita para diferentes temperaturas de início de conformação (Adaptado de HONGSHENG LIU et al, 2011).

3.3.7 - Curvas TRC (*Continuous Cooling Transformation*)

As curvas que relacionam transformação de fase e resfriamento contínuo são chamadas de TRC (CCT – *Continuous Cooling Transformation*). Estas curvas são influenciadas, principalmente, por dois parâmetros: o tamanho do grão austenítico e a quantidade de elementos de liga e sua natureza. A correta determinação e interpretação destas curvas é decisiva para o conhecimento do comportamento dos materiais a serem estudados, principalmente em estudos como o presente, onde se investigam diferentes taxas de resfriamento. Na Figura 9 é apresentada uma curva de resfriamento contínuo típica de um aço 22MnB5.

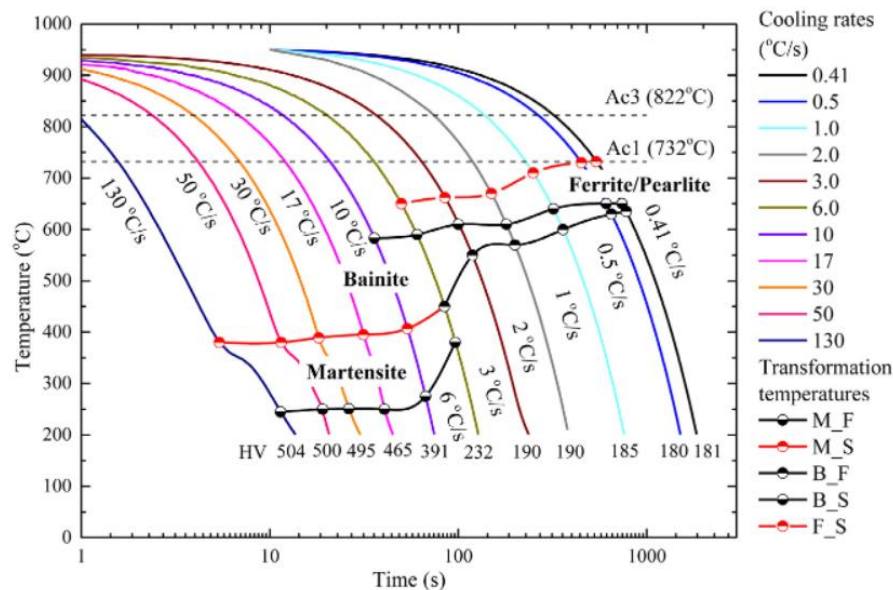


Figura 9: Diagrama TRC do aço 22MnB5 (XIMENES, 2019).

3.2 – Aços não revestidos

Os aços estampados a quente podem ser comercializados sem nenhum tipo de revestimento metálico que promova resistência à corrosão por barreira ou galvânica. Ao transferir a chapa do forno para a prensa, uma camada irregular e abrasiva de óxido se forma, aumentando a contaminação e o desgaste da ferramenta de estampagem, além de impossibilitar a pintura direta devido à formação desta camada de óxido existente.

Portanto, além do controle da atmosfera do forno, após a estampagem a quente, uma operação adicional de jateamento ou decapagem para remoção da camada de óxido se faz necessária, o que acarreta aumento dos custos de produção. A Figura 10 ilustra as etapas do processo de estampagem a quente para aços não revestidos.

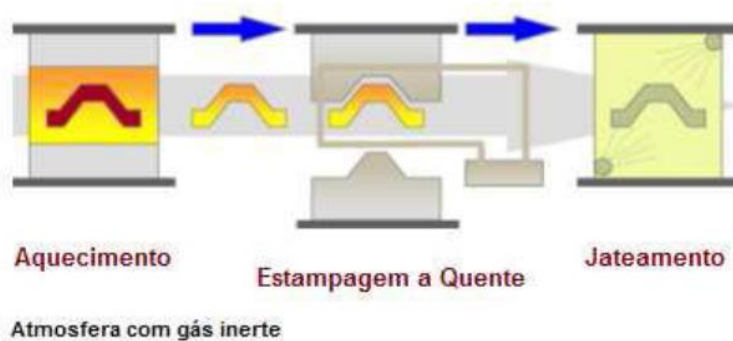


Figura 10: Etapas do processo de estampagem a quente para aços não revestidos, com operação adicional de remoção da camada de óxidos (SOUZA, 2013).

2.2.3 – Propriedades a quente dos aços ao boro

Atualmente os aços ao boro são utilizados em processos de estampagem a quente. Portanto, entender como este aço se comporta microestrutural e fisicamente se faz muito importante para se ter o controle do processo, a fim de atingir as propriedades finais desejadas. É preciso entender a cinética de transformação de fase deste aço, com a finalidade de determinar a temperatura de completa austenitização e a taxa crítica de resfriamento para que a microestrutura final seja composta por 100% de martensita.

4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 – Material

O material que será avaliado neste trabalho é um aço ligado com diferentes elementos com três principais objetivos. O primeiro é garantir a temperabilidade a uma taxa crítica máxima de 30°C/s. O segundo objetivo é oferecer uma resistência à oxidação em alta temperatura (700 a 900°C), visando a não oxidação das chapas durante a etapa de transferência no processo de estampagem a quente. O terceiro visa o atingimento de um nível de resistência de 1,7 a 2GPa. Segundo Wang (2020), há uma oportunidade de estudo combinando-se elementos como cromo, silício e molibdênio, além de uma oportunidade de oferta de um aço com maior resistência do que o atualmente utilizado 22MnB5, que atinge limites de resistência de 1,5 GPa.

4.2 – Métodos

Após a determinação de no mínimo 3 composições distintas variando os percentuais de cromo, silício e molibdênio, as mesmas serão vazadas em um forno de fusão a vácuo localizado no Centro de Pesquisas da CSN. A composição química mais adequada não será determinada empiricamente, mas baseada em diagramas de fases realizados via Thermocalc onde será possível avaliar as temperaturas de A3 visando obter valores próximos aos que se encontram para as ligas atualmente utilizadas. Além disso é sabido por literatura (WANG J) que a soma dos teores de cromo + silício + molibdênio não deve ultrapassar 4%, contudo os experimentos ainda são embrionários, o que evidencia a novidade da proposta.

Os lingotes, de 30 kg cada, serão em seguida laminados a quente e posteriormente laminados a frio em um laminador piloto tipo FENN também localizado no Centro de Pesquisas da CSN. Após redução de espessura até dimensões compatíveis à capacidade da planta de produção (1,80 mm), estas chapas serão submetidas a diferentes ciclos

térmicos visando avaliar o produto de corrosão formado na superfície da chapa, variando-se o tempo o tempo de transferência e por consequência a temperatura. Será utilizada caracterização via XPS (Espectroscopia Fotoeletrônica de Raios-X), visando estudar e medir a composição química da estrutura das camadas superficiais dos óxidos formados para as diferentes ligas e tempos de transferência distintos. Esta técnica também fornecerá dados sobre a composição atômica da superfície, a identificação elementar, o estado químico e o número de coordenação dos átomos localizados próximos a superfície das amostras.

Ainda, por meio de uma Gleeble 3500, para cada composição serão determinadas as temperaturas de A_{c3} para que as curvas de TRC sejam plotadas visando a determinação das temperaturas e tempos das transformações de fase e principalmente da taxa de resfriamento crítica de cada liga. Após a determinação das curvas TRC e dos tamanhos de grãos austeníticos prévios, as diferentes ligas serão submetidas aos ciclos térmicos de estampagem a quente a fim de comprovar que, após este processo, os materiais em questão apresentam resistência maior que 1,7 GPa. Com o objetivo de caracterizar as diferentes microestruturas formadas, nas diferentes TRC's assim como as microestruturas formadas a partir dos ciclos térmicos de estampagem que serão realizados na Gleeble, diferentes ferramentas de caracterização serão utilizadas, são elas DRX, MEV e EBDS.

Estas ferramentas combinadas, permitirão a caracterização detalhada do tipo de microestrutura formada e suas respectivas texturas, permitindo explorar a otimização de ciclos correlacionando as propriedades mecânicas com as microestruturais e suas orientações. Ainda, para confirmação das fases formadas, as microestruturas serão avaliadas via DRX, onde será possível confirmar quais delas estarão realmente presentes.

Testes de tração uniaxial serão conduzidos com o objetivo de comprovar que a(s) liga(s) são capazes de atingir limite de resistência maior que o material atualmente utilizado (1,5 GPa) como também oferecer resistência a corrosão capaz de eliminar a etapa de jateamento, que atualmente se faz necessária para materiais sem revestimento submetidos ao processo de estampagem a quente.

5 - Experiência do orientador na área de atuação deste projeto

O Prof. Hugo Sandim, orientador deste doutorado, atua na área de processamento de materiais metálicos há cerca de 25 anos. Orientou oito trabalhos de doutorado e pelo menos oito dissertações de mestrado ligados aos temas Recristalização e Crescimento de Grão. Realizou pós-doutoramentos em Erlangen (FAU, 1998-1999) e em Düsseldorf

(MPIE, 2011-2012) em temas relativos à recristalização, crescimento de grão e o uso da difração de elétrons retroespalhados (EBSD) no estudo dos mecanismos de nucleação, relações de orientação, evolução da textura cristalográfica e mesotextura associados a estas reações de restauração no estado sólido. Publicou cerca de 70 artigos em revistas indexadas nos temas “*Recristalização*” e “*Aços especiais*”.

6 – O aluno Daniel Alexandre da Costa Ximenes

O aluno Daniel Alexandre da Costa Ximenes se formou em Engenharia Metalúrgica pela EEIMVR/UFF em 02/2012 e durante a graduação fez intercâmbio no Canadá onde cursou *Business English* por 6 meses. Atuou como engenheiro de desenvolvimento de produtos no centro de pesquisas da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional por 6 anos, desenvolvendo soluções em aços para os clientes da empresa, assim como desenvolvendo aços avançados de alta resistência. Também atuou por 2 anos como Coordenador de Laboratórios também do Centro de Pesquisas da CSN, onde foi responsável pela condução de 17 laboratórios; dentre eles os laboratórios de simulação computacional, microestrutura, forno de fusão e Gleeble, entre outros. Em dez/2018 completou o curso de Mestrado em Metalurgia na área de Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos pela EEIMVR/UFF com uma publicação internacional derivada do trabalho (*Qualis A1*) e uma nacional no 55º Seminário de Laminação e Conformação além de outras publicações nacionais e internacionais. Atualmente é o responsável pela área de Inovação e Tecnologia do Centro de Pesquisas da CSN. Como produtos acadêmicos principais do seu mestrado, pode-se citar:

- 1) Phase transformation temperatures and Fe enrichment of a 22MnB5 Zn-Fe coated steel under hot stamping conditions. *Journal of Materials Research and Technology*. 10.1016/j.jmrt.2019.11.003.
- 2) Determinação do diagrama de transformação sob resfriamento contínuo de um aço ao boro. In: *Proceedings* do 55º Seminário de Laminação e Conformação, São Paulo, 2018, p. 263-271. 10.5151/1983-4764-31606

7- Cronograma

Atividades	Período			
	1º ano	2º ano	3º ano	4º ano
Proposta de 3 novas ligas com diferentes percentuais de Cr, Si e Mo (via ThermoCalc)				
Vazamento das 3 ligas propostas				
Laminação piloto a quente (caracterização mecânica + microestrutural)				
Laminação a frio (caracterização mecânica + microestrutural)				
Determinação via ThermoCalc dos intervalos intercríticos das 3 ligas				
Determinação experimental via Gleeble do intervalo intercrítico das 3 ligas				
Determinação da resistência à oxidação durante a etapa de transferência das 3 ligas				
Caracterização da superfície das chapas e caracterização dos óxidos formados				
Determinação das curvas de transformação de fase (TRC) das 3 ligas com suas respectivas caracterizações				
Realização de ciclo térmico adicionado a estampagem via Gleeble				
Caracterização microestrutural e mecânica dos diferentes ciclos realizados				
Realização de estampagem a quente em prensa piloto				
Caracterização das propriedades mecânicas, microestruturais e de superfície das amostras estampadas a quente				
Redação de artigos técnicos e defesa da tese				

8- Considerações finais

Alguns pontos aqui descritos podem sofrer alteração como em todo projeto de doutorado. O objetivo principal é desenvolver uma liga que seja capaz de ser submetida a um processo de estampagem a quente direta, via forno com atmosfera controlada, e que não apresente oxidação durante a etapa de transferência, que ocorre entre a saída do forno e a estampagem a quente. Adicionalmente, além de ser capaz de não apresentar significativa oxidação superficial durante este curto período de tempo em alta temperatura, o material também deve apresentar propriedades mecânicas compatíveis com material de ultra-alta resistência, chegando a 1,7 GPa. Essas características representam uma oportunidade de redução de custo frente aos materiais já utilizados, tanto pela não utilização de revestimento e eliminação da etapa de jateamento, quanto pela redução de espessura substituindo materiais mais espessos e menos resistentes.

Dependendo dos resultados obtidos ao longo desta Tese, é possível que se faça necessário proteger esta inovação por meio de patente junto ao INPI ou no exterior. Esse assunto será tratado oportunamente adiante, após estabelecimento de cooperação formal da EEL com a CSN.

REFERÊNCIAS

CRAWLEY, A.F., Shehata, M.T., Pussegoda, N., Processing, Properties and Modeling of Experimental Batch-Annealed Dual-Phase Steel, in Fundamentals of Dual-Phase Steels, RA Kot and JW Morris, eds., TM-AIME, p. 181-197, 1979.

E. BILLUR, “12 – Hot formed steels,” in Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications, R. Rana and S. B. Singh, Eds., elsevier.com/books/automotive-steels/rana/978-0-08-100638-2; Woodhead Publishing pp. 387-411; 2017.

GHAMBARI, Z. N., SPEER J. G., FINDLEY, K. O., Coating Evolution and Mechanical Behavior of Zn-Coated Press-Hardening Sheet Steel. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5^o International Conference, p. 355–362, 2015.

KARBASIAN, H., TEKKAYA, A.E., Review on Hot Stamping. Journal of Materials Processing Technology, 210, p. 2103–2118, 2010.

KIM, S.J. et al, Microstructure and Mechanical Properties of the 0.15%C TRIP-Aided Cold-Rolled Steels Containing Cu, Ni and Cr. Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, ed BC De Cooman, GRIPS, Ghent, p.165-169, 2002.

LIU, H et al, Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet, Journal of Materials Engineering and Performance 20, p. 1–10, 2011.

MAENO, T. et al, Full Hardening of Products in Hot Stamping Using Rapid Resistance Heating. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5^o International Conference, p. 323–330, 2015.

MATSUMOTO M., TAKEMOTO, Y., SENUMA, T., Influence of Microstructures on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Hot Stamped Ultrahigh Strength Components. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5^o International Conference, p. 55–63, 2015.

NADERI, M. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels. Tese de Doutorado em Materiais – Universidade de Aachen, Aachen, Alemanha, 2007.

QIHANG H. et al, Low Temperature Hot Forming of Medium-Mn Steel. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5^o International Conference, p. 381–390, 2015.

SOUZA, F. B. P. Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço USIBOR 1500P. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SVERDLIN, A.V., NESS, A. R., The Effects of Alloying Elements on the Heat Treatment of Steel. In Steel Heat Treatment Handbook, ed. GE Totten and MA Howes, Marcel-Dekker, New York, p. 45-91, 1997.

TURETTA, A. of thermal, mechanical and microstructural properties of quenchenable high strength steels in hot stamping operation. Tese de Doutorado – Universita' Degli Studi Di Padova, Padova, 166 p., 2008.

WANG J., New Generation of Press Hardened Steels, <https://www.steel.org/wp-content/uploads/2020/12/AISI-New-Generation-PHS-Research-by-GM-Webinar-Sept-29-Final.pdf>; 2020.

WORLD AUTO STEEL. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Version 4.0, 2009. Disponivel em: <<http://www.worldautosteel.org>>. Acesso em: janeiro 2013.

XIMENES, Daniel et al. Phase transformation temperatures and Fe enrichment of a 22MnB5 Zn-Fe coated steel under hot stamping conditions. Journal of Materials Research and Technology. 10.1016/j.jmrt.2019.11.003, 2019.