

ESTUDO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E MECÂNICAS DOS AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AHSS) MARTENÍSTICOS E BAINÍTICOS FORJADOS A QUENTE

MSc. Eng(a) Alessandra Regina Machado Schifino (UFRGS) E-mail: alessandraschifino@gmail.com

Prof. Dr. – Ing. Lírio Schaeffer (UFRGS) E-mail: schaeffer@ufrgs.br

Resumo: Este trabalho consiste na apresentação das características dos aços forjados de alta resistência (AHSS) martensíticos e bainíticos de acordo com sua composição química e suas características resultantes na microestrutura e na resistência mecânica final do componente. A composição química é de suma importância, pois as quantidades de elementos de liga, tais como: carbono, molibdênio, manganês, cromo, boro, níquel e nióbio. Obviamente em quantidades distintas em cada um dos aços citados, resultam na microestrutura adequada para o componente pretendido, assim como a resistência mecânica. Os elementos de liga estabelecem as faixas de transformação das microestruturas, resultando em resistências mecânicas de até 1200 MPa para aços bainíticos e de 1700 MPa para aços martensíticos.

Palavras-chave: forjamento; aços de alta resistência; aços bainíticos; aços martensíticos; propriedades químicas; propriedades mecânicas.

STUDY OF THE CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HOT FORGED MARTENISTIC AND BAINITIC HIGH RESISTANCE STEELS

Abstract: This work presents the characteristics of martensitic and bainitic high strength forged steels (AHSS) according to their chemical composition and resulting characteristics in the microstructure and the final mechanical strength of the component. Chemical composition is very important because of the quantities of alloying elements such as carbon, molybdenum, manganese, chromium, boron, nickel and niobium. Obviously in different amounts in each of the steels cited, they result in the proper microstructure for the intended component as well as the mechanical strength. The alloying elements establish the transformation ranges of the microstructures, resulting in mechanical strengths of up to 1200 MPa for bainitic steels and 1700 MPa for martensitic steels.

Keywords: forging; high strength steels; bainitic steels; martensitic steels; chemical properties; mechanical properties

1. Introdução

Os aços martensíticos são em alguns casos, uma pequena quantidade de ferrita e / ou bainita. A força, dureza e temperabilidade dos aços martensíticos aumentam, quando o teor de carbono é elevado. Outros elementos de liga como silício, manganês, cromo, níquel, molibdênio, boro e vanádio também são usados em várias combinações para aumentar a temperabilidade. Os aços martensíticos resultantes são mais conhecidos por sua resistência extremamente alta, com resistência mecânica de até 1700 Mpa (WORLD AUTOSTEEL, 2014; WU; JU; TANG; HU; GUO; KANG, et al., 2015). Estes aços são frequentemente submetidos a pós-têmpera temperamento para melhorar a ductilidade e fornecer as características adequadas (YAMAZAKI; MIZUYAMA; OKATSUCHIYA; YASUADA, 1995). Porém estes aços ainda precisam de outras etapas termomecânicas para sua aplicação final, fazendo com que se aumentem os investimentos e as pesquisas em aços de alta resistência bainíticos, que dispensam tais etapas, já estando em sua terceira geração de estudo (RAEDT; SPECKENHEUER; VOLLRATH, 2012). Os avanços na tecnologia de forjamento desenvolvidos estão cada vez mais significativos. Assim como no caso dos aços bainíticos dúcteis de alta

resistência, que oferecem propriedades mecânicas satisfatórias a baixo custo, tanto no material, quanto na redução das etapas de processamento. Estes aços apresentam discos duros o interior de sua microestrutura de composição martensítica, resultando em uma maior resistência mecânica do componente final (RAEDT: SPECKENHEUER: VOLLRATH, 2012).

2. Aços de Alta Resistência (AHSS) - Martensíticos

Os aços martensíticos (MART) apresentam a maior resistência máxima entre os aços AHSS na condição final de produto, atingindo valores acima de 1700 MPa. Seu conceito é fundamentado em regras bem estabelecidas em relação à composição química e tecnologia de processamento. A microestrutura é caracterizada por uma matriz martensítica (em ripas) contendo pequenas quantidades de ferrita e/ou bainita, a qual é produzida pela transformação da austenita durante a têmpera realizada após a laminação a quente ou recozimento. Os aços martensíticos são frequentemente revenidos após a têmpera com o objetivo de aumentar a ductilidade e proporcionar boa conformabilidade sem perdas na resistência máxima (WORLDAUTOSTEEL, 2009).

2.1 Composição Química

O conceito da composição química dos aços martensíticos é baseado no teor de carbono (0,15 – 0,30% em massa), uma vez que este elemento é responsável pelo aumento na dureza e resistência (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 2004). Elementos como manganês, cromo, silício, molibdênio, boro, níquel e vanádio também são usados em diversos tipos de combinações para aumentar a temperabilidade (KUZIAK, et al., 2008)

Estes aços são produzidos através da realização de uma rápida têmpera a partir da fase austenítica com a finalidade de produzir uma microestrutura composta por martensita em ripas. A composição química é projetada para reduzir a formação de austenita retida e para promover a formação de precipitados finos que tornam a fase martensítica e bainítica mais resistentes. O revenimento após a têmpera também pode ser empregado para melhorar a relação ductilidade/resistência (WORLDAUTOSTEEL, 2009).

Para exemplificar a importância da composição química, temos os aços pesquisados para fabricação de componentes, tais como parafusos. As adições de boro são uma alternativa de baixo custo aos aços clássicos CrMo e CrNiMo. Essas ligas foram investigadas especialmente se levando em conta a sua elegibilidade para parafusos da classe de resistência 10.9. A liga 36CrB4 parece muito promissora com menor custo substituindo o 42CrMo4, também no que diz respeito a aplicações como virabrequins e eixos, como pode ser visto na Figura 1. Modificou-se o aço 42CrMo4 em busca de maneiras de substituir o molibdênio, total ou parcialmente. Assim se realizando completamente a troca do molibdênio por manganês ocorre uma redução da resistência ao impacto em baixas temperaturas (SCHIFFERL: ZAMBERGER: JÖLLER, 2008). Se procurou também alternativas para o grau C45Pb na questão usinagem (JANSEN: ENGINEER, 2011). A usinagem do componente corpo de injeção à diesel, que será estudado também na versão com microestrutura bainítica, é facilitada pela adição de enxofre e chumbo, mas isso reduz a fadiga de ciclo alto força. O grau JE 607 tem uma comparável composição da liga, mas não apresenta enxofre nem teor de chumbo (RAEDT: SPECKENHEUER: VOLLRATH, 2012).

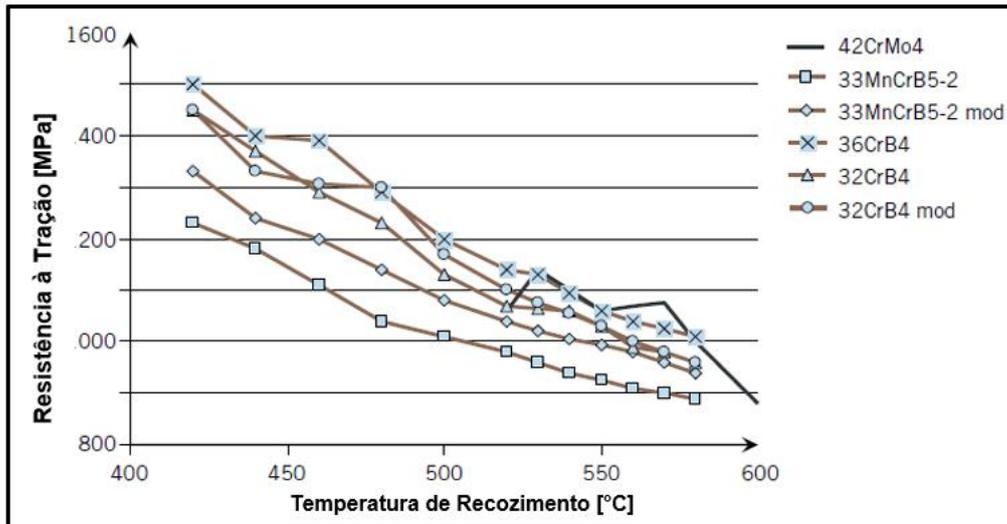


Figura 1 - Resistência à Tração (temperatura ambiente) para vários aços Martensíticos ligados ao Molibdênio e sua Temperatura de Recozimento. Adaptada. Fonte: (SCHIFFERL: ZAMBERGER: JÖLLER, 2008)

2.2 Propriedades Mecânicas

A martensita é o constituinte microestrutural mais difícil dos aços martensíticos, a resistência destes aços é muito alta para permitir a construção de componentes avançados, especialmente em áreas onde são esperadas cargas de colisão. No entanto, uma das preocupações sobre estes aços é a sua sensibilidade, particularmente sob impacto e flexão de deformação em situações de colisão. Outro problema é o aparecimento de trincas retardadas observadas em aços martensíticos de força ultraelevada (YAMAZAKI: MIZUYAMA: OKATSUCHIYA: YASUADA, 1995).

A transformação de austenita para martensita é difusa e, portanto, forma de martensita sem qualquer intercâmbio na posição de átomos vizinhos. Para produzir aços martensíticos, a taxa de resfriamento deve ser alta o suficiente para suprimir a decomposição de austenita por processos difusionais para ferrita, perlita e / ou bainita. A transformação da austenita para martensita começa quando a austenita é resfriada até a temperatura inicial da transformação martensítica, M_s , e completa quando as temperaturas caem para a temperatura final da transformação martensítica, M_f . A fração de a martensita transformada é geralmente uma função da temperatura e aumenta continuamente de zero a M_s até a conclusão em M_f (ZHAO: JIANG: LEE, 2014).

Na prática dos tratamentos termomecânicos aplicados nos aços martensíticos se iniciam no estágio de processamento controlado e desempenham um papel importante na determinação das propriedades mecânicas finais através do ajuste de constituintes microestruturais. Realizou-se um tratamento termomecânico típico em um aço martensítico com baixo teor de carbono microligado através do controle da e obteve a melhor combinação de força (1440 a 1538 MPa) e ductilidade (11% a 16%) (BANDYOPADHYAY: GHOSH: KUNDU: CHATTERJEE, 2011; 42:2742–52). O aço com seção transversal de 95 a 95 mm² foi inicialmente aquecida a 1200°C. A microestrutura martensítica de ripas finas altamente deslocadas, juntamente com a presença de minúsculos precipitados são as principais causas do aumento da resistência dos aços MART com o rebaixamento da temperatura de acabamento (BANDYOPADHYAY: GHOSH: KUNDU: CHATTERJEE, 2011; 42:1051–61)

Na temperatura de revenimento mais alta, a cementita é esferoidizada e a ductilidade, assim como a tenacidade, se recuperam. Os carbeto poderiam ter um papel fundamental na força de martensita na têmpera, também indicou que a precipitação destes carbonetos durante o revenimento afeta significativamente a evolução das propriedades mecânicas dos aços martensíticos temperados. Em geral, o revenimento destes aços para componentes automotivos relevantes, apresenta problemas na faixa de temperatura de 200 – 400° C, os quais devem ser evitados, pois as propriedades de colisão se deterioram rapidamente com um tratamento nessa faixa de temperatura, em função do fenômeno fragilização ao azul, que diminui a ductilidade e tenacidade, através da precipitação de cementita nos contornos de grão e entre as agulhas de cementita. Para melhorar a tenacidade dos aços martensíticos a têmpera pode ser processada em combinação com vários métodos de têmpera (MASSARDIER: GOUNE: FABREGUE: SELOUANE: DOUILLARD: BOUAZIZ, 2014). Comparou-se os efeitos do processo de têmpera direta e da têmpera convencional, utilizando reaquecimento no processo de revenimento. Descobriu-se então, que na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço martensítico com baixo teor de carbono, a tensão de têmpera direta foi maior na têmpera direta do que no temperado com reaquecimento. A tenacidade a baixa temperatura do componente diretamente temperado e revenido foi inferior ao do componente reaquecido, temperado e revenido (DUAN: LY: ZHANG: SHI: ZHU: ZHANG, 2012).

3. Aços de Alta Resistência (AHSS) - Bainíticos

Durante os últimos anos, a Georgsmarienhütte GmbH, juntamente com a Hirschvogel Automotive Group desenvolveu dois aços que serão apresentados neste artigo. Um é um aço bainítico microligado, que pode ser forjado a quente ou aquecer em temperaturas de forjamento, se transformando nas propriedades desejadas do componente final, resfriado ao ar controlado. O aço bainítico (H2, 16MnCr5mod) pode até mesmo ser usado como um caso de endurecimento por precipitação, já o outro aço é um aço de carbono médio, adequado para forjamento a quente e endurecimento por indução (ROBERT: LANGE: RÖSCH: BEYER: KOTTE: RAEDT, 2014)

A lacuna existente no grupo dos aços de alta resistência é destacada na Figura 2, sendo preenchida pelos aços bainítico. Na mesma figura, apresenta-se a resistência à tração final do grupo de aços em função de sua temperatura austenítica até a da microestrutura desejada (RAEDT: SPECKENHEUER: VOLLRATH, 2012).

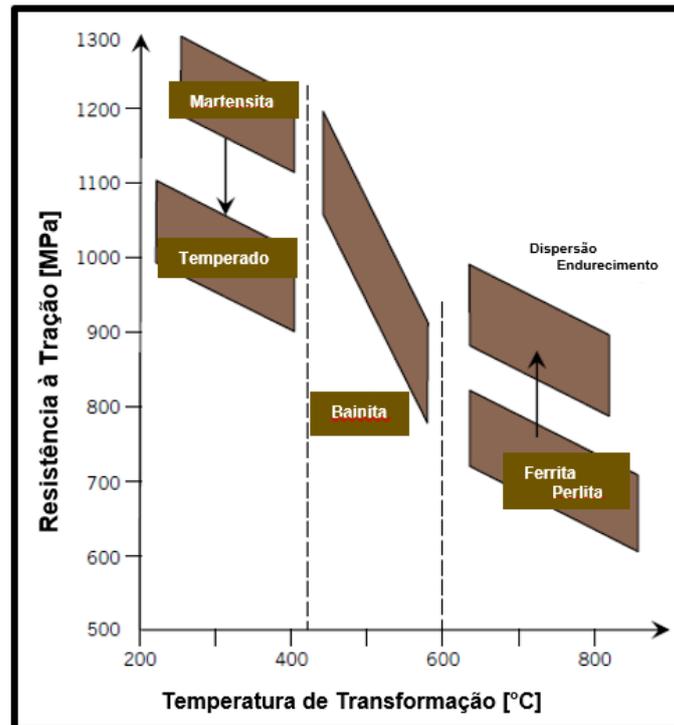


Figura 2 - Diagrama dos Grupos de Aço de acordo com a sua Resistência final à Tração em Função da Temperatura de Austenitização até a da Microestrutura Desejada. Adaptada. Fonte: (RAEDT: SPECKENHEUER: VOLLRATH, 2012).

O aço bainítico (H2, 16MnCr5mod) pode até mesmo ser usado como um caso de endurecimento por precipitação, já o outro aço é um aço de carbono médio, adequado para forjamento a quente e endurecimento por indução. (RAEDT: SPECKENHEUER: VOLLRATH, 2012).

3.1 Aços Bainíticos Estruturais (H2, 16MnCr5mod.)

Procurar soluções técnicas que combinem as vantagens de diferentes ligas e tratamentos térmicos é essencial neste processo. O endurecimento dos aços por precipitação mostra que suas propriedades mecânicas quando obtidas diretamente após um resfriamento proveniente da temperatura de forjamento não exige um tratamento térmico posterior. Além disso na maioria dos casos, uma operação de endireitamento e um teste final de trinca não são necessários, poupando tempo, energia e custo. No entanto, os aços endurecíveis por precipitação mostram menor resistência ao escoamento e impacto de entalhe energia em comparação com aços temperados e revenidos (ROBERT: LANGE: RÖSCH: BEYER: KOTTE: RAEDT, 2014).

O microligado recentemente desenvolvido 16MnCr5 mod (H2 -Hirschvogel melt n° 2) usa deste potencial, combinando as vantagens do aço endurecidos por precipitação e a eliminação da etapa do processo de têmpera. Os aços endurecidos por precipitação resultam em redução de tempo e custos no processo final. Representado na Figura 3. (ROBERT: LANGE: RÖSCH: BEYER: KOTTE: RAEDT, 2014).

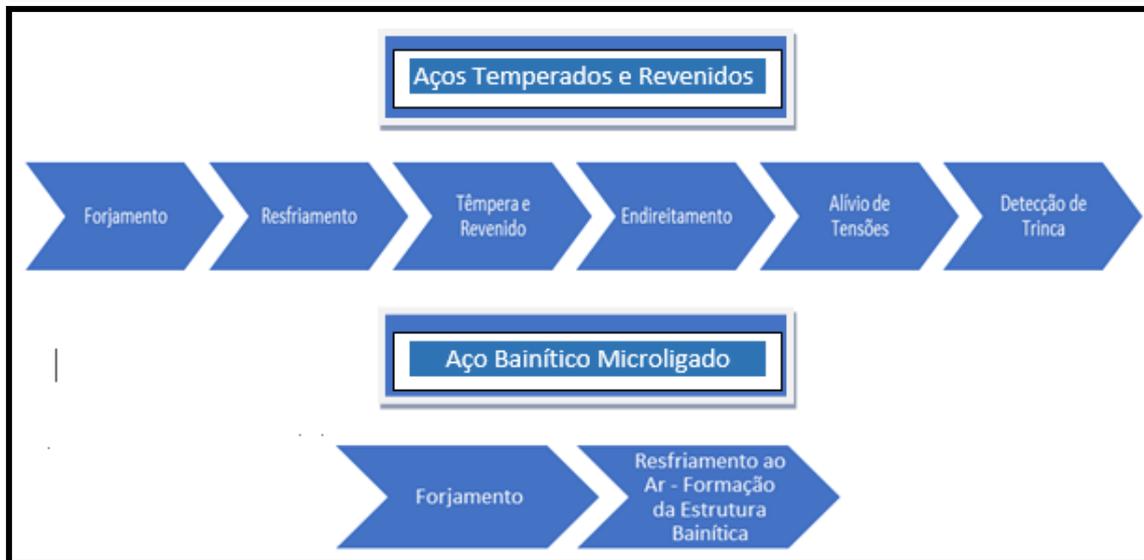


Figura 3 - Vantagens no Processo de Produção de um Aço Bainítico Microligado Comparado a um Aço Temperado. Adaptada.

Fonte: (ROBERT: LANGE: RÖSCH: BEYER: KOTTE: RAEDT, 2014)

3.2 Composição Química (H2, 16MnCr5mod.)

O acesso a composição química do aço modificado, não foi disponibilizado nas referências utilizadas neste artigo, porém através da composição do aço DIN16MnCr5, conhecido na norma ABNT/SAE como 5115, pode-se ter ideia da quantidade de carbono e elementos de liga, podendo-se avaliar sua relevância no processo. Representada pela Tabela 1 (<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-din-16-mn-cr5-5115>. Acesso dia 30/09/2019).

Tabela 1 – Composição Química do Aço Convencional DIN16MnCr5.

ABNT/SAE	%C	%Mn	%P (máx.)	%S (máx.)	%Cr
5115	0,14 – 0,19	1,00 – 1,30	0,035	0,035	0,80 – 1,10

Fonte: (<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-din-16-mn-cr5-5115>. Acesso dia 30/07/2019).

Considerando o custo da adição de elementos de liga, o manganês e o cromo são os elementos mais indicados, sendo usados de fato nos aços bainíticos de alta resistência mecânica. Estas adições devem reduzir ao máximo a temperatura B_i , mas com mínima redução da temperatura M_i , mantendo-se o teor de carbono o resultado é um aço com maior resistência mecânica, como desejado. Sendo assim, a razão entre a redução da temperatura B_i (temperatura de início da formação da bainita) e a redução da temperatura M_i (temperatura de início da formação da martensita) deve ser máxima por percentual de elemento de liga adicionado (<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=197>. Acesso dia 30/09/2019).

Evidentemente o carbono é um elemento no qual a porcentagem não pode ser alterada, embora seja barato. Sendo assim, o aumento de resistência mecânica não deve ser conseguido com o aumento do teor de carbono, pois o aumento deste elemento diminuiria a resistência ao impacto. Os elementos de liga, tais como: cromo, manganês e molibdênio são as melhores escolhas, sendo que 0,5 % de molibdênio é o indicado para garantir a ocorrência de transformação bainítica. Entretanto, como o molibdênio é um metal de alto custo ao contrário do manganês e do cromo, que possuem custo moderado. Então, para este aço ABNT/SAE 5115 os elementos de custo moderado são usados em sua fabricação para que se obtenha a microestrutura final bainítica, como se pode verificar na Tabela 1. O cromo e o manganês são adicionados usualmente para obtenção de aços bainíticos com resistência ao escoamento de ordem de 900 MPa e resistência à tração de cerca de 1200 MPa. (<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=197>. Acesso dia 30/09/2019)

Uma vantagem adicional do aço (H2, 16MnCr5mod.) é o seu design de liga de baixo custo sem molibdênio como elemento de liga. Juntamente com a economia no tratamento térmico, o (H2, 16MnCr5mod.) permite o desenvolvimento de peças de maior resistência em comparação com aços de endurecimento por dispersão. Por isso, esses aços podem ser substituídos como uma solução eficiente em termos de custos e de energia. Um exemplo é mostrado na Figura 4. Os custos para o aço e seu tratamento térmico, o forjamento e a operação de torneamento são comparados para o aço (H2, 16MnCr5mod.) e dois aços típicos para têmpera e revenimento (ROBERT: LANGE: RÖSCH: BEYER: KOTTE: RAEDT, 2014).

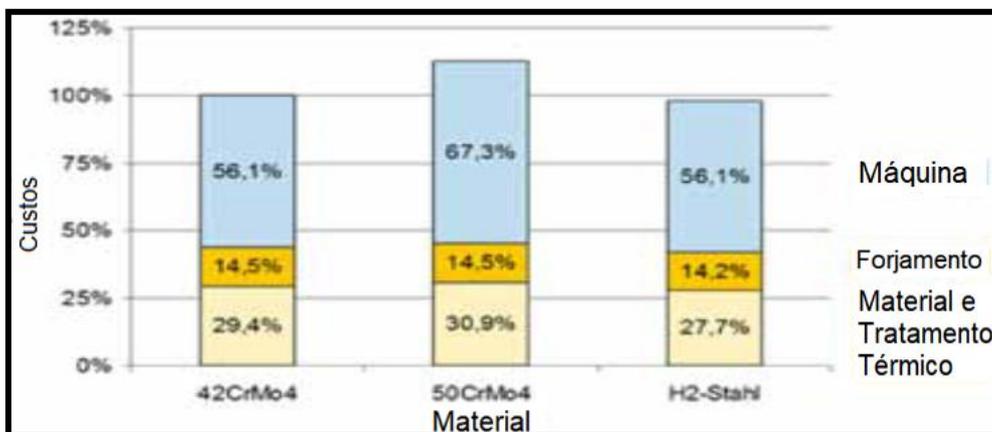


Figura 4 - Resumo dos Diferentes Tipos de Custos para a Produção de Peças Injetoras. Adaptada. Fonte: BEYER: GERVERLMEYER: RAEDDT H.-W: RÖSH, 2013)

3.3 Propriedades Mecânicas (H2, 16MnCr5mod.)

Os dados representados na Tabela 2, apresentam uma comparação das propriedades mecânicas de um corpo injetor, que é usado nos atuais sistemas de injeção à diesel, representado na Figura 5. Este componente é produzido a partir de três tipos diferentes de aço por forjamento a quente. Pela comparação, pode-se notar que o aço H2 endurecível pelo ar apresenta propriedades mecânicas semelhantes às de temperado 42CrMo4. Isso se aplica à força de rendimento e à energia de impacto do entalhe.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas dos Corpos Injetores Forjados a Quente.

Material	Resistência Mecânica (R _m /MPa)	Limite de Escoamento (R _{p0,2} /MPa)	Alongamento A/%	Z/%	Av/J
42CrMo4	940	850	15	57	95
50CrMo4	1170	1070	12	45	52
H2, 16MnCr5mod	1050	800	16	65	115

Fonte: (BEYER: WEIDEL: RAEDT, 2012).

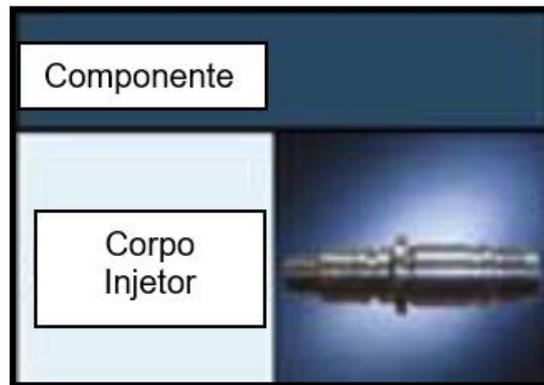


Figura 5 – Imagem Representativa do Componente Forjado: Corpo Injetor para Sistemas de Injeção à Diesel. Adaptada.

Fonte: (BEYER: WEIDEL: RAEDT, 2012).

Analisando o valor do rendimento de energia ao impacto, juntamente com a força de entalhe do aço (H2, modificado), a capacidade de usinagem deste aço deve ser levado em consideração. Pois, o teor de enxofre avaliado no aço (H2, 16MnCr5mod) foi de apenas 0,012% em peso. Juntamente com a ISF em Dortmund as propriedades de usinagem foram analisadas. Estas análises estão representadas na Figura 6, apresentando resultados promissores.

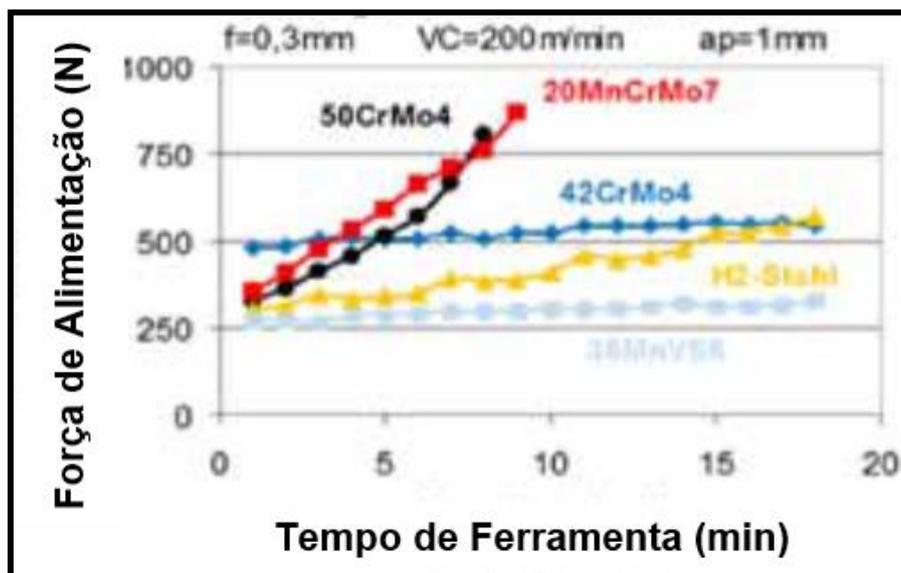


Figura 6– Resultados dos testes de usinagem do aço (H2, 16MnCr5mod) no ISF em Dortmund. Adaptada.

Fonte: (BEYER: WEIDEL: RAEDT, 2012).

4. Conclusões

Os aços bainíticos dúcteis de alta resistência aços preenchem a lacuna entre esses dois grupos de aços (Q&T e AFP). Pesquisas realizadas no Instituto de Metalurgia Ferrosa (IEHK) do Departamento Técnico Universidade RWTH Aachen (KEUL: MOSECKER: BLECK: REKERSDREES: STÜBER: SCHLIEPHAKE: BEYER: RAEDT 2011 & PROJEKT AVIF A 228, 2006) visando o desenvolvimento de uma liga bainítica. As ligas resultantes deste estudo apresentadas neste artigo, atingem uma microestrutura bainítica simplesmente por resfriamento controlado de temperatura de forjamento. Isso implica no controle do processo de resfriamento até a temperatura abaixo de 400 ° C.

Um tipo de aço bainítico já comercialmente disponível é o 20MnCrMo7 (ENGINEER: JUSTINGER: JANßEN: HÄRTEL: HAMPEL: RANDELHOFF, 2011). A estrutura bainítica desejada é alcançada unicamente se adicionando manganês, cromo e algum molibdênio. Da mesma forma, o (H2, 16MnCr5mod) de aço de baixo custo com sua microestrutura bainítica alcança níveis de força atraentes sem tratamento térmico adicional. Um vital aspecto ao desenvolver novos tipos de aço é a sua usinabilidade. Para o 20MnCrMo7, foram comparadas características, tais como tempo de torno mecânico e profundidade de perfuração com as do aço 42CrMo4. O aço bainítico prova ser mais difícil de usar, principalmente devido sua maior dureza (BIERMANN: FELDERHOFF: ENGINEER: JUSTINGER, 2011).

5. Referências

BANDYOPADHYAY PS., GHOSH SK., KUNDU S., CHATTERJEE S. *Evolution of microstructure and mechanical properties of thermomechanically processed ultrahigh-strength steel.* Metall Mater Trans A 2011; 42:2742–52.

BANDYOPADHYAY PS., GHOSH SK., KUNDU S., CHATTERJEE S. *Structure and properties of a low-carbon, microalloyed ultra-high-strength steel.* Metall Mater Trans A 2011;42:1051–61.

BEYER , C., GERVERLMEYER, J., RAEDDT H.-W., RÖSH, O. *Konstruktion*, September 9-2013, IW 6.

BEYER, C., WEIDEL, S., RAEDT, H.-W. *Konstruktion*, September 9-2012, IW 8.

BIERMANN, D., FELDERHOFF, F., ENGINEER, S., JUSTINGER, H. *Machinability of High-strength Bainitic Steel 20MnCrMo7.* 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011

DUAN Z., LY Y., ZHANG M., SHI M., ZHU F., ZHANG S. *Effects of quenching process on mechanical properties and microstructure of high strength steel.* J Wuhan Univ Technol – Mater Sci Ed 2012;27:1024–8.

ENGINEER, S., JUSTINGER, H., JANßEN, P., HÄRTEL, M., HAMPEL, C., RANDELHOFF, F. *Technological Properties of the New High Strength Bainitic Steel 20MnCrMo7.* 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011.

<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-din-16-mn-cr5-5115>. Acesso dia 30/09/2019.

<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=197>. Acesso dia 30/09/2019

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI-AutoCO). *AHSS Guidelines*. Version 1.0, 2004.

JANBEN, P., ENGINEER, S. *New Metallurgical Concepts for Improving Machinability of Steels*. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011.

KEUL, C., MOSECKER, L., BLECK, W., REKERSDREES, T., STÜBER, A., SCHLIEPHAKE, H., BEYER, C., RAEDT H.-W. *New Developments in the material and Process Design of Forged Components in the Automobile Industry*. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011.

KUZIAK, R. et al. *Advanced High Strength Steels for Automotive Industry*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol.VIII, N°.2, 2008.

MASSARDIER V., GOUNE M., FABREGUE D., SELOUANE A., DOUILLARD T., BOUAZIZ O. *Evolution of microstructure and strength during the ultra-fast tempering of Fe-Mn-C martensitic steels*. J Mater Sci 2014; 49:7782–96.

PROJEKT AVIF A 228: *Neue Werkstoffe und angepasste Prozessketten für höherfeste Stahlwerkstoffe (AFP) in geschmiedeten Strukturbauteilen*. Industrieverband Massivumformung (IMU), 2006.

RAEDT, HANS -WILLI. SPECKENHEUER, ULRICH. KLAUS, VOLLRATH. Dipl.-Ing. (2012). *New Forged Steels Energy-efficient Solutions for Stronger Parts*. ATZautotechnology. 12. 10.1365/s35595-012-0089-9.

ROBERT F. LANGE, OLIVER RÖSCH, CHRISTOPHE BEYER, ANGELA KOTTE, HANS-WILLI RAEDT. Head of Technical Customer Support, Head of Steel Application Development, Georgsmarienhütte GmbH, Research & Development, Hirschvogel Automotive. *Development of High Strength Steels for Energy Efficient Process Chains in Forging Industry*. In Proceedings of the 4th International Conference on Steels in Cars and Trucks (SCT) 2014, Braunschweig, Germany, 15–19 June 2014.

SCHIFFERL, H., ZAMBERGER, S., JÖLLER, A. *Alternative Alloying Concepts for Heat-treatable Engineering Steels*. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011.

WORLDAUTOSTEEL. *Advanced high-strength steels application guidelines* (version 5.0). WorldAutoSteel; May 2014.

WORLDAUTOSTEEL. *Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines*. Version 4.0, March 2009

WU H., JU B., TANG D., HU R., GUO A., KANG Q., et al. *Effect Nb addition on the microstructure and mechanical properties of an 1800 MPa ultrahigh strength steel*. Mater Sci Eng, A 2015;622:61–6.

YAMAZAKI K., MIZUYAMA Y., OKA M., TSUCHIYA H., YASUADA H. *Recent advances in ultrahigh-strength sheet steels for automotive structural use*. Nippon Steel Tech Rep 1995;64:37–44.

ZHAO J., JIANG Z., LEE CS. *Functions of tungsten alloying in microalloyed steels*. Nova Science Publishers; 2014.