

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DE UMA CHAPA MARTENSÍTICA DE GRÃOS FINOS

Thiago Marques Ivaniski, thiago.ivaniski@ufrgs.br¹

Juliana Zottis, juliana.zottis@ufrgs.br¹

Luana de Lucca de Costa, Luana.lucca@ufrgs.br¹

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

Lirio Schaeffer, Schaefer@ufrgs.br¹

¹Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Avenida Bento Gonçalves 9700, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Resumo: Chapas de aços avançados de alta resistência possuem uma gama de propriedades que variam em função do processo de fabricação, do tratamento térmico e de seus constituintes. O desafio da engenharia é aliar baixo consumo energético, segurança e resistência adaptando-se ao designer exigido pelo mercado. Para isso, é necessário o conhecimento do produto a ser processado, quais suas limitações na conformabilidade devido aos mecanismos de endurecimento que seus micro ligados proporcionam e sua microestrutura. Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi estudar as propriedades termomecânicas da chapa de alta resistência Hardox450® que possui estrutura martensítica e granulometria refinada. Verificou-se a variação da tensão de escoamento obtida a partir de ensaios uniaxiais de tração em função da temperatura de trabalho e do sentido de laminação. As faixas críticas de fragilização foram identificadas no decorrer do aquecimento das chapas, como também, observou-se uma queda nas tensões de escoamento, porém com uma considerável resistência mecânica a 500°C e ganho na ductilidade.

Palavras-chave: Fragilização, Hardox450®, Tensão de escoamento

1. INTRODUÇÃO

A demanda por aços de elevada resistência e propriedades mecânicas superiores na indústria automobilística, tais como, resistência ao desgaste, capacidade de absorção energética no impacto, foram os principais fatores para o desenvolvimento e a fabricação de chapas de aços de estrutura martensítica com micro ligantes e tratamento térmico apropriado. (Ulewicz et al 2013, Dudzinski et al. 2008, Bialobrzaska e Kostencki 2015).

O arranjo atômico da estrutura martensítica, não depende do tempo, porém a morfologia dos cristais e as mudanças de fases podem ser modificadas através de técnicas de conformação mecânica e tratamento térmico. Por exemplo, uma microestrutura de matriz martensítica é capaz de obter plasticidade e tenacidade a partir de partículas na segunda fase adequadamente dispersas, assim, quando deformados plasticamente, o espaço atômico entre a matriz e a fase dispersa, formam micro vazios e coalescências, que podem levar a fratura dúctil (Krauss 1999).

As chapas martensíticas de grãos finos, além da complexidade química, devido à grande dispersão de elementos micro ligados, suas propriedades monoatômicas como dureza, tensão máxima e deformação, dependem diretamente do processo de laminação. A fabricação destas chapas com espessuras que variam de 0,7 a 2 mm são geralmente encruadas a frio após temperado, como a chapa Hardox450® (Dados do Fabricante 2016).

Estes materiais possuem alta resistência mecânica, porém baixa ductilidade, o que pode ser uma limitação em processos de conformação mecânica (Fig. 1b). Em função disso, tratamentos térmicos de alívio de tensões são empregados logo após um encruamento a frio.

Os mecanismos de fragilização por alívio de tensões foram abordados por George Krauss (2014), onde o autor discutiu sobre a caracterização microestrutural e performance dos aços martensíticos, destacando-se os mecanismos de aumento na plasticidade e tenacidade pelo revenimento, a partir de ensaios de tração.

Publicações relacionadas ao Hardox® foram conduzidas por Ulewicz e et al. (2013) e Bialobrzaska & Kotencki (2015), contribuindo com o estudo de propriedades como fadiga, desgaste, resistência ao escoamento e dureza, dependentes da composição química e taxa de resfriamento durante a fabricação deste aço, foram comparadas com outras chapas comerciais de mesma aplicação. A Figura (1a) mostra o diagrama de resfriamento contínuo (CCT – Continuous Cooling Transformation) em função do percentual de elementos de liga utilizados para a fabricação deste aço e as curvas de escoamento convencionais.

O CCT é usado para a determinação do tipo de estrutura e dureza do material após tratamentos térmicos como têmpera, normalização e recozimento. A composição e tamanho de grão na microestrutura são dados utilizados para construção destas curvas segundo modelo de Krykaldy (Ulewicz et al 2013, Jagiello 2008).

A laminação controlada destes materiais melhoram suas propriedades termomecânicas e possibilitam através do controle do processo de deformação à quente, reduções nas quantidades totais de impurezas como fósforo e enxofre (P, S), conforme reduz a espessura, melhorando a soldabilidade e aumentando a tenacidade. Conforme pode ser observado pelo CCT, as transformações de fases dependem dos elementos químicos como por exemplo, boro, manganês e

molibdênio, os quais aumentam a temperabilidade do material, reduzem os grãos de ferrita durante a laminação a quente. O tempo de austenitização é fundamental para formação da microestrutura do Hardox, em torno de 200 segundos para atingir a dureza e microestrutura.

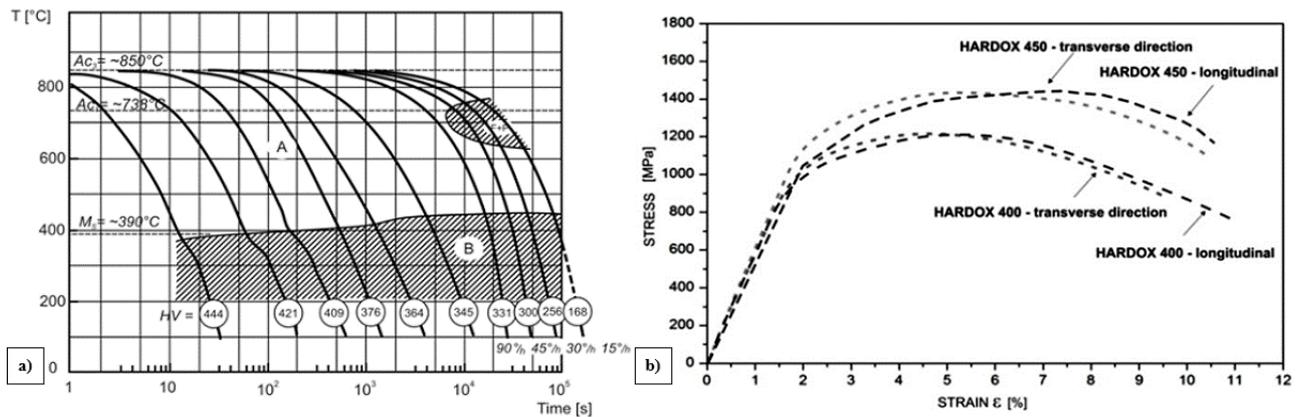


Figura 1. (a) CCT de um aço com composição química percentual similar ao Hardox (0,16%C, 1,45%Mn, 1,48%Cr, 0,81%Ni, 0,41%Mo, 0,0017%B) e (b) Tensão deformação do Hardox400 e 450 (0° e 45° de laminação)

Fonte: Ulewicz e et al. 2013.

Estes aços martensíticos de alta resistência, são utilizados na indústria automotiva para fabricação de containers, carrocerias e todos os componentes que exigem resistência ao desgaste, porém a expansão e a aplicabilidade para altas temperaturas é um fator questionável, no que rege as necessidades industriais e de manufatura, devido a fragilidade associada a alta resistência mecânica.

A dependência da temperatura nos limites de, resistência a tração e ductilidade, abaixo da linha transformação austenítica, linha (AC₁) é o foco deste trabalho. Uma justificativa para este estudo, é buscar maiores informações sobre a aplicabilidade desta chapa, principalmente, no que diz respeito a temperaturas elevadas de trabalho e efeitos de fragilização, em pontos críticos fornecidos por ensaios de tração em chapas finas.

O principal objetivo é a investigação das propriedades termomecânicas na chapa de alta resistência Hardox450®, que possui estrutura martensítica e granulometria refinada, avaliando a resistência a tração, o alongamento e a microestrutura em condições variadas de temperatura.

2. PROCESAMENTO EXPERIMENTAL

O material investigado, nome comercial Hardox450®, espessura de 1mm, foi recebido após laminação a quente, têmpera e encruamento a frio. Esta chapa martensítica de grãos finos é fabricada pela empresa SSAB na Suécia, possui uma dureza Vickers nominal de até 474 HV(1) e, resistência a tração de 1400MPa (Dados Técnicos, 2016).

A fim de analisar os principais elementos químicos da chapa em estudo, quantificou-se através do espectrofotômetro de chamas da marca BRUKER modelo Q2ION do Laboratório de Transformação Mecânica (UFRGS).

Para a execução dos experimentos do ensaio uniaxial de tração foi utilizado o dilatômetro da TA Instruments modelo DIL805T fornecido pelo Instituto de Conformação Mecânica (IBF-RWTH). As Figuras (2a) e (2b) mostram o sistema de fixação das chapas e de aquecimento por indução, como também os pontos onde foram adicionados os sensor de deslocamento. Para a realização dos ensaios, foram definidas três direções de retirada dos corpos de prova (0°, 45° e 90°) que podem ser observados na Figura (3a). A Figura (3b) representa a geometria dos corpos de prova preparados para o teste e a Tabela (1) mostra os parâmetros utilizados para a condução deste ensaio.

Tabela 1 – Parâmetros do Ensaio de Tração Uniaxial em Diferentes Temperaturas.

Material	Número de Amostras	Condição Recebida	Temperatura do Ensaio (°C)	Taxa de Deformação (s ⁻¹)
Hardox450®	3 para cada condição	Temperado	25,300,500,700	0,1

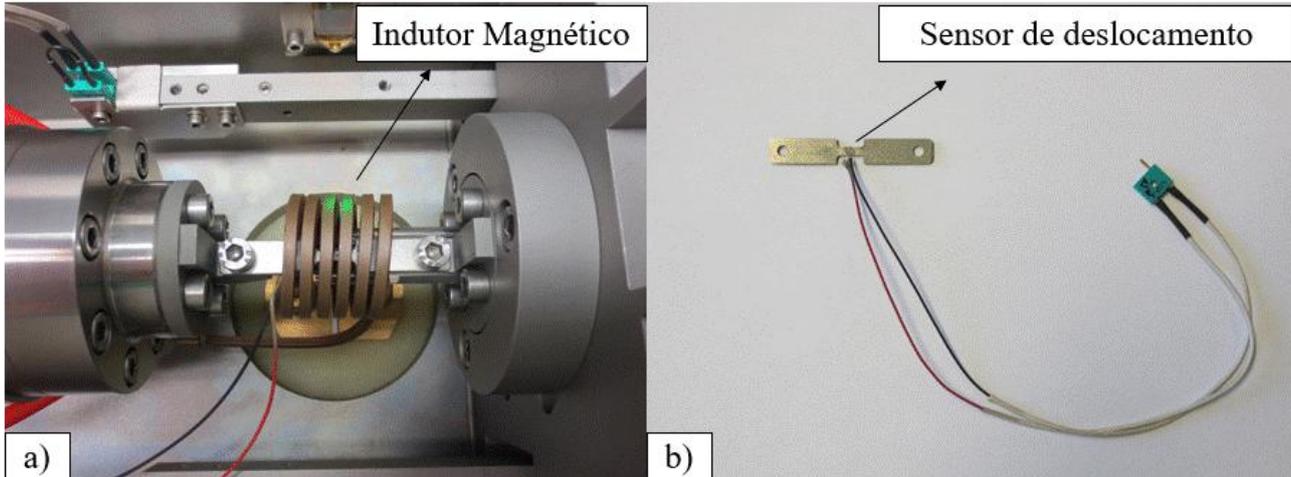


Figura 2. (a) Sistema utilizado para o ensaio de tração através do dilatômetro e (b) Sensor de deslocamento posicionado no centro da amostra. (IBF – Institut für Bildsame Formgebung)

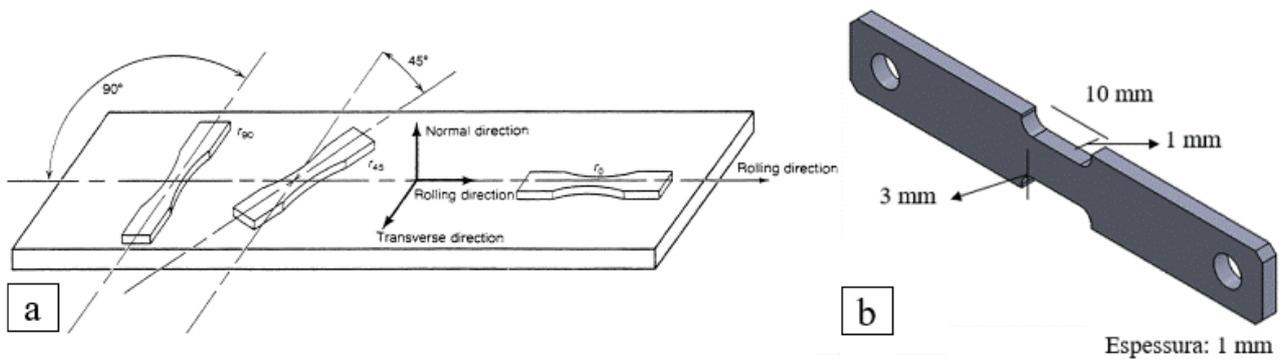


Figura 3. (a) Direções dos corpos de prova e (b) Geometria da chapa para a execução do ensaio de tração.

A análise macroscópica das amostras após o ensaio de tração foi conduzida através do Estereoscópio marca LEICA modelo KL1500, com luz controlada e a análise morfológica na seção transversal pelo microscópio ótico marca NIKON modelo MM-400/SL com 1000x magnificação. Foi utilizado ácido nítrico em 2 % proporção para 100 ml de etanol para revelar as fases presentes na microestrutura da chapa, na condição recebida e após ensaios a quente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química Hardox450® com pode ser verificada na Tabela (2), assim como sua comparação ao catalogado pelas normas de produção.

Tabela 2. Composição química do Hardox450 experimental e da literatura.

Composição (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Experimental	0,169	0,234	0,796	0,02	<0,01	0,022	0,046	0,052	0,003
Data Sheet (2016) Valores Máximos	0,18	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,10	0,040	0,003
Ulewicz (2013)	0,150	0,700	1,600	0,025	0,010	0,250	0,250	0,250	0,004

Observa-se uma diferença nos teores de carbono, manganês e cromo da análise experimental comparados aos dados do fornecedor, apresentando valores ligeiramente inferiores, exceto molibdênio que apresentou 0,012% acima dos

valores máximos. Considerando o trabalho realizado por Ulewicz (2013), as porcentagens de elementos químicos são superiores as especificações técnicas utilizadas para chapas com espessura de 0,7 a 2 mm.

Os resultados em diferentes temperaturas e direções de ensaio de tração são apresentados graficamente na Figura (4) e na Figura (5), as macrografias das amostras. Observa-se que na condição de temperatura ambiente o material se comporta de forma similar nas três direções da chapa, atingindo tensões máximas de 1500 MPa e um alongamento que varia de 9 a 9,5%, tais resultados são similares com os de Ulewicz 2013. A tensão de escoamento, porém, varia consideravelmente quando submetida a temperatura de 300°C, mostrando uma disparidade nos patamares de escoamento nas diferentes direções. A Figura (5) mostra o comportamento das deformações que ocorrem na chapa após o ensaio em diferentes temperaturas, observa-se que a formação do “pescoço” na região do entalhe é decorrente da deformação induzida pelo corpo de prova caracterizando-se como fratura dúctil (Kraus 1995, Preti 2008), este comportamento macroscópico variou apenas na faixa de 300°C.

A tensão de escoamento reduz gradativamente a partir de 500°C, as tensões máximas obtidas foram de 750MPa e o alongamento máximo aumenta consideravelmente até o valor de 14%. Parte-se do pressuposto que nesta faixa de temperatura começa a ocorrer a eliminação dos efeitos pontuais, efeitos de discordâncias e crescimento de subgrãos na microestrutura (Novikov 1994, Reed-Hill 1982). Observa-se ainda, que na temperatura de ensaio de 700°C o aumento na ductilidade onde, os corpos de prova ensaiados a 700°C atingiram tensões máximas de 300MPa e um alongamento máximo de 20% até a ruptura.

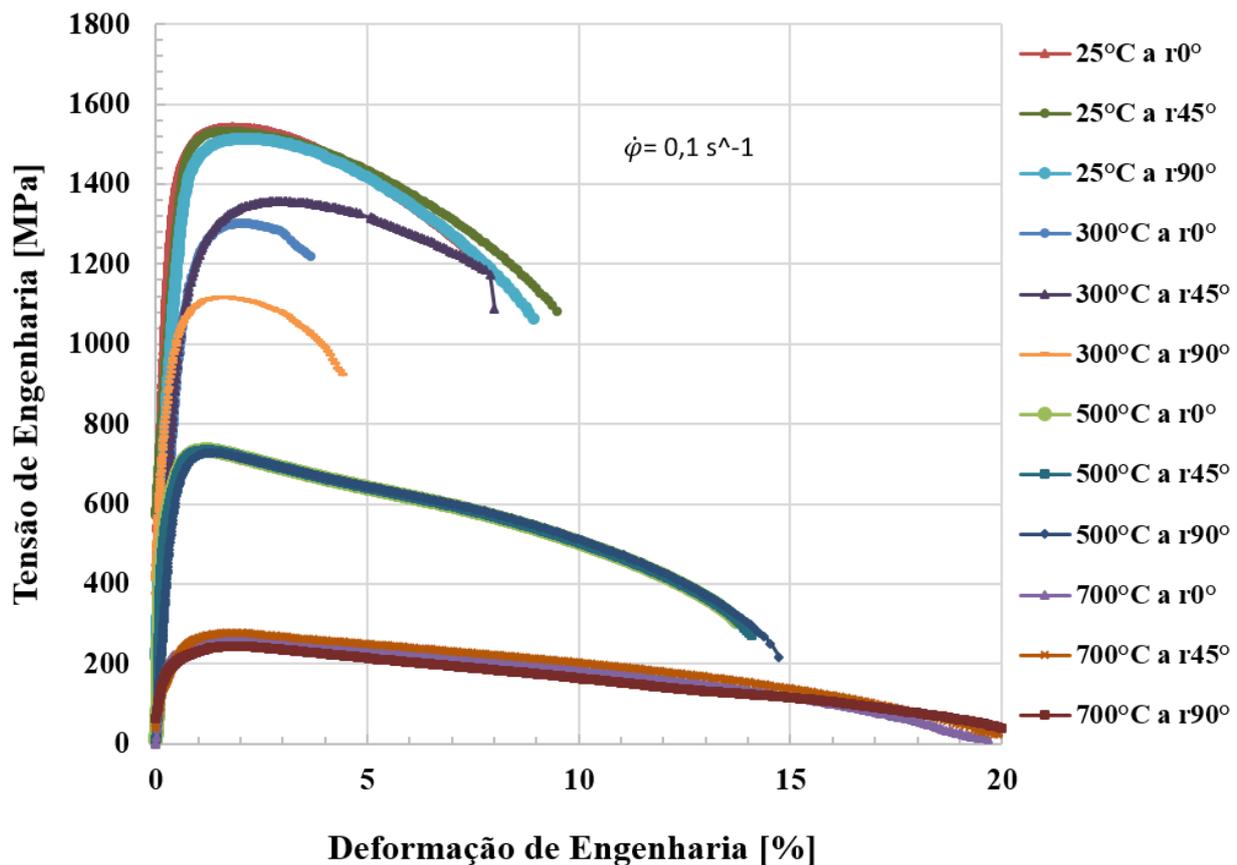


Figura 4. Curvas de Tensão vs. Deformação de Engenharia para o Hardox450 em diferentes temperaturas.

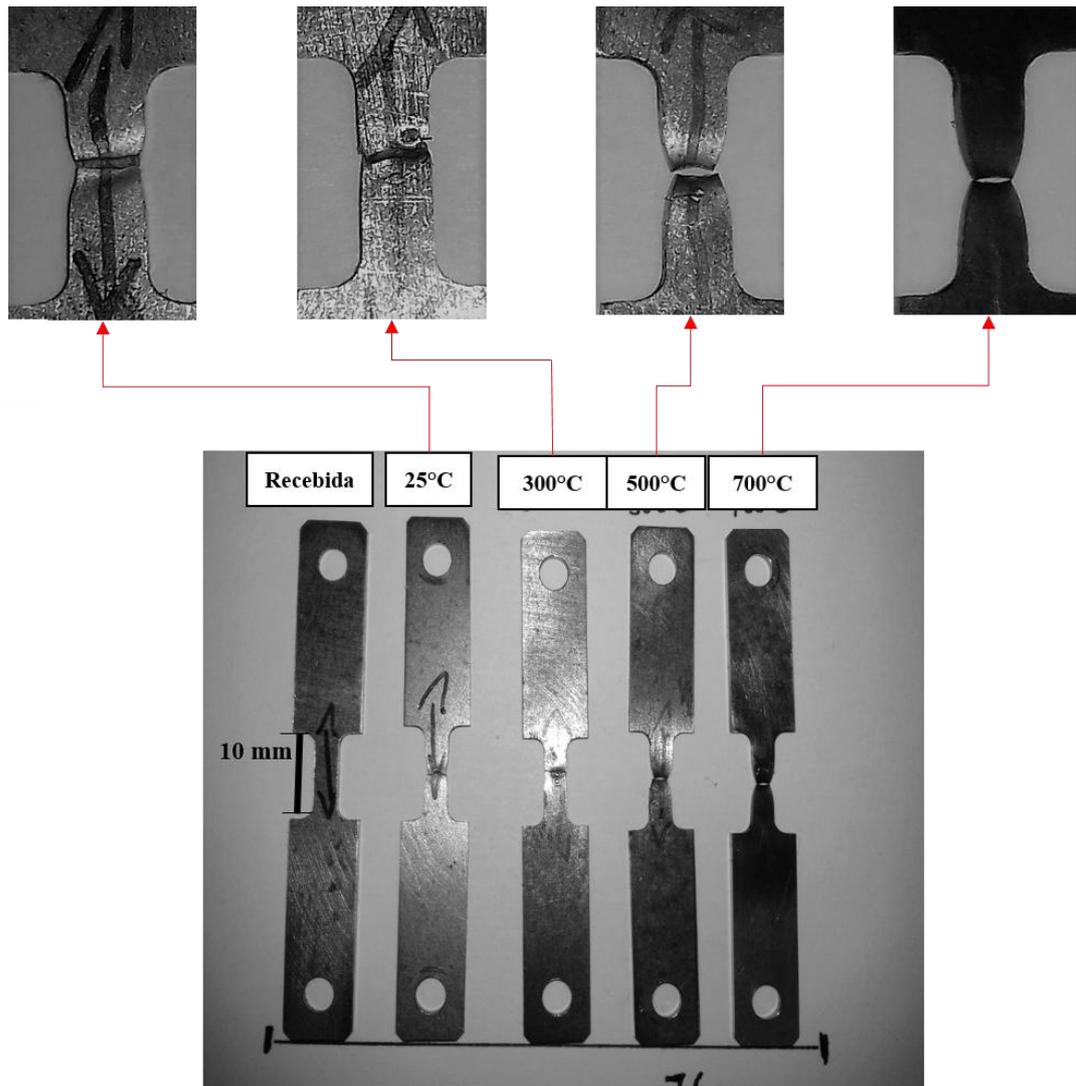


Figura 5 – Característica de fratura nas macrografias dos corpos de prova Hardox450®.

A Figura (6) apresenta os resultados dos ensaios realizados a 300°C e suas macrografias, podendo observar a morfologia da fratura quando sujeitas a três direções de tração, assim como as variações das curvas de engenharia. A amostra (515) demonstrou menor alongamento quando comparada às (516) e (517), evidenciando que as diferentes direções de tração influenciam, o que não foi observado para as outras temperaturas de ensaio.

Estudos conduzidos por Preti (2008), avaliaram os efeitos da temperatura de revenimento na resistência a tração e impacto para o aço martensítico SAE15B30, nos quais destacou os efeitos da fragilização por revenimento quando os ensaios foram conduzidos em uma faixa de temperatura. Dentro deste contexto e avaliando os resultados apresentados na Figura (6), a chapa de Hardox450 tenha sofrido na faixa de temperatura de 300°C o fenômeno de fragilização por revenimento, onde a fragilidade da martensita revenida pode resultar tanto em fratura intergranular quanto transgranular (Briant e Banerji 2013).

Os resultados do ensaio de tração a 300°C podem ser explicados devido a esse mecanismo de falha citado anteriormente, em geral no Hardox450, acredita-se que a segregação de impurezas como fósforo, enxofre e silício mostrados na Tab.(2), como também a precipitação de carbonetos de ferro (Fe_3C), ocorram nesta temperatura durante o ensaio de tração, induzindo o comportamento da fratura em forma de serra localizado ou monocristal vistos na Figura (6). Outra explicação imposta por fenômenos similares a este ocorrido, segundo Okamoto et al (1993), a fragilização é também recorrente pela segregação de carbonetos metaestáveis e difusão do carbono na martensita aglomerando-se nas discordâncias isso faz com que endureça a martensita.

O gráfico da Fig. (7) apresenta a relação das tensões de engenharia em diferentes temperaturas e a ductilidade média. A região frágil originada no ensaio realizado a 300°C mostra uma aproximação entre os limites de escoamento, a Tab.(3) demonstra o percentual médio $\Delta\sigma$ % entre a variação dos patamares de escoamento na chapa ao decorrer dos diferentes ensaios. É possível observar que o comportamento frágil está diretamente relacionado ao patamar de escoamento inferior aos demais analisados. As intersecções do gráfico da Figura (8) podem mostrar as possíveis regiões iniciais de transformação de fase ou segregações que induzem a fragilização pelo revenimento, pois nesta região

observa-se que o gradiente do patamar de escoamento $\Delta\sigma$ % é menor que o alongamento médio percentual. Quando próximo a 400°C intersectam-se novamente os pontos e o gradiente do patamar de escoamento aumenta mudando para um novo estágio de revenimento, onde ocorre a recuperação da estrutura martensítica pela eliminação de defeitos pontuais, rearranjo das discordâncias e formação de contornos de subgrãos. Neste ponto a dureza reduz e a resistência, aumenta a ductilidade e tenacidade (Kraus 2014).

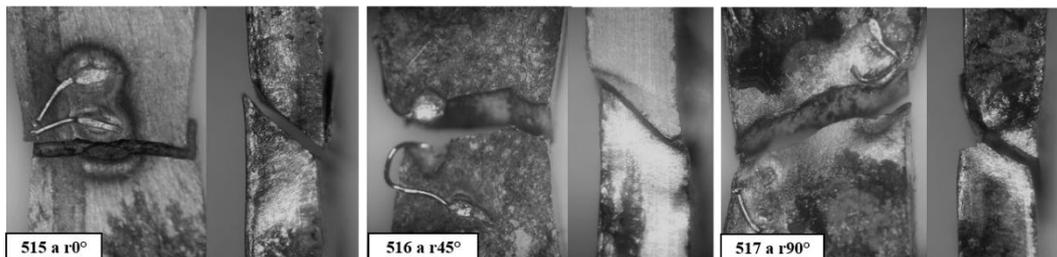
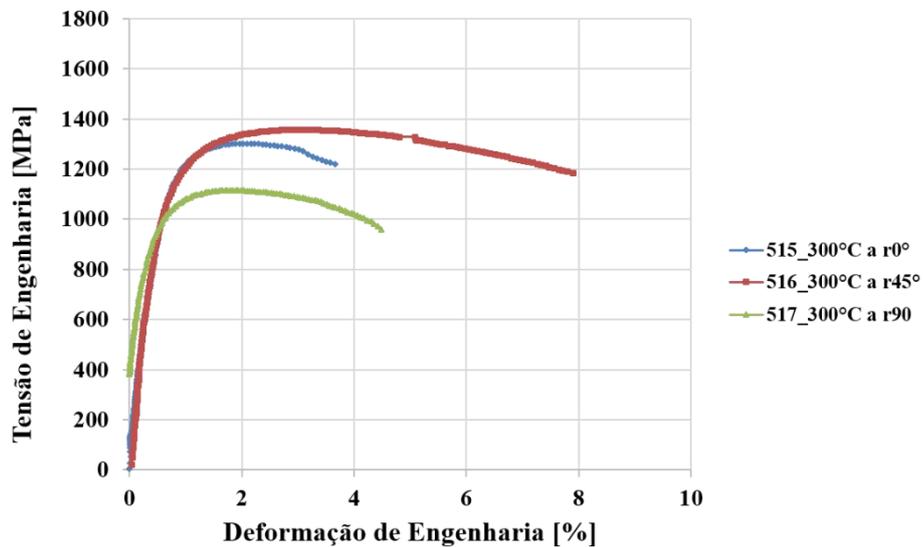


Figura 6. Curvas de Tensão vs. Deformação de Engenharia para o Hardox450 a 300°C e Morfologia das fraturas nas três direções tracionadas (40X de aumento).

Tabela 3. Percentual dos patamares de escoamento médio em função da temperatura.

$\Delta\sigma$ [%]	19,46	9,73	36,36	48,50
Temperatura [°C]	25	300	500	700

A microestrutura do Hardox450 a 25°C e quando aquecida a 300°C em seção transversal são visualizadas respectivamente na Figura (7) e Figura (8). Observou-se que há inclusões não metálicas na microestrutura, pontos escuros destacados em menor ampliação, com um maior destaque destas a 300°C. Ripas de martensita dispersas como também carbonetos de ferro, carbonetos de molibdênio e cromo, estão presentes na microestrutura de acordo com Ulevicz et al., 2013, também é possível observar austenita retida após a tempera quando recebida destaca na coloração branca (Bialobreska e Kostencki, 2015).

Os grãos de austenita retida na microestrutura desliza com maior facilidade a temperatura de 25°C, permitindo um maiores deformações da martensita, destacadas nos contornos de grão. A 300°C, devido ao efeito de fragilização por revenimento, não há tempo suficiente para que ocorra o deslizamento dos grãos austeníticos, ocorrendo a fratura prematura no ensaio de característica frágil. Possivelmente, pode estar relacionado com a segregação de carbonetos metaestáveis da microestrutura, como também nesta temperatura, ocorre a difusão do carbono na martensita, no qual irá aglomerar nas discordâncias, consequentemente endurecendo a martensita e reduzindo sua ductilidade.

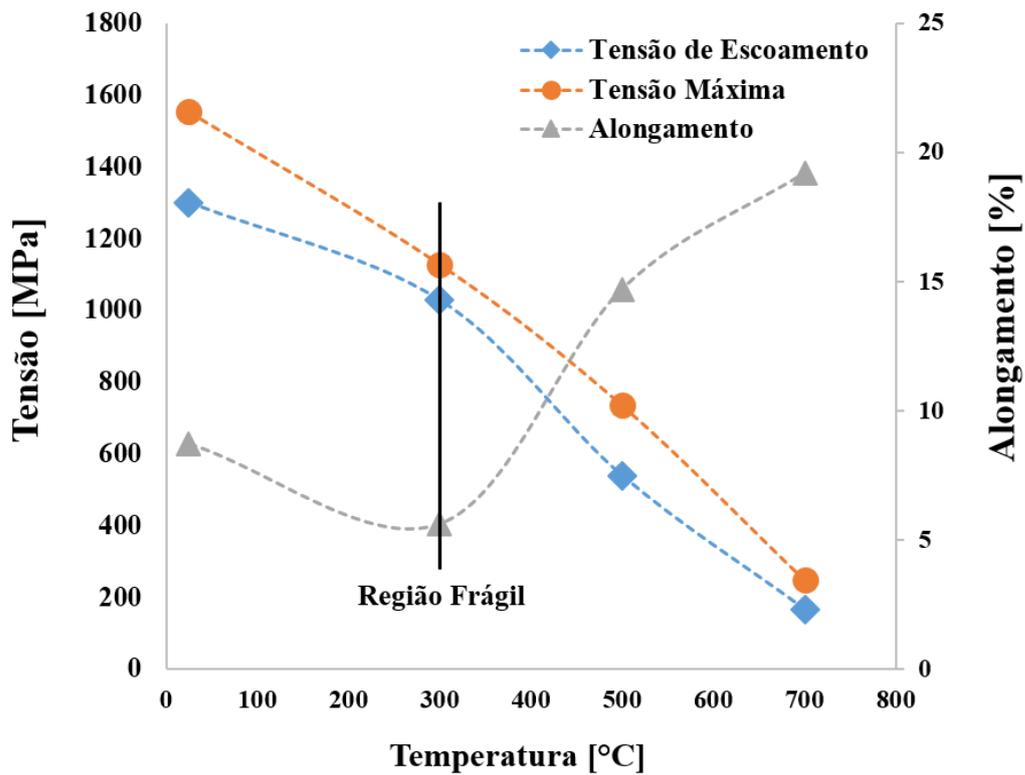


Figura 7. Variação das Tensões Máximas, Mínimas e Alongamento médios em função da temperatura de ensaio de tração do Hardox450®.

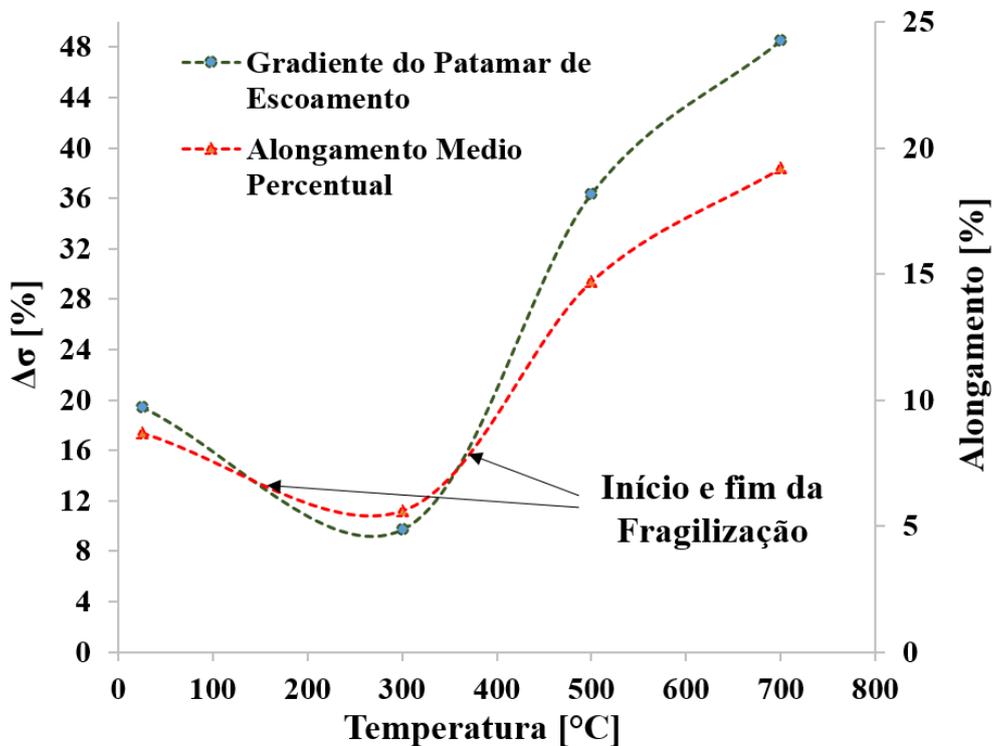


Figura 8. Variação do gradiente de tensão percentual e alongamento médio percentual em função da temperatura ensaiada para o Hardox450®.

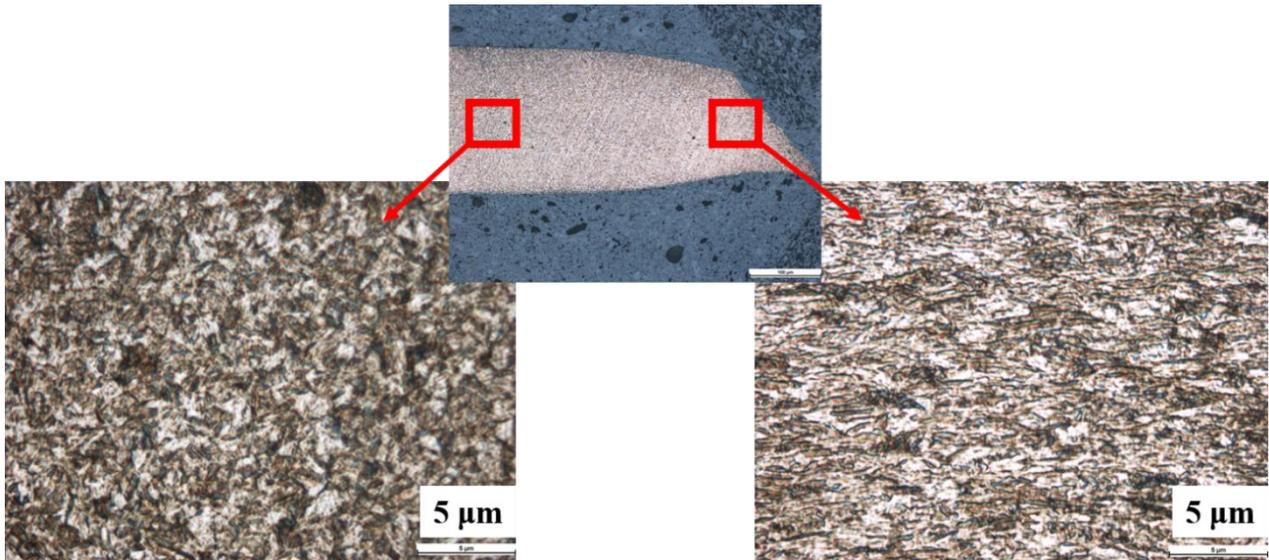


Figura 9. Micrografia da amostra tracionada a 25°C, atacado com Nital 3% em 8 segundos. É observado consideravelmente um cisalhamento nos grãos.

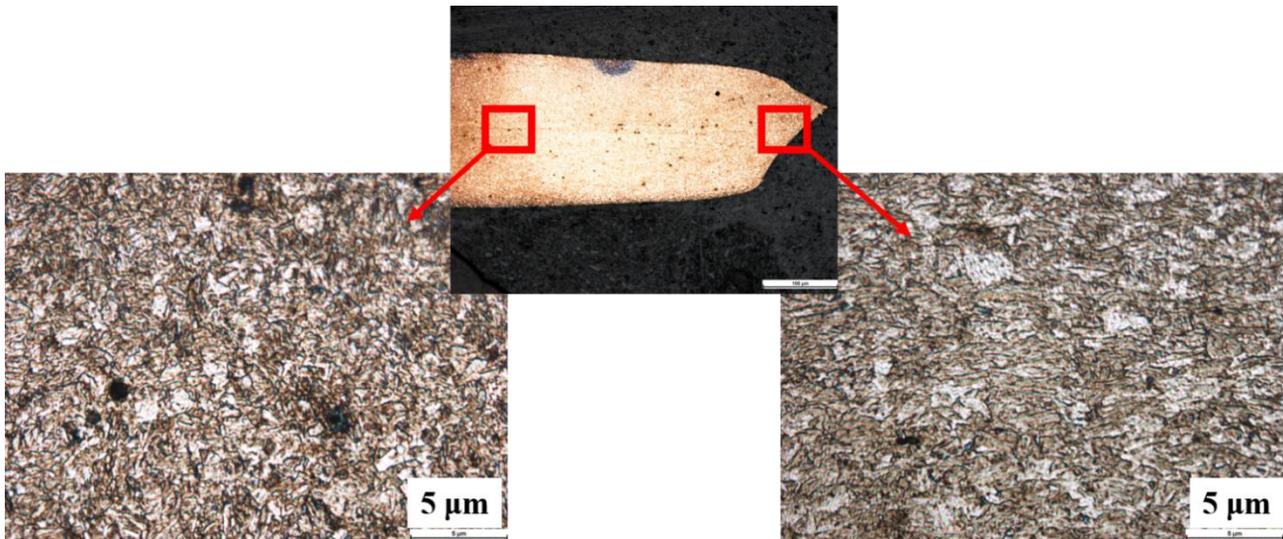


Figura 10. Micrografia do Hardox450 a 300°C, atacado com Nital 3% em 8 segundos. Não é observado um cisalhamento nos grãos de forma considerável.

4. CONCLUSÕES

Por esta investigação, foi possível analisar as propriedades termomecânicas do Hardox450®, submetidas a ensaios de tração em diferentes temperaturas. Observou-se o comportamento frágil da chapa perante a variação de temperatura, microestrutura diante as tensões, assim como variações das propriedades mecânicas.

O ensaio de tração realizado em temperatura ambiente na chapa martensítica de grãos finos avaliada, apresentou um comportamento coerente com as respostas mecânicas típicas de um aço de alta resistência, laminado a frio, para ambas as direções, ou seja, tensões máximas em torno de 1500MPa e alongamento máximo de 10%.

A partir de 300°C, as características de deformação e microestrutura modificam-se, logo ocorre o decréscimo nas tensões máximas e no alongamento aleatoriamente, o que torna essa temperatura crítica e mais suscetível a fragilização por revenimento nas direções analisadas.

Apesar das temperaturas de 500°C e 700°C apresentarem menor resistência a tração, foi possível observar uma diferença de aproximadamente 6 % no alongamento e semelhança entre as três direções avaliadas.

As faixas de temperatura de transição na fragilização por revenimento foram destacadas, tornou possível observar os pontos de intersecção graficamente, pelo ensaio de tração. A microestrutura foi revelada por microscopia ótica, observou-se uma dispersão granulométrica de característica refinada, no que condiz com a literatura investigativa desta

chapa. Também foi observado inclusões nas duas, porém com uma maior quantidade a 300°C, condizendo com os efeitos que a fragilização por revenimento pode causar. Outro ponto foi que o cisalhamento dos grãos na condição fragilizada não foi considerável, comparando-se com a temperatura ambiente, assim a fragilização por revenimento foi caracterizada.

Para a continuidade destes estudos serão analisados com maiores detalhes a microestrutura, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), uma espectroscopia de dispersão em energia (EDS), para analisar a dissociação dos precipitados gerados no decorrer do aquecimento e as faixas críticas para esta chapa. Assim, caracterizado as transformações da martensita e seus precipitados. Como também avaliar esse material quando submetido ao processo de estampagem em altas temperaturas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem as agências de fomento CAPES, apoiadora no projeto BRAGECRIM N° 026/14 e CNPq pela concessão da bolsa de estudos e também ao Instituto de Conformação Mecânica (*IBF – Institut für Bildsame Formgebung*) da RWTH University, Aachen na Alemanha por fornecer os equipamentos necessários para os experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Bialobrzeska, B., & Kostencki, P. (2015). Abrasive wear characteristics of selected low-alloy boron steels as measured in both field experiments and laboratory tests. *Wear*, 328, 149-159.
- Briant, C. L., & Banerji, S. K. (2013). Intergranular fracture in ferrous alloys in nonaggressive environments. *Treatise on materials science and technology*, 25, 21-58.
- Dados Técnicos, Hardox450 Wear Plates (2016). Disponível em: <www.ssab.com/hardox>. Acessado em Outubro, 2016.
- Dudziński, W., Konat, L., & Pękalski, G. (2008). Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels. *Archives of Foundry Engineering*, 8(2), 21-26.
- G. Krauss. Quench and Tempered Martensitic Steels: Microstructures and Performance, In *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, Oxford, (2014), Pages 363-378, ISBN 9780080965338
- JAgiełło, Adam; Trzaska, Jacek; Dobrzański, L., Computer software for modelling CCT diagrams, *Czasopismo Techniczne, Mechanika*, v, 105, p, 87-94, (2008).
- Kraus, G.; Tempering and Structural Change in Ferrous Martensitic Structures Phase Transformations in Ferrous Alloys. *Metallurgical Society of AIME*, pp 102 – 123; 1999.
- Krauss, George. Heat Treated Martensitic Steels: Microstructural Systems for Advanced Manufacture. *ISIJ international*, v. 35, n. 4, p. 349-359, 1995.
- Marie, Stephane et al, Inverse analysis of forming processes based on FORGE environment, In: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2014, p, 1494-1502,
- Novikov, I.; Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais, Editora UFRJ, p 439 – 457, 1994.
- Preti, I. (2008). Estudo do efeito das temperaturas de austenitização e de revenido na resistência e tenacidade do aço SAE 15B30.
- Reed-Hill. R. E.; Princípios de Metalurgia Física, 2ª ed., p 620 – 633, 1982.
- Ulewicz, Robert; Mazur, Magdalena; Bokuvka, Otakar. Structure and mechanical properties of fine-grained steels. *Periodica Polytechnica. Transportation Engineering*, v. 41, n. 2, p. 111, 2013.
- S. Okamoto, D.K. Matlock, G. krauss, in: C.M. Wayman, J. Perkins (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations*, Monterey Institute of Advanced Studies, Carmel, CA, 1993, p. 451.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THERMOMECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS OF FINE GRAINED SHEET MARTENSITIC STEEL

Ivaniski, Thiago M., thiago.ivaniski@ufrgs.br¹

Zottis, Juliana, juliana.zottis@ufrgs.br¹

Lucca de Costa, Luana, Luana.lucca@ufrgs.br¹

da Silva Rocha, Alexandre, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

Lirio Schaeffer, Shaefer@ufrgs.br¹

¹Metal Forming Laboratory, Rio Grande do Sul Federal University– UFRGS, Avenida Bento Gonçalves 9700, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil.

Abstract: *Advanced high strength steel sheets present properties that changes by manufacturing process, heat treatment and chemical elements constituents. The reduction of energy costs, safe, resistance with fitting to demand designer are one of engineering challenges. For this, it is necessary the knowlegment of manufactured product, as formability limitation due the hardening mechanisms that their microalloyed provide and their microstructure. The main objective of this work was to study the thermomechanical properties of fine grained martensitic sheet Hardox450® steel. It was checked that yield points with different work temperatures and rolling directions, showed different mechanical behavior. The critical of embrittlement points were identified during the sheet metal heating, by tensile testing, as well as short decreasing of flow stress, however with a considerable mechanical properties at 500°C and increasing of ductility.*

Keywords: *Embrittlement behavior, Hardox450®, Flow stress.*