

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE PERMANÊNCIA NO FORNO DO AÇO BH220 NO RESULTADO DE BAKE HARDENING (BH₂)¹

Rafael Fagundes Ferreira²
Marcello Rosa Dumont³
Nathalia Sette Câmara Magalhães⁴
Fabiano Ferreira Silva⁵

Resumo

A influência da temperatura e do tempo de permanência no forno do aço BH220 no resultado de *Bake Hardening* foi avaliada por meio de ensaios de tração, a partir de corpos de prova retirados de *blanks* no sentido transversal ao sentido de laminação, nas condições de estado de fornecimento. O ensaio de tração foi proposto como método de avaliação do incremento de escoamento por efeito *Bake Hardening*, conforme norma interna da Fiat Automóveis. O estudo foi realizado fixando os valores de temperaturas (150°C a 210°C) e deformação (2%), e variando o tempo de tratamento térmico (entre 2 a 30 minutos). Por meio das análises, constatou-se que o aumento dos valores de temperatura dos fornos na cura da pintura eleva o escoamento final do componente e que o tempo de permanência no forno influencia, com valores ínfimos, no incremento de tensões no limite de escoamento.

Palavras-chave: Ensaio de tração; Aço BH220; Envelhecimento; Tempo no forno.

FEASIBILITY STUDY OF THE UTILIZATION OF BH220 STEEL IN SUBSTITUTION OF FEP04 STEEL IN AN EXTERNAL AUTOMOTIVE PANEL

Abstract

The feasibility of the utilization of BH220 steel (0.65 mm) in substitution of FEP04 steel (0.75 mm) in an automotive panel was evaluated by tensile tests from specimens taken of the different regions of these components under the conditions before and after heat treatment. The tensile tests were proposed as an indirect method of evaluation of the dent resistance of the panels. The formability of the panels produced with the used steels was assessed by evaluating the strain imposed during the stamping process by constructing the diagram of major and minor true strain. Through this analysis, was found that is feasible to use BH220 steel instead of FEP04 steel, because with Bake Hardenable steel was possible to stamp the component successfully, and have been computed gains in the dent resistance of the panel and mass reduction of this component.

Key words: Metal forming; BH220 steel; FEP04 steel; Mass reduction.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Centro de Tecnologia e Ciência dos Materiais, Fiat Automóveis, Betim, MG, Brasil.

³ Químico, M.Sc., Centro de Tecnologia e Ciência dos Materiais, Fiat Automóveis, Betim, MG, Brasil.

⁴ Engenheira Metalurgista, Centro de Tecnologia e Ciência dos Materiais, Fiat Automóveis, Betim, MG, Brasil.

⁵ Tecnólogo, Centro de Tecnologia e Ciência dos Materiais, Fiat Automóveis, Betim, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas têm procurado atender aos requisitos da indústria automotiva desenvolvendo aços de alta conformabilidade e de elevada resistência mecânica. A utilização de um desses aços nominado por “BH220” em painéis automotivos permite a redução de espessura das chapas, diminuindo o peso total dos veículos, e contribuindo assim com a redução de consumo de combustível e emissão de poluentes para a atmosfera.⁽¹⁾

Esses aços caracterizam-se por serem facilmente conformáveis e por apresentarem um aumento de resistência mecânica devido ao envelhecimento que ocorre através de um tratamento térmico a baixa temperatura (em geral 170°C durante 20 minutos). Esse fenômeno, também chamado de “efeito BH” (*Bake Hardening*), ocorre no caso das indústrias automobilísticas, após as operações de estampagem, durante a passagem da carroceria pelos fornos do processo de cura da pintura.⁽²⁾

A grande aplicação desses aços encontra-se em peças como portas, capô e tetos, sendo que esses componentes são submetidos a deformações pequenas. Para as aplicações citadas, o aumento da resistência por encruamento é insuficiente para redução de espessura da chapa. Porém, após o tratamento térmico, o endurecimento final por meio da cura da pintura permite a redução desejada e como consequência a redução do peso do veículo.⁽³⁾

Este trabalho visa avaliar a influência da temperatura e do tempo de permanência no forno do material BH220 com 0,75 mm de espessura, em relação aos resultados de efeito BH₂ (*Bake Hardening* com pré-deformação de 2% em tração uniaxial).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material Utilizado e Caracterização

O material BH220, com 0,75 mm de espessura, foi caracterizado por meio de análises de composição química, avaliação da microestrutura e ensaio de tração para obtenção de propriedades mecânicas. Todos os ensaios foram realizados e os resultados confrontados com a especificação da norma FIAT 52814.⁽⁴⁾

Em análise química, os elementos Mn, Si, P, Ti e Al foram obtidos por espectrometria de emissão óptica em equipamento marca ARL 3560, enquanto a análise dos elementos C e S foi feita por combustão/infravermelho, equipamento Horiba.

A microestrutura do aço foi observada em microscópio óptico, marca Olympus modelo V-ND 25-2, após métodos convencionais de preparação metalográfica e ataque com reativo Nital (4%).

As propriedades mecânicas do aço foram avaliadas com base nas especificações da norma Fiat 52814,⁽⁴⁾ enquanto a confecção dos corpos de prova e a execução dos ensaios de tração foram feitas segundo a norma UNI EN 10002-1.⁽⁵⁾

As dimensões previstas nesta norma estabelecem que o corpo de prova tenha um comprimento da parte útil LC = (90 a 120 mm), comprimento inicial Lo = 80 mm, largura da parte útil b = 20 mm, largura da cabeça de 40 mm, conforme ilustrado na Figura 1.

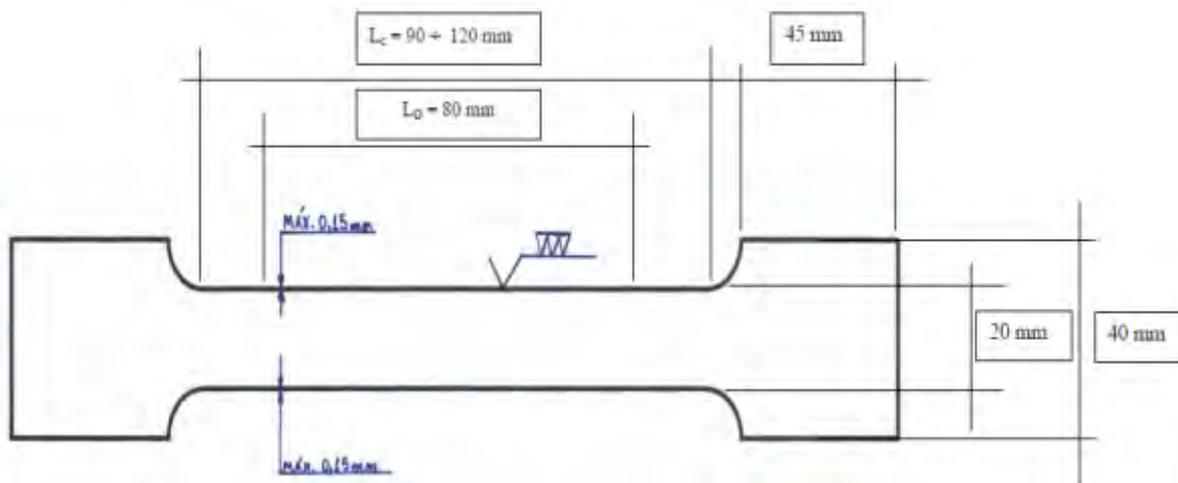


Figura 1. Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de tração, segundo a norma UNI EN 10002-1.⁽⁵⁾

Após este processo, as bordas do corpo de prova foram retificadas para se obter um acabamento com rugosidade aproximada de 0,8 μm .

As propriedades mecânicas indicadas na norma Fiat 52814⁽⁴⁾ encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Especificação do aço utilizado no ensaio

Aço	Tensão de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento Mínimo A_{80} (%)	r_{90°	n_{90°
BH220	305 a 400	200 a 270	≥ 32	$\geq 1,6$	$\geq 0,15$

Os corpos-de-prova foram extraídos dos *blanks* formando ângulos de 90° em relação ao sentido de laminação.

Foi realizado inicialmente ensaio de tração em cinco corpos de prova do aço BH220, sem pré-deformação e sem tratamento térmico, tomando os resultados obtidos de propriedades mecânicas como referência para o material no estado de fornecimento.

Durante o ensaio de tração, determinou-se os valores de tensão de resistência (σ_R), tensão de escoamento (σ_{esc}) e alongamento (Δl) através das Equações 1, 2 e 3:

$$\sigma_R = \frac{P_m}{S_0} \quad (1)$$

$$\sigma_{esc} = \frac{P_{esc}}{S_0} \quad (2)$$

$$\Delta l = \frac{l_{ff} - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Onde, P_m é a carga máxima, P_{esc} é a carga de escoamento do material em uma deformação a 0,2 %, l_{ff} é o comprimento final do corpo de prova após ensaio de tração e l_0 é o comprimento inicial (base de medida = 80 mm) do corpo de prova antes do ensaio.⁽⁶⁾

O índice de anisotropia r é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura no teste de um corpo de prova padrão. Após a conformação, o valor r é calculado da expressão, conforme norma Fiat 50116:⁽⁷⁾

$$r = \frac{\ln\left(\frac{wf}{wo}\right)}{\ln\left(\frac{tf}{to}\right)} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_L - \epsilon_w} \quad (4)$$

Onde, w_o e t_o são a largura e espessura iniciais respectivamente, w_f e t_f são a largura e espessura finais, ϵ_w é a deformação verdadeira na largura do cp e ϵ_L é a deformação verdadeira no comprimento do corpo de prova.

Foi possível calcular conforme norma FIAT 50116,⁽⁷⁾ os valores de n (coeficiente de encruamento), na expressão conhecida como “Equação de Hollomon”,⁽⁶⁾ sendo K o coeficiente de resistência:

$$\sigma_v = K * e_v^n \quad (5)$$

Também foi realizada a avaliação do efeito WH, BH₂ e a soma (WH + BH₂), para esse material em estado de fornecimento, com pré-deformação de 2% e tratamento térmico a 170°C, conforme norma Fiat 52814.⁽⁴⁾

Posteriormente, foram ensaiados mais 60 corpos de prova (3 cp's para cada tempo determinado) para avaliação e cálculo do efeito BH₂ conforme planejamento e descrito na Tabela 2.

Nessa avaliação foram fixados os parâmetros de deformação (2%) nas Temperaturas (150°C, 170°C, 190°C e 210°C). O tempo de permanência no forno (2, 5, 10, 20 e 30 minutos) foi variado, afim de conhecer qual é a influência desses parâmetros no efeito BH₂.

Tabela 2. Condição das provas de ensaio: Fixando o valor de cada temperatura (150°C, 170°C, 90°C e 210°C) na deformação de 2% e variando o tempo de permanência no forno (2 min., 5 min., 10 min., 20 min. e 30 min.)

Temperatura (°C)	Deformação (%)	Tempo (min.)				
150	2	2	5	10	20	30
170						
190						
210						

Os valores de BH₂ (*Bake Hardening* com pré-deformação de 2% em tração uniaxial) foram medidos conforme recomendação da norma Fiat 52814⁽⁴⁾ (Figura 2). Esses parâmetros foram determinados para a avaliação das características do aço quanto ao fenômeno metalúrgico de envelhecimento por tratamento térmico no forno, afim de simular o que ocorre no processo de pintura da carroceria.

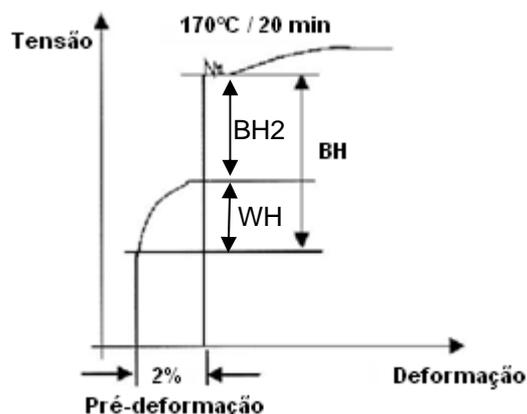


Figura 2. Representação esquemática da metodologia empregada para a determinação do índice *Bake Hardening* (BH₂) segundo a norma FIAT 52814.⁽⁴⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do Material

A caracterização química obtida para os aço BH220 é apresentada na Tabela 3. Afirma-se que a composição química do aço encontra-se dentro da especificação de norma.

Tabela 3. Análise de composição química do aço avaliado (% p/p)

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
BH220	0,0018	0,71	0,01	0,039	0,009	0,054	0,002

A microestrutura da amostra analisada é mostrada na Figura 3. A microestrutura do aço BH220 é formada por grãos ferríticos equiaxiais e o tamanho de grão ferrítico médio da amostra também pode ser considerado normal para o grau de aço em questão (Tabela 4).

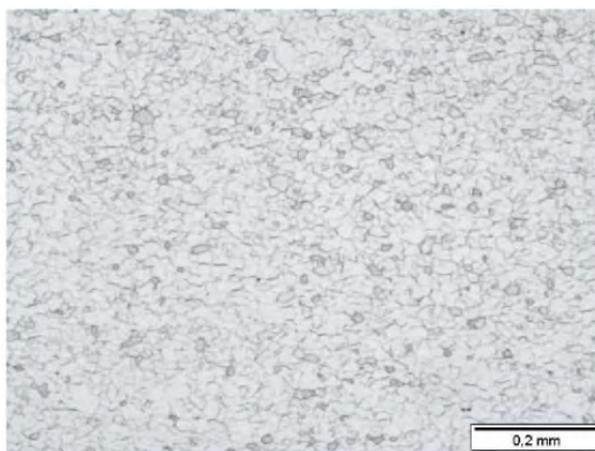


Figura 3. Aspecto microestrutural da amostra do aço analisado. Aumento original: 100x.

Tabela 4. Tamanho de grão ferrítico médio da amostra analisada

Aço	Tamanho de grão médio ASTM E112 ⁽⁸⁾
BH220	8

As propriedades mecânicas do material utilizado, em estado de fornecimento, foram obtidas através do ensaio de tração, as curvas do ensaio são apresentadas na Figura 4 e a média dos resultados mostrados na Tabela 5. Os resultados encontram-se dentro dos valores especificados para o respectivo grau de aço.

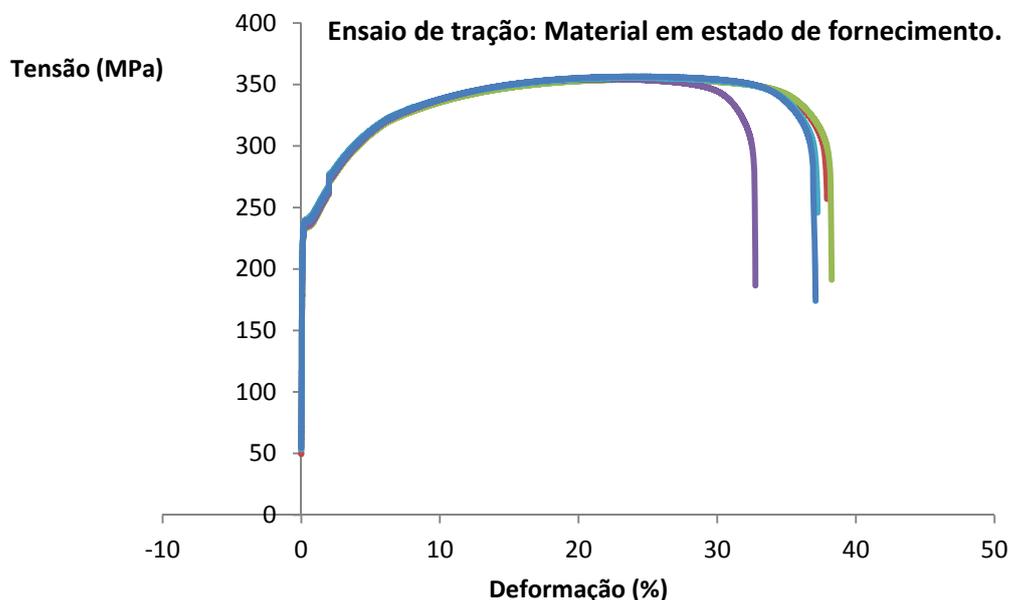


Figura 4. Curva Tensão x Deformação das amostra ensaiadas por tração uniaxial no estado de fornecimento.

Tabela 5. Propriedades mecânicas médias obtidas em ensaio de tração no material avaliado

Aço	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento(%)	r _{90°}	n _{90°}
BH220	355	237	37,8	1,94	0,20

Na Tabela 6 mostra-se o aumento da resistência em relação ao limite de escoamento, devido aos efeitos WH e BH₂ para uma pré-deformação em tração de 2% e tratamento térmico posterior a 170°C por 20 minutos, de acordo com a norma FIAT 52814.⁽⁴⁾

Tabela 6. Resultados médios encontrados de WH e BH₂ para o material ensaiado conforme norma FIAT 52814.⁽⁴⁾

Aço	Tensão de escoamento (MPa)	WH (MPa)	BH ₂ (MPa)
BH220	237	28,8	29,9

3.2 Avaliação da Influência da Temperatura e Tempo de Permanência no Forno no Efeito BH₂

Nas Tabelas 7 a 10 e nas Figuras 5 a 8 são mostrados os resultados de valores do efeito BH₂ em relação a temperatura x tempo de permanência no forno e os gráficos de Tensão x Deformação nos extremos (para o tempo de 2 minutos e 30 minutos). Os corpos de prova foram ensaiados em triplicata nos tempos determinados e o resultados da média dos 3 cp's foram indicados nas tabelas.

Tabela 7. Resultados médios encontrados de efeito BH₂ para o material ensaiado conforme temperatura e tempo de permanência no forno indicado

Temperatura (°C)	Tempo de permanência no forno (min.)	Efeito BH ₂ (MPa)
150°C	2	32
	5	33
	10	31
	20	32
	30	33

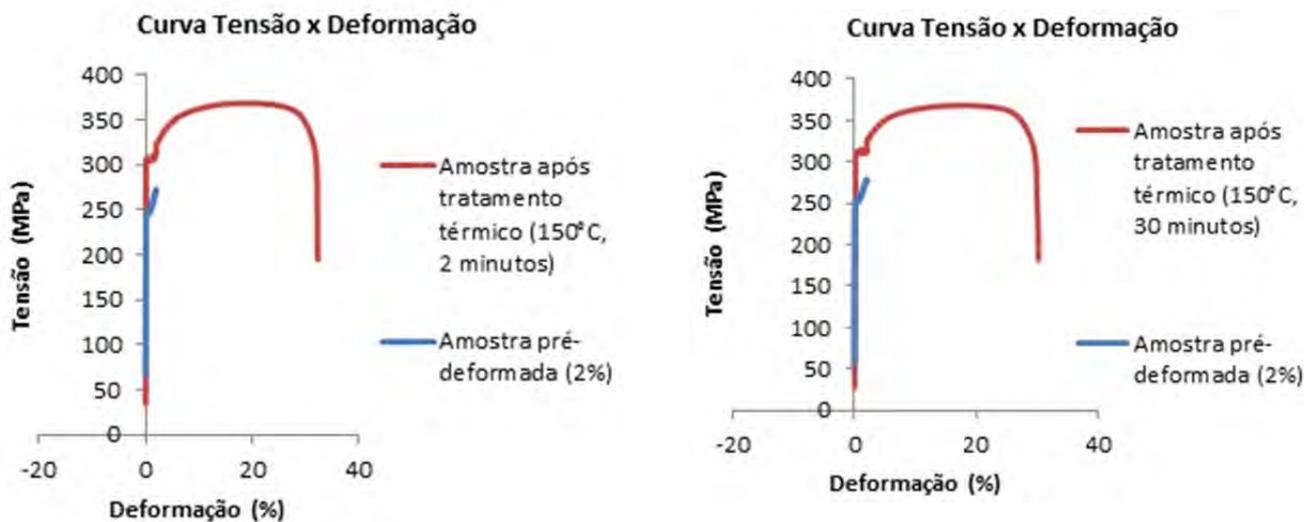


Figura 5. Curva Tensão x Deformação das amostra ensaiadas por tração uniaxial. Amostra pré-deformada 2% e ensaiada após tratamento térmico (150°C por 2 minutos e 30 minutos).

Tabela 8. Resultados médios encontrados de efeito BH₂ para o material ensaiado conforme temperatura e tempo de permanência no forno indicado

Temperatura (°C)	Tempo de permanência no forno (min.)	Efeito BH ₂ (MPa)
170°C	2	33
	5	33
	10	33
	20	33
	30	35

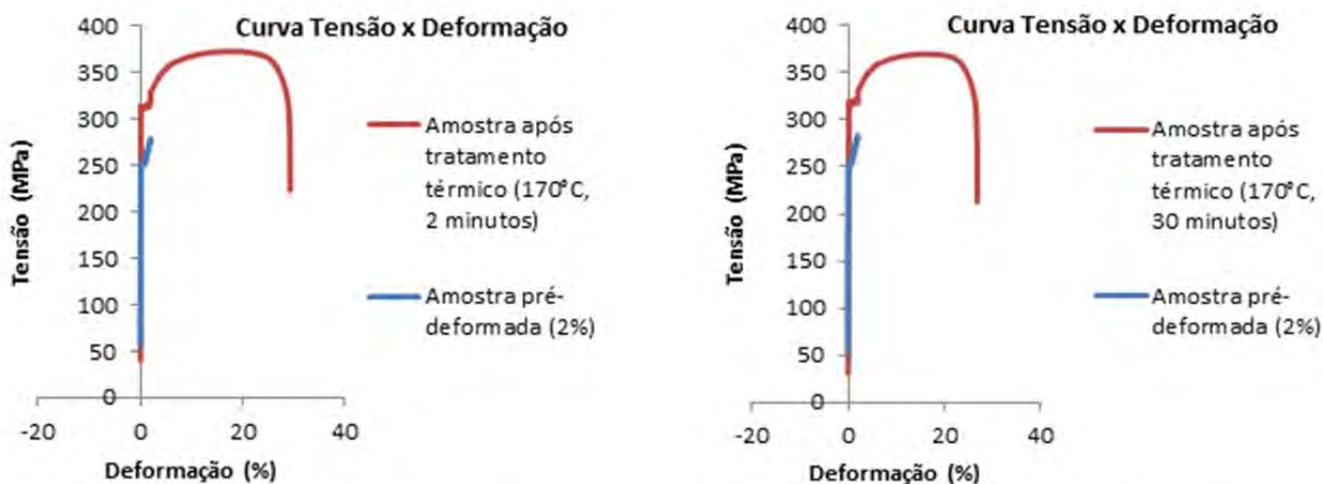


Figura 6. Curva Tensão x Deformação das amostra ensaiadas por tração uniaxial. Amostra pré-deformada 2% e ensaiada após tratamento térmico (170°C por 2 minutos e 30 minutos).

Tabela 9. Resultados médios encontrados de efeito BH₂ para o material ensaiado conforme temperatura e tempo de permanência no forno indicado

Temperatura (°C)	Tempo de permanência no forno (min.)	Efeito BH ₂ (MPa)
190°C	2	36
	5	38
	10	41
	20	42
	30	42

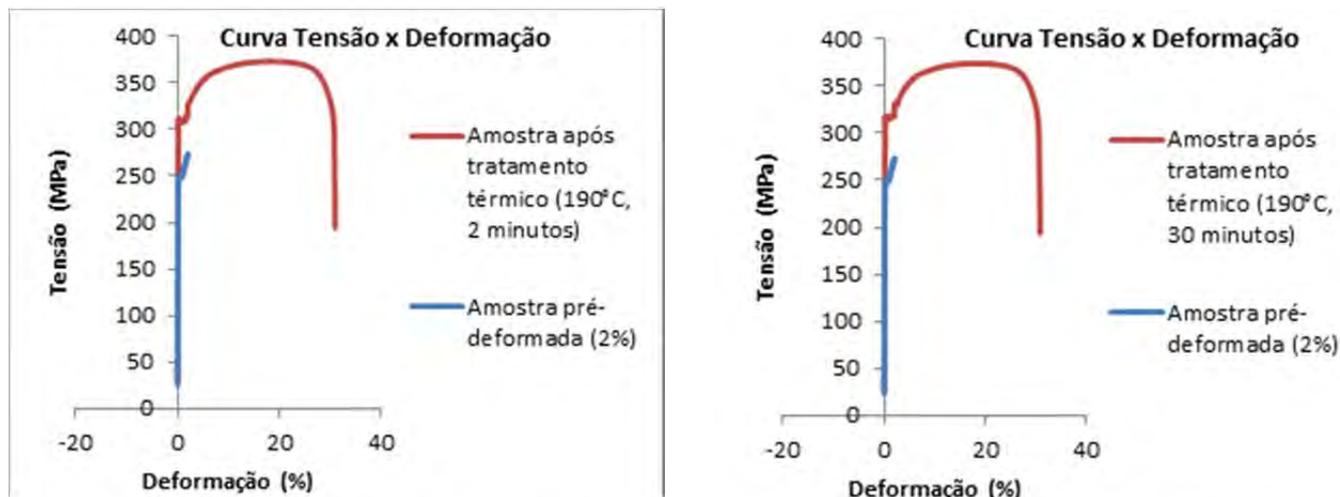


Figura 7. Curva Tensão x Deformação das amostras ensaiadas por tração uniaxial. Amostra pré-deformada 2% e ensaiada após tratamento térmico (190°C por 2 minutos e 30 minutos).

Tabela 10. Resultados médios encontrados de efeito BH₂ para o material ensaiado conforme temperatura e tempo de permanência no forno indicado

Temperatura (°C)	Tempo de permanência no forno (min.)	Efeito BH ₂ (MPa)
210°C	2	41
	5	43
	10	46
	20	49
	30	50

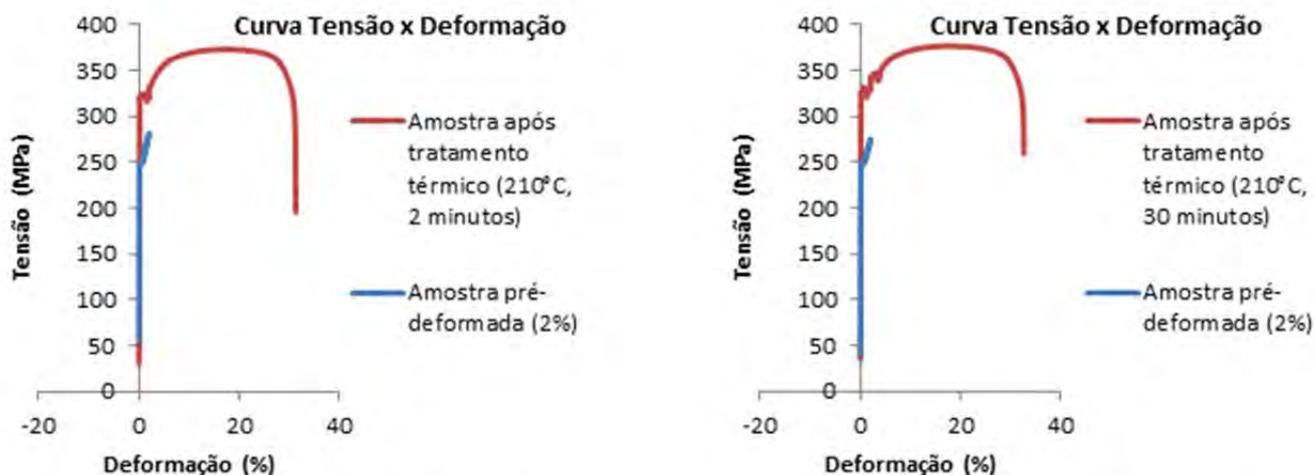


Figura 8. Curva Tensão x Deformação das amostra ensaiadas por tração uniaxial. Amostra pré-deformada 2% e ensaiada após tratamento térmico (210°C por 2 minutos e 30 minutos).

O gráfico da Figura 9 visa identificar de forma detalhada o comportamento do material BH220 com a influência da temperatura e tempo de permanência no forno no valor de BH₂.

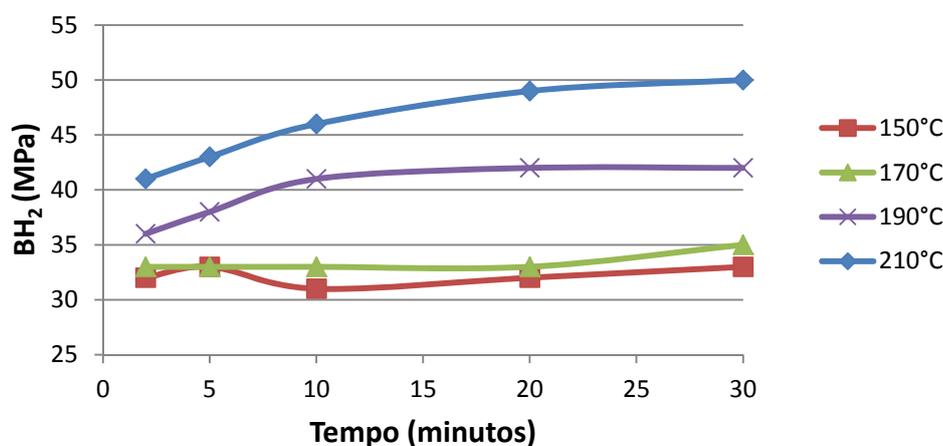


Figura 9. Influência da temperatura e tempo de permanência no forno no valor de BH₂ do material BH220.

Em temperaturas de envelhecimento compreendidas entre 150° e 170°C, os resultados médios de efeito BH₂ estão próximos de 30 MPa, independente do tempo de permanência no forno. A diferença entre o valor de BH₂ mínimo e máximo encontrado é de 2 MPa no intervalo de tempo entre 2 a 30 minutos.

Observa-se que, em temperaturas entre 190°C e 210°C, o valor médio de BH₂ aumenta e uma pequena influência no tempo de permanência no forno é visualizada, porém, com acréscimos ínfimos de tensão nos resultados encontrados. A diferença entre o valor mínimo e máximo aumenta comparado ao caso anterior, podendo chegar ao valor de 6 MPa na temperatura de 190°C, e aproximadamente 9 MPa na temperatura de 210°C, no intervalo de tempo estudado.

Conforme verifica-se, para manter um aumento de limite de escoamento no material em torno de 30 MPa, uma temperatura de 150°C é suficiente para um tempo mínimo de 2 minutos. Caso haja interesse do aumento desse valor em 10 MPa (em torno de 30%), basta o aumento mínimo da temperatura para 210°C podendo-se manter o mesmo tempo de permanência no forno de 2 minutos.

4 CONCLUSÃO

O estudo realizado indica, portanto, que aumentando os valores de temperatura dos fornos de cura da pintura maior será o escoamento final do componente, entretanto, isto implicaria em aumento do custo do processo de pintura

O tempo de permanência no forno começa a influenciar nos resultados de BH₂ em temperaturas entre 190°C a 210°C, chegando a valores de até 9 MPa de diferença entre 2 a 30 minutos.

O estudo evidenciou também que é possível trabalhar com tempos inferiores ao especificado de 20 minutos na temperatura especificada em norma de 170°C, sem prejuízos ao resultado final de BH₂.

Desta forma, conclui-se que será possível realizar alterações na velocidade do processo produtivo da linha de pintura, sem prejudicar o efeito BH, uma vez que a variação encontrada entre os valores de BH₂ obtidos nos ensaios é pouco relevante,

considerando os intervalos de tempo testados. O componente poderá ficar no forno por 2 ou 30 minutos, dependendo da demanda da produção, sem influenciar o resultado final de incremento no escoamento.

REFERÊNCIAS

- 1 FERREIRA, F. R. et. al. **Estudo de viabilidade de utilização do material BH220 em substituição ao FEP04 em painel externo de um automóvel.** Congresso ABM, 2012.
- 2 ULSAB-AVC Program, 2001. “**Technical Transfer Dispatch 6, 05-01-2001, ULSAB-AVC Body Structures Materials**”.
- 3 Fábio Dian Murari. **Cinética de envelhecimento de aços Dual Phase de baixa resistência mecânica laminados a frio.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- 4 NORMA 52814. **High-Resistance steel sheets and Strips with yield point of 180 to 300 MPa.** Fiat Auto Normazione, 03a ed., Turim, 2004.
- 5 Norma UNI EN 10002-1. **Metallic Materials – Tensile Testing – part 1: Method of test at ambient temperature.** 2004.
- 6 FERREIRA, F. R., CARNEIRO, G. R. J. **Estudo de viabilidade de utilização do material Ferrítico-Bainítico em substituição ao Dual Phase.** Congresso ABM, 2011.
- 7 NORMA 50116. **Determinazione degli indici di formabilità.** Fiat Auto Normazione, 03a ed., Turim, 2005.
- 8 ASTM. E 112. **Test methods for determination average grain size.** Edição 2010.