

# INFLUÊNCIA DA PRÉ-DEFORMAÇÃO PLÁSTICA, DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE AQUECIMENTO NO ENVELHECIMENTO DO AÇO BH220\*

Rafael Fagundes Ferreira<sup>1</sup>

Nathalia Sette Câmara Magalhães<sup>2</sup>

José Rubens Gonçalves Carneiro<sup>3</sup>

Marcello Rosa Dumont<sup>4</sup>

## Resumo

Aços *Bake Hardening* são aços laminados a frio com envelhecimento controlado. Estes aços caracterizam-se pela boa conformação e por apresentarem aumento de resistência mecânica devido ao envelhecimento, que ocorre por tratamento térmico. Nesse trabalho, corpos de prova de tração do material BH220 foram submetidos à pré-deformações que variam de 0 a 9% por tração uniaxial, posteriormente à tratamento de envelhecimento realizado em temperaturas que variam de 140°C a 210°C em tempos de aquecimento entre 5 minutos a 45 minutos. Foi confirmada que as temperaturas de envelhecimento, na faixa estudada de 140°C a 210°, alteram a variação do limite de escoamento devido ao fenômeno de difusão que é termicamente ativado. Nos resultados encontrados verifica-se que o tempo de aquecimento, dentro do intervalo testado, não é significativo.

**Palavras-chave:** Aço BH220; *Bake hardening*; *Work hardening*; Superfície de resposta “DOE”.

## THE INFLUENCE OF PLASTIC PRE DEFORMATION, TEMPERATURE AND HEATING TIME IN THE AGING TREATMENT OF THE BH220 STEEL

### Abstract

Bake Hardening steels are cold rolled steels with controlled aging. These steels are characterized by a good formability and an increase in the strength due to the aging that occurs during heat treatment. In this study, tensile test specimens of the BH200 steel were submitted to pre deformations ranging from 0 to 9% by uniaxial tension, subsequently they were subjected to an aging heat treatment performed at temperatures varying from 140 to 210°C, in heating times between 5 and 45 minutes. It has been confirmed that the aging temperatures in the range studied from 140 to 210 °C modify the yield point due to the phenomenon of diffusion, which is thermally activated. In the results, it is possible to verify that the heating time, within the range tested, it is not significant.

**Keywords:** BH220 steel; Bake hardening; Work hardening; Response surface “DOE”.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc., Engenharia de Materiais e Ecologia do Produto, Fiat Chrysler Automobiles, Betim, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista, Engenharia de Materiais e Ecologia do Produto, Fiat Chrysler Automobiles, Betim, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Metalurgista, Dr., Professor Adjunto IV, Mestrado em Engenharia Mecânica, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Químico, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas UFMG, Professor no departamento de Engenharia de Materiais CEFET MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas tem procurado atender aos requisitos da indústria automotiva desenvolvendo aços de alta conformabilidade e de elevada resistência mecânica. A utilização de um desses aços, denominado 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 a 170 °C durante 20 minutos). Esse fenômeno, também chamado de “efeito BH”, ocorre no caso das indústrias automobilísticas, após as operações de estampagem durante a passagem da carroceria pelos fornos do processo de cura da pintura [2-4].

O efeito BH é um fenômeno conhecido como envelhecimento por deformação estática, ligado à presença de carbono em solução sólida no aço, dificultando a movimentação das discordâncias através da segregação de átomos intersticiais [5-7]. Em outras palavras, a quantidade de carbono no aço, antes de ser conformado é muito baixa, apresentando-se dissolvido na ferrita. Durante a estampagem da peça ocorre o aumento do encruamento e o acúmulo de discordâncias no sistema de escorregamento. Posteriormente, no tratamento térmico, o carbono precipita na forma de carbeto preferencialmente próximos às discordâncias criadas na conformação do aço, aumentando a resistência do material [8].

Este trabalho visa estudar, simultaneamente, a influência da deformação plástica, da temperatura e do tempo que o material permanece aquecimento no resultado de *Bake Hardening* (BHn), *Work Hardening* (WHn) e escoamento final (BHn + WHn) de um aço utilizado normalmente para a confecção de painéis externos automotivos. Para tal, foram utilizadas metodologias de planejamento de experimentos com a construção de superfícies de resposta para o escoamento final (BHn + WHn).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

O material utilizado nos ensaios foi o aço BH 220, norma FIAT 52814 [9]. É um aço que possui carbono extra-baixo e adição de manganês e alumínio como elementos de liga. Também certa quantidade de carbono é retida em solução sólida, para que ocorra o fenômeno de envelhecimento por deformação [10].

### 2.2 Planejamento do Experimento

Para este trabalho, com o objetivo de se avaliar simultaneamente a influência da deformação plástica, da temperatura e do tempo de tratamento térmico no resultado de *Bake Hardening* (BHn), *Work Hardening* (WHn) e escoamento final (BHn + WHn) foi construído um planejamento de experimentos – *Design of Experiments DOE* – de superfície de resposta com três fatores. Foi utilizado o tipo de planejamento composto central, estipulando o alfa em 0,5 e com análise do ponto central. Foram selecionadas as três variáveis de influência, também denominados de fatores ou variáveis de entrada, que são: o percentual de deformação, a temperatura da estufa e o tempo de permanência sob aquecimento. Para cada um desses fatores foi

associada uma letra, A, B e C sendo analisados em uma escala que varia de -1 a 1. Além dos extremos de cada eixo, o ponto central e os valores de alfa (+ 0,5 e -0,5) também foram analisados. O alfa correspondente a um determinado deslocamento sobre o eixo. Para minimizar os erros experimentais cada combinação de variáveis de influencia foi ensaiada em triplicata aumentando a correlação da superfície de resposta gerada com os valores reais. A Tabela 1 demonstra a combinação de todas as variáveis de influência.

**Tabela 1:** Matriz do planejamento experimental.

Amostra	A	B	C	Amostra	A	B	C	Amostra	A	B	C
1.a	-1	-1	-1	1.b	-1	-1	-1	1.c	-1	-1	-1
2.a	1	-1	-1	2.b	1	-1	-1	2.c	1	-1	-1
3.a	-1	1	-1	3.b	-1	1	-1	3.c	-1	1	-1
4.a	1	1	-1	4.b	1	1	-1	4.c	1	1	-1
5.a	-1	-1	1	5.b	-1	-1	1	5.c	-1	-1	1
6.a	1	-1	1	6.b	1	-1	1	6.c	1	-1	1
7.a	-1	1	1	7.b	-1	1	1	7.c	-1	1	1
8.a	1	1	1	8.b	1	1	1	8.c	1	1	1
9.a	-0,5	0	0	9.b	-0,5	0	0	9.c	-0,5	0	0
10.a	0,5	0	0	10.b	0,5	0	0	10.c	0,5	0	0
11.a	0	-0,5	0	11.b	0	-0,5	0	11.c	0	-0,5	0
12.a	0	0,5	0	12.b	0	0,5	0	12.c	0	0,5	0
13.a	0	0	-0,5	13.b	0	0	-0,5	13.c	0	0	-0,5
14.a	0	0	0,5	14.b	0	0	0,5	14.c	0	0	0,5
15.a	0	0	0	15.b	0	0	0	15.c	0	0	0

A – Temperatura; B – Tempo; C – Deformação.

Colocando-se os três fatores em um sistema de coordenadas de três eixos, o ponto central representa o valor 0 comum aos fatores e os extremos das coordenadas representam os vértices de um cubo são onde as três variáveis de entrada tem valores nos extremos +1 ou -1.

Como variáveis de resposta, ou parâmetro de saída, foram utilizados os valores de BHn, de WHn e a soma dos dois BHn + WHn, obtidos através do ensaio de tração dos corpos de prova. Foram utilizadas pré-deformações, variando de 0 % a 9 %, em tração uniaxial, temperatura de envelhecimento entre 140 °C a 210 °C e o tempo entre 5 minutos a 45 minutos. Estes intervalos foram ajustados para representar linearmente a escala de cada fator de influência do experimento de -1 a 1.

Na análise dos resultados, para melhor ajustar o modelo matemático das superfícies de respostas geradas, foi utilizada a ordem máxima de interação dos termos através da escolha do modelo denominado “full quadratic”. Foram então construídas superfícies de respostas especificando um nível de confiança de 95 % para cada uma das variáveis de resposta.

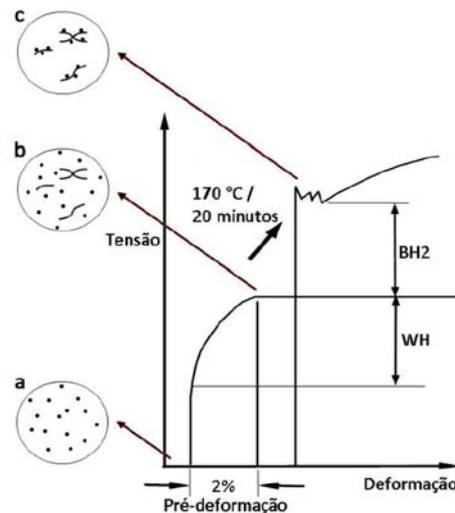
### 2.3 Preparação dos Corpos de Prova e Ensaio de Tração

Para avaliação de características mecânicas foram retirados corpos de prova de tração na direção transversal ao sentido de laminação, conforme norma FIAT 52814, que foram confeccionados com dimensionamento e formatos tomados a partir das normas FIAT 50113 [11] e norma UNI EN 10002-1[12] que descrevem o ensaio.

Inicialmente os corpos de prova foram deformados à temperatura ambiente, seguindo as orientações para ensaio de tração conforme norma FIAT 50113, com velocidade constante de 1,2 mm/min até atingir as pré-deformações definidas. Na sequência, foram submetidos ao tratamento térmico com as devidas variações de temperatura e tempo de permanência na estufa e, então, os corpos de prova foram

tracionados, a uma velocidade inicial de 1,2 mm/min até 2 % de deformação e depois de 38,4 mm/min, aumentando assim a velocidade do ensaio.

Foi realizado também o ensaio de tração em cinco (5) corpos de prova do aço BH220 sem pré-deformação e sem tratamento térmico tomando os resultados de propriedades mecânicas como referência para o material no estado de fornecimento. Determinaram-se os valores do limite de resistência (LR), limite de escoamento (LE) e alongamento. A Figura 1 mostra esquematicamente o método de obtenção dos efeitos BH<sub>2</sub> e WH para um aço pré-deformado em 2% e envelhecido por uma temperatura de 170 °C por 20 minutos [13].



**Figura 1.** Método de obtenção do efeito BH<sub>2</sub> e WH em ensaio de tração pela curva tensão vs deformação. Em cada etapa, são indicados: os átomos de C em solução (a), discordâncias geradas na deformação (b) e discordâncias imobilizadas após tratamento térmico (c).

Substituindo a faixa definida para as variáveis de influência na escala da matriz de combinações do DOE foram obtidas as seguintes variações: deformações ( $n = 0,00\%$ ,  $2,25\%$ ,  $4,50\%$ ,  $6,75\%$  e  $9,00\%$ ), temperaturas ( $140,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $157,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $175,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $192,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $210,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e tempo de aquecimento (5 min., 15 min., 25 min., 35 min. e 45 min.). A Tabela 2 mostra todas as combinações definidas com as devidas triplicatas e a identificação de cada um dos corpos de prova.

Para os cálculos de ganho de resistência em tensão decorrentes dos efeitos BH<sub>n</sub> e WH<sub>n</sub>, foram utilizados os valores de tensão para uma determinada porcentagem de pré-deformação antes do envelhecimento (T1), o limite de escoamento no estado de fornecimento antes do envelhecimento (LE1) e o limite de escoamento após o envelhecimento por tratamento térmico para a mesma porcentagem de pré-deformação (LE2).

O ganho de resistência mecânica referente a 0 % de pré-deformação (BH0) é calculado pela diferença entre os valores de limite de escoamento antes e após o tratamento térmico. Este ganho de resistência mecânica é relativo somente ao efeito *Bake Hardening*, pois, o aço não foi submetido à pré-deformação.

Para as demais porcentagens de pré-deformação o corpo de prova foi colocado na máquina de tração e tracionado até atingir cada uma das porcentagens estipuladas e, na sequência, foi colocado em estufa para o envelhecimento (com variações de temperatura e tempo definidos pela Tabela 2). Depois de resfriado à temperatura ambiente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio típico de tração.

**Tabela 2:** Matriz do planejamento experimental, em triplicata, com os parâmetros utilizados no ensaio de tração.

Amostra	Temperatura(°C)	Tempo (min.)	Deformação (%)
1.a	140,0	5	0,00
2.a	210,0	5	0,00
3.a	140,0	45	0,00
4.a	210,0	45	0,00
5.a	140,0	5	9,00
6.a	210,0	5	9,00
7.a	140,0	45	9,00
8.a	210,0	45	9,00
9.a	157,5	25	4,50
10.a	192,5	25	4,50
11.a	175,0	15	4,50
12.a	175,0	35	4,50
13.a	175,0	25	2,25
14.a	175,0	25	6,75
15.a	175,0	25	4,50

Amostra	Temperatura(°C)	Tempo (min.)	Deformação (%)
1.b	140,0	5	0,00
2.b	210,0	5	0,00
3.b	140,0	45	0,00
4.b	210,0	45	0,00
5.b	140,0	5	9,00
6.b	210,0	5	9,00
7.b	140,0	45	9,00
8.b	210,0	45	9,00
9.b	157,5	25	4,50
10.b	192,5	25	4,50
11.b	175,0	15	4,50
12.b	175,0	35	4,50
13.b	175,0	25	2,25
14.b	175,0	25	6,75
15.b	175,0	25	4,50

Amostra	Temperatura(°C)	Tempo (min.)	Deformação (%)
1.c	140,0	5	0,00
2.c	210,0	5	0,00
3.c	140,0	45	0,00
4.c	210,0	45	0,00
5.c	140,0	5	9,00
6.c	210,0	5	9,00
7.c	140,0	45	9,00
8.c	210,0	45	9,00
9.c	157,5	25	4,50
10.c	192,5	25	4,50
11.c	175,0	15	4,50
12.c	175,0	35	4,50
13.c	175,0	25	2,25
14.c	175,0	25	6,75
15.c	175,0	25	4,50

A diferença entre o limite de escoamento após tratamento térmico (LE2) e a tensão máxima atingida antes do tratamento térmico (T1) é o ganho de resistência mecânica devido ao efeito  $BH_n$ , calculado para uma determinada pré-deformação. E a diferença entre a tensão máxima atingida (T1) e o limite de escoamento (LE1), ambos antes do envelhecimento, é o ganho de resistência mecânica pelo encruamento ou efeito de  $WH_n$ .

As Equações (1), (2) e (3) apresentam os cálculos descritos e utilizados para se obter os valores de  $BH_0$ ,  $BH_n$ ,  $WH_n$ , sendo  $n = 0,00 \%$ ,  $2,25 \%$ ,  $4,50 \%$ ,  $6,75 \%$  e  $9,00 \%$ .

$$BH_0 = LE2 - LE1 \quad (1)$$

$$BH_n = LE2 - T1 \quad (2)$$

$$WH_n = T1 - LE1 \quad (3)$$

Após cálculo dos efeitos  $BH_n$  (Equação 2) e  $WH_n$  (Equação 3), os resultados foram inseridos como variáveis de resposta do planejamento experimental e cada um deles foi analisado gerando as respectivas superfícies de respostas. Após a construção das superfícies de respostas, alguns valores aleatórios de determinadas combinações das variáveis de influência, diferentes daquelas combinações utilizadas na matriz do DOE, foram ensaiados e comparados com os valores obtidos nas superfícies de respostas com o objetivo de se comparar a aproximação do resultado gerado pelo modelamento matemático ao resultado real testado. Esse procedimento foi denominado neste trabalho como “contraprova”.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise Química

A composição química obtida do material encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Análise química encontrada nos aços avaliados (%)

Material	C	Mn	Al	Si	P	S	Ti	Nb	N
BH220	0,0019	0,70	0,056	0,01	0,040	0,009	0,002	0,007	0,001

O aço BH220, utiliza o nióbio para estabilização parcial do carbono. Ele tem elementos substitucionais Mn e P que ajustam as propriedades mecânicas do aço.

### 3.2 Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas do material utilizado, antes de ser submetido à pré-deformação (estado de fornecimento), obtidas através do ensaio de tração, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Propriedades mecânicas do material no estado de fornecimento.

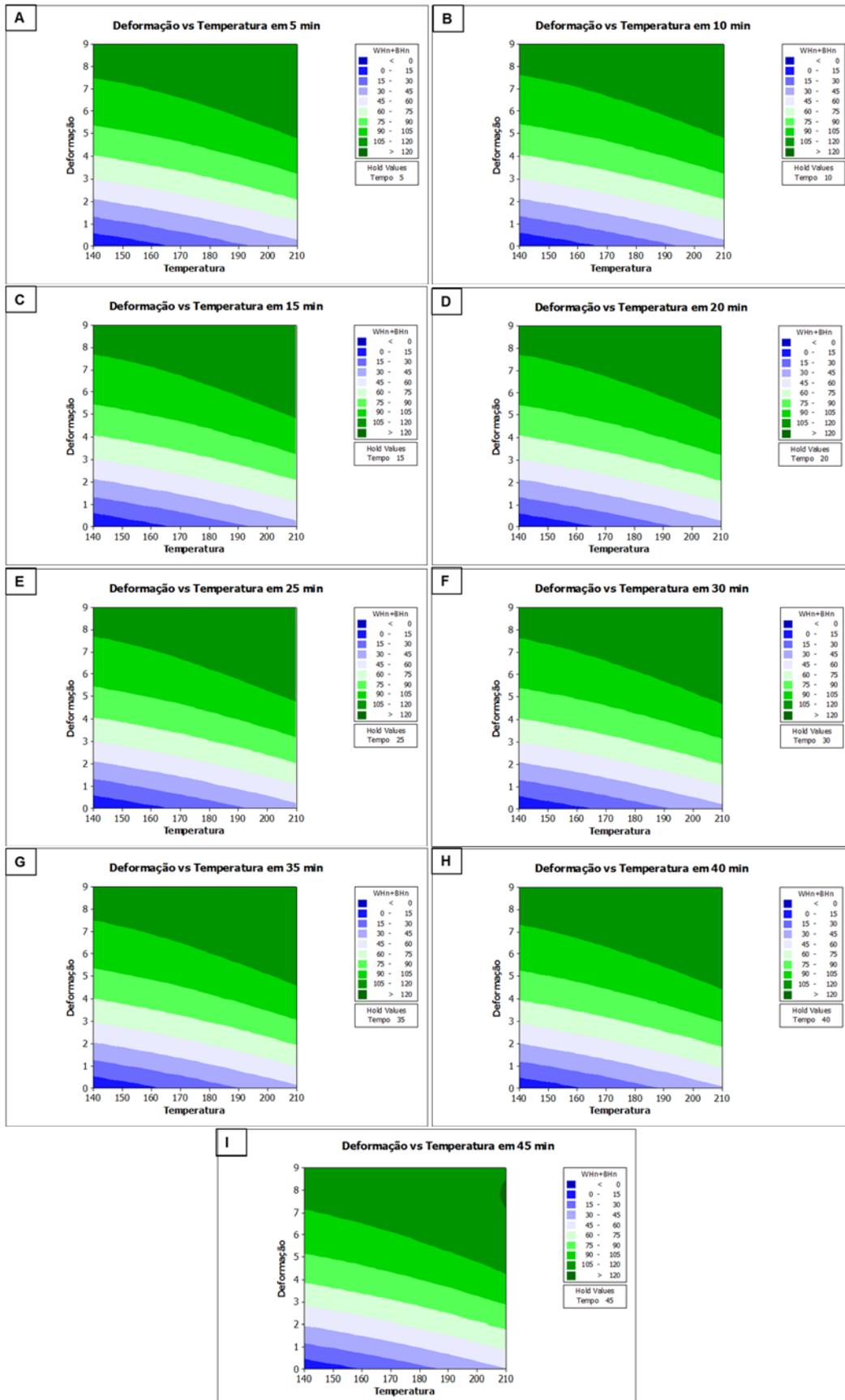
	Tensão de Ruptura MPa	Tensão de Escoamento MPa	Alongamento %
BH220 Estado de fornecimento	354 a 356 355 ± 0,95	234 a 239 237 ± 2,31	37,0 a 38,7 37,8 ± 0,71

Posteriormente, foram ensaiados os 45 corpos de prova do planejamento experimental com combinações das variáveis de influência definidas. A Tabela 5 mostra os resultados encontrados para os valores de  $WH_n$ ,  $BH_n$  e  $WH_n + BH_n$ .

**Tabela 5.** Resultados, em MPa, encontrados de  $WH_n$ ,  $BH_n$  e  $WH_n + BH_n$  para os materiais ensaiados em tração com diferentes parâmetros.

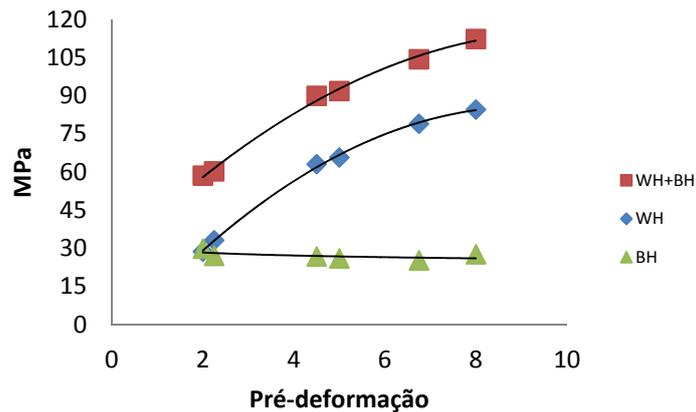
Am.	$WH_n$	$BH_n$	$WH_n + BH_n$	Am.	$WH_n$	$BH_n$	$WH_n + BH_n$	Am.	$WH_n$	$BH_n$	$WH_n + BH_n$
1.a	0,00	0,49	0,49	1.b	0,00	1,90	1,90	1.c	0,00	2,30	2,30
2.a	0,00	38,34	38,34	2.b	0,00	40,73	40,73	2.c	0,00	39,49	39,49
3.a	0,00	3,57	3,57	3.b	0,00	4,93	4,93	3.c	0,00	4,77	4,77
4.a	0,00	43,17	43,17	4.b	0,00	47,80	47,80	4.c	0,00	43,22	43,22
5.a	91,49	18,17	109,66	5.b	89,51	18,37	107,88	5.c	90,36	17,79	108,15
6.a	91,75	26,94	118,69	6.b	90,02	25,89	115,91	6.c	89,62	24,69	114,31
7.a	91,12	20,20	111,32	7.b	90,22	19,10	109,32	7.c	90,26	20,02	110,28
8.a	90,72	29,77	120,49	8.b	89,57	28,43	118,00	8.c	89,20	30,38	119,58
9.a	63,26	24,04	87,30	9.b	61,07	26,29	87,36	9.c	61,79	26,71	88,50
10.a	63,33	30,33	93,66	10.b	61,59	30,10	91,69	10.c	61,04	31,32	92,36
11.a	63,68	25,63	89,31	11.b	62,49	27,58	90,07	11.c	64,23	25,62	89,85
12.a	63,29	27,74	91,03	12.b	61,52	29,07	90,59	12.c	62,12	28,28	90,40
13.a	33,23	27,10	60,33	13.b	33,65	29,16	62,81	13.c	34,19	30,66	64,85
14.a	78,47	25,43	103,90	14.b	78,94	24,03	102,97	14.c	79,65	26,46	106,11
15.a	62,18	27,45	89,63	15.b	61,59	29,02	90,61	15.c	62,30	29,60	91,90

Foi realizada a análise dos dados obtidos e construídas as superfícies de resposta para o escoamento final ( $WH_n + BH_n$ ), demonstradas na Figura 2. Verifica-se que o efeito final  $WH_n + BH_n$  evidencia, dentro dos limites do experimento, que: 1) o aumento do tempo praticamente não causa aumento de resistência, sugerindo que o tempo de 5 minutos é suficiente para o efeito esperado, 2) o aumento da temperatura causa ligeiro acréscimo do  $WH_n + BH_n$ , sugerindo que a temperatura de 140°C já produz um efeito bastante satisfatório, 3) o aumento da deformação é a maior responsável pelo aumento da resistência e 4) o aumento simultâneo da temperatura e da deformação foi responsável pelos melhores resultados.



**Figura 2.** Superfície de resposta deformação vs temperatura para o parâmetro de saída WHn+BHn com tempo de: (A) 5 minutos; (B) 10 minutos; (C) 15 minutos; (D) 20 minutos; (E) 25 minutos; (F) 30 minutos; (G) 35 minutos; (H) 40 minutos; (I) 45 minutos.

O limite de escoamento final é mais dependente da quantidade de pré-deformação obtida no material e pouco dependente do aumento da temperatura. Observa-se ainda que os valores absolutos de  $BH_n + WH_n$  alcançam aproximadamente 120 MPa (equivalente a 51 % a mais do escoamento do material no estado de fornecimento) com pré-deformação de 8 % a 9 % em temperaturas próximas de 140 °C. Conforme aumenta-se a temperatura do tratamento térmico até o limite de 210 °C foi possível alcançar o mesmo valor de 120 MPa com pré-deformação próximas a 5 %. A figura 3 mostra a evolução dos valores WH, BH e WH + BH em tração para deformações convencionais entre 2 e 8%.



**Figura 3:** Influência da pré-deformação em tração uniaxial sobre a variação do limite de escoamento devido a WH, BH e WH+BH. Valores de temperatura e tempo de aquecimento entre 170°C a 200°C e 20 a 40 minutos respectivamente.

### 3.3 Avaliação da Contraprova

As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados obtidos por ensaio de tração de cada conjunto de variáveis e os valores previstos de  $WH_n + BH_n$  conforme as superfícies de resposta.

**Tabela 6.** Resultados em MPa encontrados de  $WH_n + BH_n$  para os materiais ensaiados com 8 % de pré-deformação em temperatura de 200 °C por 40 minutos e com 0 % de pré-deformação em temperatura de 210 °C por 35 minutos.

8 % de pré-deformação temperatura de 200 °C por 40 minutos		0 % de pré-deformação temperatura de 210 °C por 35 minutos	
CP (ensaio de tração)	$WH_n + BH_n$ (MPa)	CP (ensaio de tração)	$WH_n + BH_n$ (MPa)
CP 1	111,53	CP 1	47,88
CP 2	112,40	CP 2	42,12
CP 3	111,99	CP 3	45,52
CP 4	112,01	CP 4	44,01
CP 5	113,61	CP 5	43,97
<b>Média</b>	<b>112,31</b>	<b>Média</b>	<b>44,70</b>
Desvio Padrão	0,79	Desvio Padrão	2,15
<b>Resultado da Superfície de resposta</b>	<b>116,80</b>	<b>Resultado da Superfície de resposta</b>	<b>41,70</b>
<b>Diferença entre os dois métodos</b>	<b>4,49</b>	<b>Diferença entre os dois métodos</b>	<b>3,00</b>

**Tabela 7.** Resultados em MPa encontrados de WHn+BHn para os materiais ensaiados com 2 % de pré-deformação em temperatura de 210 °C por 20 minutos e com 0 % de pré-deformação em temperatura de 210 °C por 35 minutos.

2 % de pré-deformação temperatura de 210 °C por 20 minutos		0 % de pré-deformação temperatura de 210 °C por 35 minutos	
CP (ensaio de tração)	WH <sub>n</sub> + BH <sub>n</sub> (MPa)	CP (ensaio de tração)	WH <sub>n</sub> + BH <sub>n</sub> (MPa)
CP 1	69,59	CP 1	92,97
CP 2	70,53	CP 2	90,85
CP 3	69,90	CP 3	90,87
CP 4	70,58	CP 4	92,70
<b>Média</b>	<b>70,15</b>	<b>Média</b>	<b>91,85</b>
Desvio Padrão	0,48	Desvio Padrão	1,15
<b>Resultado da Superfície de resposta</b>	<b>73,80</b>	<b>Resultado da Superfície de resposta</b>	<b>96,70</b>
<b>Diferença entre os dois métodos</b>	<b>3,65</b>	<b>Diferença entre os dois métodos</b>	<b>3,65</b>

A partir dos resultados expostos, considerando os valores médios de WHn + BHn, é possível observar que os resultados da diferença entre o valor modelado pela superfície de resposta e a média dos valores encontrados nos testes de tração, varia dentro do intervalo entre 3,0 e 4,50 MPa. O desvio padrão nas amostras variou entre 0,48 e 2,15. Pode-se afirmar que é uma variação pouco relevante, que não exerce influência sobre os resultados, evidenciando que as superfícies de respostas geradas, através dos modelos e parâmetros utilizados, apresentam boa correlação com os valores encontrados experimentalmente.

#### 4 CONCLUSÕES

O método de superfície de resposta permitiu observar, em uma ampla faixa de valores, diversas zonas de aumento de resistência, possibilitando correlacionar cada resultado desejado com as combinações entre as três variáveis de influência que permitem que esse resultado seja atingido. Para a indústria automotiva, o valor final de escoamento do componente é mais relevante, ou seja, o WHn+BHn. Quanto maior o valor de WHn+BHn, melhor será a resistência do componente às solicitações mecânicas após processo de fabricação. O estudo realizado indica, portanto, que aumentando as deformações obtidas durante a conformação dos painéis maior será o resultado final. Entretanto, em baixas deformações é possível também obter, para o material BH220, bons resultados de acordo com os valores do tratamento térmico, mesmo sendo pequena a influência deste parâmetro. Maiores temperaturas geram maiores resultados de escoamento, por outro lado, isto implica em aumento do custo do processo. Em relação ao tempo de permanência no tratamento térmico o estudo evidenciou que está variável praticamente não causa variação no resultado de escoamento final dentro dos limites testados. Os resultados indicam também que o aço BH220 é um forte candidato na substituição de aços de baixo carbono para estampagem profunda possibilitando o emprego de aços mais resistente sem prejuízo para o processo de estampagem. O emprego de materiais de maior resistência mecânica permite, para um mesmo desempenho, a redução de espessura no material com consequente redução de peso da estrutura e trazendo como resultado a possibilidade de redução de custo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG, à Fiat Automóveis e à PUC-MG pelo suporte técnico e financeiro a este trabalho.

## 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 Chiang, L.-J.; Yang, K.-C.; Hsiao, I.-C. Effects of Annealing Conditions on Bake Hardenability for ULC Steels. Iron and Steel Research & Development Department China Steel Corporation. [S.l.], p. 1-6. 2011.
- 4 Ferreira, F. R. et al. Influência da Temperatura e do tempo de permanência no forno do aço BH220 no resultado de Bake Hardening. Congresso ABM, 2013.
- 5 Borges, R. Aços com envelhecimento controlado: Efeito do modo e da quantidade de pré-deformação. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- 6 Berbenni, S. et al. A Micromechanical Approach to Model the Bake Hardening Effect for Low Carbon Steels. Scripta Materialia, v. 51, p. 304, 2004.
- 7 Rubianes, J. M.; Zimmer, P. Proc. conf. on High Strength Sheet Steels for the Automotive Industry. Iron and Steel Society. Warrendale, p. 111-118. 1994.
- 8 Lora, F. A. Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH180 e BH220 utilizado na indústria automobilística. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- 9 Norma 52814. High-Resistance steel sheets and Strips with yield point of 180 to 300 MPa. Fiat Auto Normazione, 03a ed., Turim, 2004.
- 10 Singh, S. B.; Mohanty, O. N. Bake Hardening in low and medium carbon steels. Indian Institute Of Technology. Kharagpur, p. 14-21. 2012.
- 11 Norma 50113, 2005, "Prova di trazione - Prove di carattere generico", Fiat Auto Normazione, 06ª ed., Turim.
- 12 Norma UNI EN 10002-1, 2004, "Prova di trazione, Método de prova a temperatura ambiente", Fiat Auto Normazione, 01ª ed., Turim.
- 13 Lemos, G. Efeito do recozimento em caixa do passe de encruamento nas propriedades mecânicas de um aço *Bake Hardening*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, pp.14-17,2011.