

ESTUDO DE ENVELHECIMENTO DE AÇOS GALVANIZADOS POR IMERSÃO A QUENTE - PRODUÇÃO DE AÇOS BH180

*Adriano Rogério Kantoviscki ¹
Marcelo Pereira de Oliveira ²
Almir Maia Pereira ³*

Resumo

Buscando contornar as dificuldades de conformação e atendendo aos requisitos exigidos pela indústria automobilística de redução de peso e aumento da capacidade de conformação e resistência estão sendo desenvolvidos os aços laminados a frio e recozidos de alta resistência mecânica e endurecíveis por envelhecimento, denominados de aços Bake-Hardening. Os aços Bake-Hardening são aços que ganham resistência mecânica no processo de pintura após conformados através de mecanismos relacionados com as “Atmosferas de Cottrell”. Estes aços podem ser fabricados de duas formas distintas: utilização de aço baixo carbono e/ou IF semi-estabilizado. Para se atingir o endurecimento por envelhecimento citado acima, fez-se na GalvaSud S.A. um estudo dos efeitos das variáveis de processo e de composição química sobre o este fenômeno de envelhecimento em aços IF semi-estabilizados, sendo que o envelhecimento está sendo estudado através de simulação por equações termodinâmicas e da avaliação da variação das propriedades mecânicas com o tempo.

Palavras-chave: Aços BH IF semi-estabilizados; Indústria automobilística; Variáveis de processo.

- (1) *Engenheiro - Coordenador de Qualidade*
- (2) *Engenheiro de Desenvolvimento Operacional Junior*
- (3) *Engenheiro de Processos – Especialista*

INTRODUÇÃO

A possibilidade de redução de espessura dos painéis estampados internos e externos através da utilização dos aços BH é de grande importância mercadológica para a indústria automobilística⁽¹⁾. Estudos feitos relatam que uma redução de 10% do peso da carroceria resulta numa economia de 6 a 7% no consumo de combustível do automóvel, gerando ganhos na relação peso/potência e diminuição da quantidade de poluentes gerados pela queima do combustível.⁽²⁾ Como boa parte dos automóveis é constituído de aço, o aço tem contribuído grandemente nesse aspecto. Uma das premissas básicas da metalurgia é a de que ao se tentar aumentar a resistência mecânica dos aços ocorre uma perda significativa de capacidade de conformação mecânica principalmente em estampagens mais profundas. Buscando contornar estas dificuldades de conformação, mas atendendo os requisitos necessários de resistência mecânica para redução de peso, foram desenvolvidos os aços laminados a frio e recozidos de alta resistência mecânica endurecíveis por envelhecimento chamados de aços “Bake-hardening”.

AÇOS BAKE HARDENING

Os aços BH são aços de baixo carbono ou IF semi estabilizados (hoje mais utilizados) com níveis de intersticiais (carbono e nitrogênio) controlados, e se caracterizam por possuírem, inicialmente, propriedades mecânicas adequadas às condições de conformação e estampagem, porém, quando submetidos ao aquecimento em temperaturas e tempos similares aos da operação de cura de pintura da carroceria de automóveis utilizados na Indústria Automobilística, estes aços adquirem propriedades mecânicas similares à dos aços de alta resistência.

Toda a tecnologia de produção de aços “Bake-Hardening” consiste no controle da quantidade de carbono em solução sólida para o estabelecimento do equilíbrio ideal entre a capacidade de endurecimento durante a pintura e a ocorrência de envelhecimento à temperatura ambiente antes da conformação da peça, que leva ao aparecimento de indesejáveis linhas de distensão.

O aumento da resistência mecânica dos aços BH ocorre através do envelhecimento por deformação (strain aging), que é causada por difusão e aglomeração de carbono e nitrogênio em solução sólida nas discordâncias geradas pela conformação na prensa e/ou precipitação nas mesmas (atmosferas de Cottrell).

Pode-se medir o chamado índice de “BH” (ΔBH) de diversas formas, dependendo das normas de especificação utilizadas. Uma forma comum de se medir consiste em pré-deformar um corpo-de-prova de tração até 2% de deformação plástica linear, envelhecer o corpo de prova a 170 °C por 30 minutos e re-ensaiar o material até o rompimento. O aspecto da curva tensão-deformação assim obtido é apresentado na Figura 1, abaixo. Nesta figura o ΔWH representa o aumento do limite de escoamento devido ao encruamento (provocado pela pré-deformação de 2%) e o ΔBH representa o ganho de limite de escoamento pelo envelhecimento. Os valores de ΔBH normalmente obtidos para aços BH se situam na faixa de 30 a 50 MPa⁽³⁾.

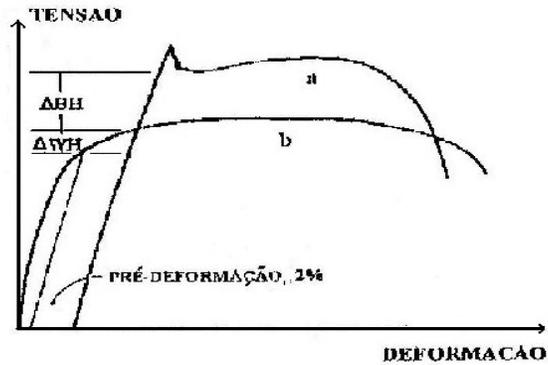


Figura 1. Curva tensão-deformação com (a) e sem (b) características de envelhecimento.

Para proporcionar a fabricação de chapas com boas propriedades de endurecimento pela cura da pintura e contar com um baixo potencial de envelhecimento à temperatura ambiente, torna-se necessário controlar os teores de C e N em solução sólida, para mantê-los a níveis adequados que satisfaçam esses dois requisitos. Logo, para que o fenômeno de “Bake-Hardening” ocorra é necessário à presença de certa quantidade de carbono em solução na matriz ferrítica uma vez que o nitrogênio em geral se encontra combinado com o alumínio (Al) na forma de AlN. Este mecanismo é citado na Figura 2, abaixo.

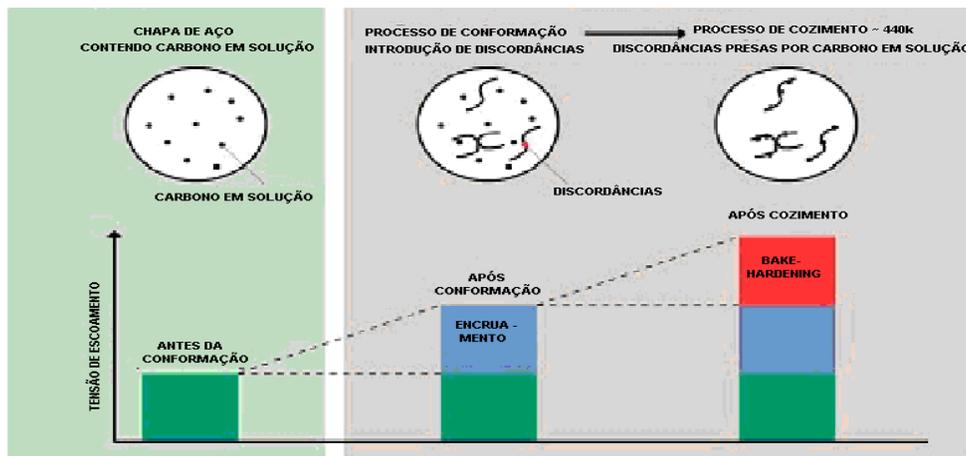


Figura 2. Comportamento mecânico e microestrutural dos aços BH, antes do processo de deformação e após o processo de cozimento.

Existem vários fatores que influenciam no valor do índice de Bake-Hardening. Entre eles pode-se citar:

a) Efeito dos microligantes nos aços IF:

Os aços IF são produzidos com adição de Ti, com adição de Nb ou com adições combinadas entre eles. É bem conhecido que o Ti estabiliza o C reduzindo-o a TiC, conduzindo a uma melhora significativa na estampagem profunda. Se a dissolução de TiC ocorre, índices de BH suficientes podem ser esperados nos aços ao Ti. Para esse propósito, o efeito da temperatura de recozimento no valor de BH e de r foram investigados variando a relação atômica Ti^*/C em aços extra-baixo carbono. Definiu-se $Ti^{*(4)}$ (Equação 1) como a quantidade de Ti após subtração deste combinado com N e S do total de Ti ligado. Para comparação, aços ao Nb foram também estudados nas mesmas condições experimentais.

$$Ti^* = Ti - 3,4N - 1,5S \quad (\text{Equação 1})$$

Como é mostrado na figura 3 abaixo, se a relação atômica é muito menor que 1 (um), o aço exibe um alto índice de BH e, é esperada, baixa estampabilidade, possuindo o mesmo resultado mostrado no aço ao Nb. Quando a relação Ti^*/C é aproximadamente 1 (um), incrementos de temperatura de recozimento produzem um aumento no índice de BH. Este resultado indica que aços ao Ti podem também servir como aços BH de estampagem profunda quando sua composição for cuidadosamente controlada. Contudo, o valor da relação Ti^*/C é fortemente influenciada por mudanças na proporção de N ou S, e também na de Ti ou C. Para que haja um controle da relação Ti^*/C em torno de 1 (um), a composição química precisa ser cuidadosamente ajustada através dos estágios de fabricação do aço.

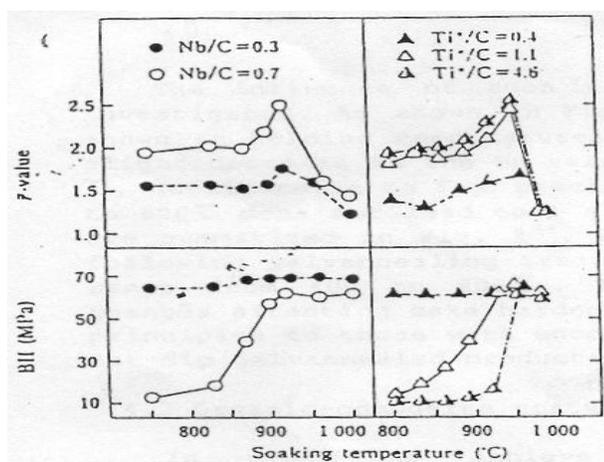


Figura 3. Efeito da temperatura de encharque no índice de BH e no valor médio de r em aços extra-baixo C ligados ao Nb e ao Ti.

SUNG⁽⁵⁾ (Figura 4, abaixo) realizou uma experiência em aços ao Ti galvanizados, onde o índice de BH foi descrito pelo excesso de carbono C^* , ou seja, a quantidade de carbono não estequiometricamente combinado com Ti, conforme equação 3 abaixo.

$$C^* = (C - Ti^*)/4 \quad \text{Para } Ti^* \geq 0 \quad (\text{Equação 2}) \quad \text{e} \quad C^* = C \quad \text{Para } Ti^* < 0 \quad (\text{Equação 3})$$

A relação entre C^* e índice de BH mostrou um certo grau de dispersão, porém indicou que o índice de BH aumenta quando o C^* aumenta conforme Figura 4, abaixo.

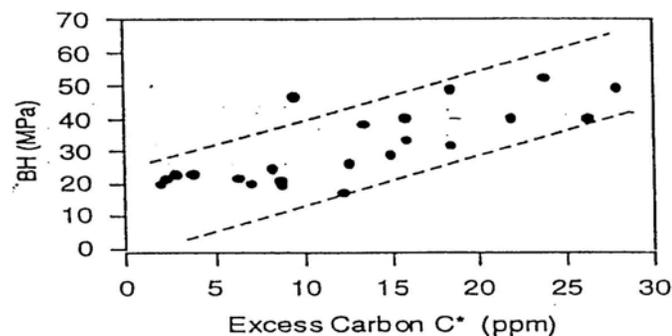


Figura 4. Efeito do excesso de carbono no índice BH de aços galvanizados.

O excesso de carbono C^* é um parâmetro calculado e não necessariamente uma medida de carbono em solução, a verdade determinante no índice de BH. SUNG⁽⁵⁾ verificou que a melhor faixa de C^* foi entre 15 e 30 ppm. Isto pode indicar

que uma certa quantidade de carbono em excesso está em solução ou precipitados na forma partículas não sendo associados ao índice de BH.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho foram utilizados aços IF semi-estabilizados galvanizados (BZ) grau 4073 (CSN) por imersão a quente de dimensões e composições químicas mostrada na Tabela 1 e 2 citadas abaixo.

Buscou-se avaliar o efeito de algumas variáveis de processo e de composição química no índice de BH. Para a realização do estudo de envelhecimento foram utilizados para o processamento dos materiais, a linha de galvanização contínua da GalvaSud S.A. e para a execução de experiências e acompanhamento dos resultados, o laboratório de controle de qualidade.

Para a realização dos ensaios de índice de BH foram utilizadas uma máquina de tração INSTRON modelo 5582 com capacidade de 100 KN e um extensômetro axial – $L_0 = 50\text{mm}$.

As dimensões, composições químicas e variáveis de processamento encontram-se respectivamente nas Tabelas 1 e 2 citadas abaixo.

Tabela 1. Composições Químicas estudadas

LOTE	DIMENSÃO	C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	N	Ti*	Ti*/C	C*
A	0,67 x 1329	0,002	0,2	0,01	0,01	0,06	0,03	0,021	0,004	-0,003	-1,550	0,003
B	0,67 x 1329	0,002	0,2	0,01	0,01	0,06	0,03	0,021	0,004	-0,003	-1,550	0,003
C	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,008	0,091	0,035	0,019	0,0041	-0,007	-2,669	0,004
D	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,007	0,055	0,042	0,022	0,004	-0,002	-0,808	0,003
E	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,008	0,091	0,035	0,019	0,0041	-0,007	-2,669	0,004
F	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,008	0,091	0,035	0,019	0,0041	-0,007	-2,669	0,004
G	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,008	0,091	0,035	0,019	0,0041	-0,007	-2,669	0,004
H	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,007	0,055	0,042	0,022	0,004	-0,002	-0,808	0,003
I	0,67 x 1329	0,002	0,2	0,01	0,01	0,06	0,03	0,021	0,004	-0,003	-1,550	0,003
J	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,007	0,055	0,042	0,022	0,004	-0,002	-0,808	0,003
K	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,007	0,055	0,042	0,022	0,004	-0,002	-0,808	0,003
L	0,67 x 1329	0,0026	0,22	0,009	0,008	0,091	0,035	0,019	0,0041	-0,007	-2,669	0,004
M	0,67 x 1329	0,003	0,2	0,01	0,01	0,06	0,04	0,022	0,004	-0,002	-0,808	0,003
N	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
O	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
P	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
Q	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
R	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
S	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
T	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
U	0,67 x 1329	0,0029	0,23	0,012	0,009	0,056	0,056	0,021	0,0027	-0,002	-0,579	0,003
V	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
W	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
X	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
Y	0,67 x 1250	0,0022	0,23	0,011	0,007	0,052	0,031	0,019	0,0019	0,002	0,927	0,002
Z	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
AB	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
AC	0,67 x 1250	0,0022	0,23	0,011	0,007	0,052	0,031	0,019	0,0019	0,002	0,927	0,002
AD	0,67 x 1250	0,0016	0,23	0,011	0,008	0,05	0,034	0,025	0,0026	0,004	2,600	0,001
AE	0,67 x 1250	0,0022	0,23	0,011	0,007	0,052	0,031	0,019	0,0019	0,002	0,927	0,002
AF	0,67 x 1250	0,0022	0,23	0,011	0,007	0,052	0,031	0,019	0,0019	0,002	0,927	0,002
AG	0,67 x 1250	0,0022	0,23	0,011	0,007	0,052	0,031	0,019	0,0019	0,002	0,927	0,002

Tabela 2. Variáveis de Processos e Propriedades Mecânicas obtidas

LOTE	DIMEN. (mm)	ENCHARQUE (°C)	TEMP. RESF. CONTR. (°C)	REDUÇÃO		VEL. (m/s)	Tx. RESF. (°C/s)	LE (MPa) 180 / 240	LR (MPa) 300(min)	AI (%) 34(mín)	BH 33 (mín)
				%							
				LE	EL						
A	0,67 x 1329	842	495	1,6	0	120	17,4	189	309	43	40
B	0,67 x 1250	835	500	1,6	0	120	33,5	187	305	44	33
C	0,67 x 1250	834	480	1,6	0	120	35,4	192	311	42	37
D	0,67 x 1250	846	475	1,6	0	120	37,1	203	320	41	48
E	0,67 x 1250	848	473	1,6	0	120	37,5	193	310	40	38
F	0,67 x 1250	845	472	1,6	0	120	37,3	188	306	45	37
G	0,67 x 1250	845	475	1,6	0	120	37	190	306	43	37
H	0,67 x 1250	847	472	1,6	0	120	37,5	195	309	41	43
I	0,67 x 1250	819	472	1,6	0	120	37,5	195	313	46	47
J	0,67 x 1250	846	472	1,6	0	120	37,4	191	309	46	46
K	0,67 x 1250	850	495	1,6	0	120	17,8	197	313	40	50
L	0,67 x 1250	825	495	1,6	0	120	16,5	198	314	43	46
M	0,67 x 1329	823	480	1,4	0	120	34,3	197	313	41	61
N	0,67 x 1250	823	480	1,2	0	120	34,4	197	314	44	55
O	0,67 x 1250	820	475	1	0	120	34,5	190	309	45	51
P	0,67 x 1250	821	475	0,8	0	120	34,6	183	309	43	63
Q	0,67 x 1250	821	475	1	0	120	34,6	189	312	41	44
R	0,67 x 1250	821	475	1,3	0	120	34,7	195	316	42	63
S	0,67 x 1250	821	475	1	0	120	34,6	194	315	40	46
T	0,67 x 1250	821	473	1	0	120	34,8	181	308	48	56
U	0,67 x 1250	821	470	1	0	120	34,8	197	319	43	59
V	0,67 x 1250	822	472	1,2	0	120	35	174	300	51	20
W	0,67 x 1250	821	470	1,2	0	120	35,1	172	299	50	16
X	0,67 x 1250	823	472	1,2	0	120	35,1	176	301	47	25
Y	0,67 x 1250	824	475	1,2	0	120	34,9	186	311	43	28
Z	0,67 x 1329	821	471	1,2	0	120	35	169	295	44	14
AB	0,67 x 1250	822	471	1,2	0	120	35,1	169	297	50	14
AC	0,67 x 1250	821	468	1,2	0	120	35,3	182	308	45	30
AD	0,67 x 1250	813	497	1,3	0	120	31,6	176	302	44	11
AE	0,67 x 1250	814	466	1,3	0	120	34,8	190	312	46	28
AF	0,67 x 1250	812	464	1,3	0	120	34,8	195	314	43	30
AG	0,67 x 1250	825	512	1,3	0	120	31,3	190	316	45	30

Variáveis de Processo Analisadas:

1) Efeito da Temperatura de Recozimento: O efeito do índice de BH em aços IF foi investigado alterando os ciclos térmicos de recozimento. Uma maior temperatura de recozimento (850°C) promove uma melhor dissolução de precipitados. Devido ao fenômeno de crescimento de grãos ferríticos não transformados a esta temperatura, ocorre a intensificação da textura {111}, aumentando o coeficiente de anisotropia e trazendo benefícios para as características de conformabilidade dos materiais analisados.

Os ciclos térmicos utilizados na experiência encontram-se na tabela 3:

Tabela 3. Ciclos térmicos de recozimento

Ciclo	Aquecimento e encharque (°C)	Resf. Rápido (°C)
4	820 +/- 30	470 a 520
6	850 +/-10	470 a 520

2) Efeito das condições de resfriamento após encharque: A utilização de altas taxas de resfriamento logo após encharque foi uma das modificações introduzidas nos ciclos de recozimento contínuo convencional para permitir o controle do nível de carbono em solução sólida no produto final. Com elevadas taxas de resfriamento a precipitação de carbonetos durante o resfriamento é minimizada, criando-se uma

condição de supersaturação de carbono. A condição de resfriamento, rápida ou forçado (acima de 30 °C/s), e conseqüentemente a quantidade de carbono em solução são de grande importância para a obtenção de índices de BH satisfatórios.

3) Efeito da redução de alongamento aplicado no laminador de encruamento: Após o recozimento o material é submetido a um “passe de encruamento” para acerto de forma e eliminar o patamar de escoamento definido. Com este procedimento o material fica mais duro (elevam-se à dureza e o limite de escoamento e diminui o alongamento total) e a resistência ao envelhecimento aumenta. Outros processos como estiramento e desempenos por rolos (“leveller”) melhoram a forma, mas são nocivos à resistência ao envelhecimento pela geração de deformações não uniformes⁽⁶⁾.

4) Efeito da composição química no índice de BH:

Devido ao fato de que todos os aços IF utilizados serem estabilizados ao titânio, buscou-se este trabalho avaliar o efeito da composição química, mais especificamente da relação atômica Ti*/C, do teor de enxofre e dos valores de C* no índice de BH.

Devido ao efeito do processo de envelhecimento ser de difícil controle e pouco previsível decidiu-se então elaborar um tratamento térmico adequado que deveria ser capaz de prever o comportamento das propriedades mecânicas dos materiais com o passar do tempo. Recorreu-se a equação 4⁽⁷⁾ para o cálculo dos coeficientes de difusão do carbono no Fe- α na temperatura ambiente (temperatura de estoque do material) e a 100°C (temperatura de encharque de fácil controle e homogeneidade quando se utiliza água fervente ($\approx 100^\circ\text{C}$)).

$$D = D_0 \text{EXP}\left(\frac{-Q}{RT}\right) \text{ (Equação 4)}$$

$$(D_1 t_1)_{T_1} = (D_2 t_2)_{T_2} \text{ (Equação 5)}$$

Assim, utilizou-se a relação mostrada da equação 5⁽⁷⁾ estipulando-se um tempo de envelhecimento a temperatura ambiente e o seu respectivo tempo de ensaio à temperatura de 100°C. Como exemplo, é necessário um tempo de ensaio de aproximadamente 913 segundos (15 minutos) para simular 1 semana de envelhecimento a temperatura ambiente. Pode-se estender assim este ensaio, para os demais tempos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- a) Efeito das mudanças de ciclos térmicos de recozimento e condições de resfriamento após encharque:

O efeito das mudanças de ciclos térmicos de recozimento (ciclos 4 e 6) aliado às condições de resfriamento (normal $\approx 20^\circ\text{C/s}$ N e forçado $\approx 30^\circ\text{C/s}$ R) após encharque não apresentaram diferenças significativas no perfil de envelhecimento conforme Figuras 5 e 6 a seguir e no índice de BH conforme Figura 7, a seguir.

Era esperado que elevadas taxas de resfriamento e maiores temperaturas utilizadas no recozimento implicassem em maiores taxas de envelhecimento a temperatura ambiente (mostrado nos gráficos de limite de escoamento e alongamento total) todavia, os valores de índice de BH seriam mais elevados.

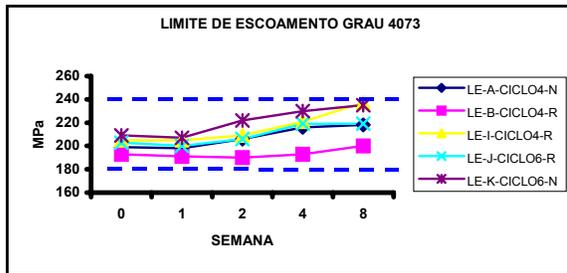


Figura 5. Gráfico da evolução do limite de escoamento em relação ao tempo.

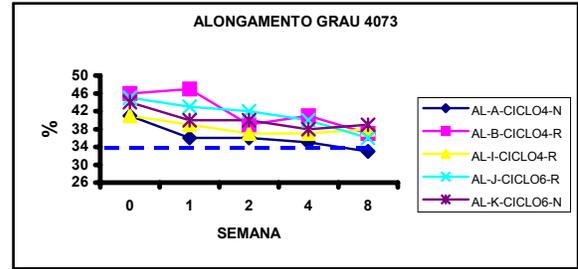


Figura 6. Gráfico da evolução do alongamento total em relação ao tempo.

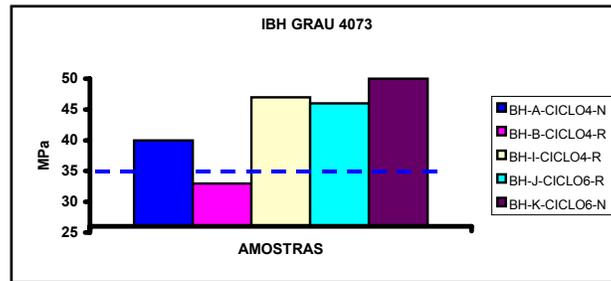


Figura 7. Gráfico do índice de BH das amostras analisadas

b) Efeito da redução de alongamento aplicado no laminador de encruamento:

O efeito da redução de alongamento no laminador de encruamento citado acima foi comparado, conforme Figura 8 e 9, a seguir. O perfil de envelhecimento obtido através da simulação foi o mesmo para estas amostras e o índice de BH também não sofreu grandes alterações conforme Figura 10, a seguir.

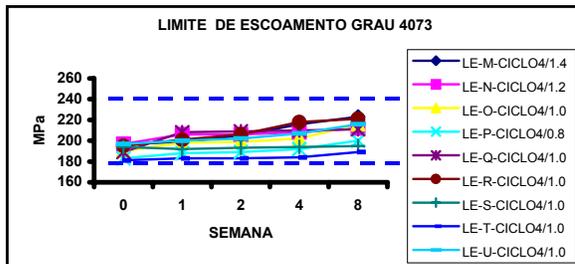


Figura 8. Gráfico da evolução do limite de escoamento em relação ao tempo

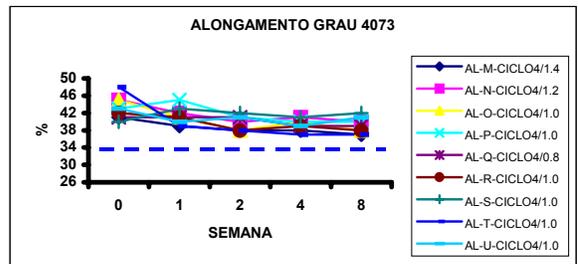


Figura 9. Gráfico da evolução do alongamento total em relação ao tempo.

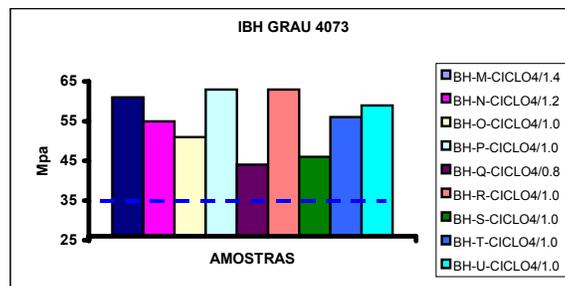


Figura 10. Gráfico do índice de BH das amostras analisadas

Era esperado nessa experiência que maiores taxas de alongamento resultassem em diferentes perfis de envelhecimento a temperatura ambiente e conseqüentemente diferentes valores de índice de BH.

c) Efeito da Composição Química:

Todos os materiais IF analisados foram estabilizados ao Ti, com isso recorreremos à equação 1 para o cálculo da relação atômica Ti^*/C . Segundo as composições químicas, os valores encontrados de Ti^*/C são mostrados na tabela 1, citada acima.

As amostras que possuíam a relação $Ti^*/C > 0$ (Ti elevado) não apresentaram evoluções significativas no perfil de envelhecimento conforme Figura 11 e 12 a seguir, em contrapartida o índice de BH ficou bem abaixo do esperado, Figura 13, a seguir.

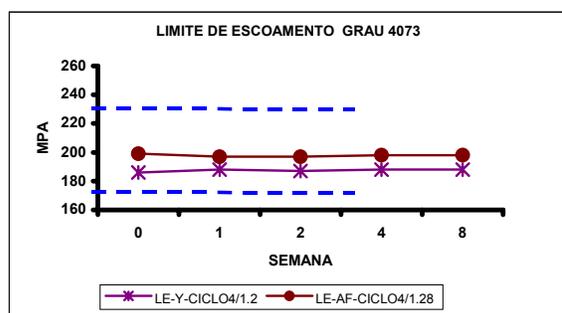


Figura 11. Gráfico da evolução do limite de escoamento em relação ao tempo.

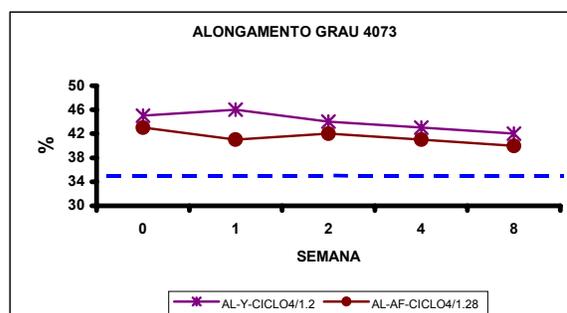


Figura 12. Gráfico da evolução do alongamento total em relação ao tempo.

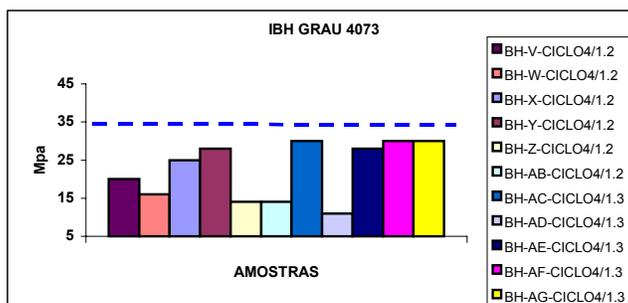


Figura 13. Gráfico do índice de BH das amostras analisadas

Analisando o carbono em excesso (C^*), encontramos por meio das equações (2) e (3) valores entre 10 a 40 ppm, correspondendo a experiência realizada por SUNG⁽⁵⁾ (Figura 4), refletindo as diferenças encontradas nos valores de IBH (figuras 10 e 13).

CONCLUSÃO

Todos os materiais foram analisados com relação $Ti^*/C < 0$ e independentemente das condições de processamento apresentaram o fenômeno de

envelhecimento a temperatura ambiente, associados a redução do alongamento, aumento do limite de escoamento e de resistência.

A variação da temperatura de recozimento, a utilização de altas taxas de resfriamento e a mudança na taxa de alongamento no laminador de encruamento, não resultou em diferenças significativas no perfil de envelhecimento e no índice de BH após a realização da simulação de envelhecimento;

Todos os materiais que apresentaram a relação $T_i^*/C > 0$ não apresentaram o fenômeno de envelhecimento, porém não apresentaram bons resultados quando analisado o IBH;

Todos os materiais analisados apresentaram C^* variando de 10 a 40ppm, o que acarretou em diferenças no IBH;

Mesmo sujeito ao fenômeno de envelhecimento a temperatura ambiente, em nenhum momento foram extrapolados os limites de especificação relativos a limite de escoamento e alongamento total.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 **SCHAEFFER, L.**; Novos desenvolvimentos em conformação mecânica com ênfase em chapas metálicas na indústria automobilística. Simulação de Processo de conformação Mecânica. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa/novosdesenvolvimentos>. Acesso em: 04/2003;
- 2 **BRITO, R.; MARCELO, C.**; Desenvolvimento de aço laminado a frio de alta resistência mecânica endurecível por envelhecimento ("Bake –Hardening"). Biblioteca on-line da CSN – Index M01588F.
- 3 **BRITO, R. et al.** Metodologia de avaliação do desempenho de aços endurecíveis por envelhecimento (Bake-Hardening) para uso na indústria automobilística. Biblioteca on-line da CSN, Index M01571F.
- 4 **SAKATA, K.; SATOH, S.** Metallurgical Principles and their Applications for Producing extra-low Carbon IF Steels with deep Drawability and Bake Hardenability. Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corporation: Chiba 260, Japan, Pág 273.
- 5 **SUNG, G.**; Factors Affecting the Bake Hardenability of Low Carbon Steels. BHP Steel-Sheet and Coil Products Division: Research and Technology Centre. Port Kembla NSW 2505, Australia. Pág. 275;
- 6 **USIMINAS**, Siderbras. Conformação na Prensa – Fascículo de Informação Técnica. Livros 10.052, est. 31p.d, pág. 50
- 7 **CALLISTER, W. D. JR.**; Materials Science and Engineering: An Introduction. Department of Metallurgical Engineering The University of Utah. Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc. Pág 35-39. – Edição 2000.