

CARACTERIZAÇÃO DO ENVELHECIMENTO NOS AÇOS 180 E 220 BAKE HARDENING COM REVESTIMENTOS GALVANIZADO E GALVANNEALED¹

Felipe Maia Picinin²
Fabio Moreira da Silva Dias³
Fabiano Augusto Vallim Fonseca⁴
Marcos Flávio de Campos⁵

Resumo

Em função da necessidade da indústria automobilística de produzir automóveis mais leves objetivando a redução do consumo de combustível e mantendo os requisitos de segurança, levaram a utilização de novos materiais em substituição ao aço. O setor siderúrgico elaborou um programa denominado ULSAB (*Ultralight Steel Auto Body*) a fim de aumentar a utilização e desenvolver novos aços das classes HSS (*high strength steel*) e AHSS (*Advanced High Strength Steel*) com propriedades semelhantes ou superiores aos sucedâneos. Desta forma, a utilização de aços destas classes vem aumentando exponencialmente no setor, tanto para peças estruturais como para painéis, destacando a utilização dos aços *Bake Hardening*. O objetivo desse trabalho foi apresentar a metodologia empregada no estudo do envelhecimento dos aços 180 e 220 BH (*Bake Hardening*), com revestimento galvanizado e *galvannealed*. Este trabalho comparou dois testes de envelhecimento, um em condição natural e outro artificial. Na condição natural, os corpos de prova foram deixados em temperatura ambiente durante o período de 6 meses e na condição artificial, foram avaliadas as variações de tempo e temperatura. Portanto, o presente trabalho expõe toda metodologia utilizada na atingir o objetivo proposto. Incluído nesta abordagem, foram apresentadas todas as técnicas de verificação empregadas na avaliação dos resultados obtidos, e através da comparação destes, foi verificado o efeito do mecanismo de envelhecimento nos aços *Bake Hardening* para as classe 180 e 220 MPa com revestimentos galvanizado e *galvannealed*. Entre as técnicas mencionadas, foram realizados ensaios de tração uniaxial para avaliar as propriedades mecânicas, ensaios metalográficos para caracterização da microestrutura e análise química para determinação a composição química do aço.

Palavras-chave: Envelhecimento; Aços *Bake Hardening*; Galvanizado; *Galvannealed*.

CHARACTERISATION OF THE AGING BEHAVIOUR OF FOUR DIFFERENT NB-TI SEMI- STABILISED BAKE HARDENING STEELS

Abstract

Due to the need of the automotive industry to produce lighter cars aimed at reducing fuel consumption and keeping the requirements of security, led to new materials to replace the old ones. The steel industry has developed a program called ULSAB to increase the use and develop new classes of steels with HSS and AHSS with similar properties or superior to substitutes. Thus, the use of that type of steels has increased exponentially in the industry, both for structural parts and for panels, highlighting the use of *Bake Hardening* steels. The aim of this paper is to present the methodology used in the study of aging of steels 180 and 220 BH (*Bake Hardening*), galvanized and *galvannealed* coating. This study compared two aging tests, in a natural condition and the other artificial. In natural condition, the test pieces were left at room temperature during the period of 6 months and in the artificial condition, were evaluated the time and temperature variations. Therefore, this paper exposes the entire methodology used in reach the proposed objective. Included in this approach were presented all the verification techniques used to evaluate the results obtained, and by comparing these, were observed the effect of aging mechanism in *Bake Hardening* Steel for Class 180 and 220 MPa with galvanized and *galvannealed* coatings. Among the techniques mentioned were performed uniaxial tensile tests to evaluate the mechanical properties, metallographic tests to characterize the microstructure and chemical analysis to determine the chemical composition of steel.

Key words: Aging; *Bake Hardening* Steel; Galvanized; *Galvannealed*.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Metalúrgico. Gerência Desenvolv. Mercado, Votorantim Metais Zinco – VMZ, São Paulo, SP

³ Eng. Metalúrgico. Gerência de Desenvolv. Produtos Galvanizados e Pré-Pintados, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Volta Redonda, RJ

⁴ Eng. Metalúrgico, Gerência de Planejamento e Qualidade da Galvasud, CSN, Porto Real, RJ

⁵ Prof. Adjunto, Curso de Pós-graduação em Eng. Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense

1 INTRODUÇÃO

Na indústria automobilística, o aço tem sido o principal material utilizado para fabricação de carrocerias. Além de ser um material facilmente reciclável, o aço apresenta elevada conformabilidade, boa resistência estrutural e custo razoável. O uso de chapas de aço galvanizado no setor automotivo brasileiro aumentou nos últimos anos, passando de uma média de 20% em 1996 para 65% em 2007, devido à necessidade de aumentar a durabilidade dos veículos, tornando-os ainda mais resistentes à corrosão. A capacidade brasileira de produção de aços revestidos com zinco é apresentada na figura 1 e hoje está dividida entre três grandes produtores (Figura 1).

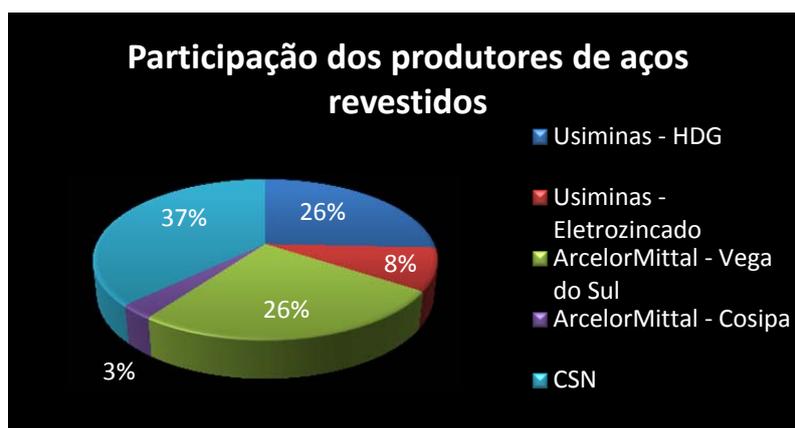


Figura 1 – Participação dos principais produtores de chapas revestidas com zinco no mercado brasileiro.

No Brasil o setor automotivo também é o grande responsável pela demanda de chapas revestidas, consumindo em 2005: 785 mil t, em 2006: 894 mil t e em 2007: 1.069 mil t. A participação no mercado interno dos principais usuários nacionais de chapas revestidas com zinco pode ser vista na Figura 1. A expectativa é de um aumento de demanda uma vez que a produção de veículos também é crescente.

A excelente resistência à corrosão em diferentes ambientes, a facilidade de ligação química com o ferro e a capacidade de protegê-lo galvanicamente em pequenas discontinuidades do revestimento tornaram o zinco um dos metais mais utilizados como revestimento para proteção do aço à corrosão atmosférica. Com o desenvolvimento tecnológico dos processos de galvanização, houve uma melhora considerável na qualidade dos produtos revestidos, aumentando sua utilização em peças que sofrem maior conformação e/ou painéis expostos.

Dentre esses novos desenvolvimentos, destacam-se os aços *Bake Hardening* (BH), os quais se caracterizam por uma microestrutura constituída por 100% de ferrita e uma boa relação entre resistência mecânica e ductilidade obtida por meio de um acréscimo no limite de escoamento (aproximadamente 40 MPa) durante o tratamento de pintura a uma temperatura de aproximadamente 170°C, com ressurgimento do patamar de escoamento definido. Essas classes de aço BH destinam-se a aplicações em peças expostas, com uma resistência à indentação superior à de aços convencionais (aços ao C-Mn, *Interstitial Free*) oferecendo, assim, um potencial de redução de peso.

2 AÇOS BAKE HARDENING

O principal consumidor dos aços galvanizados no país é a indústria automobilística. Estes devem apresentar excelente conformabilidade e boa resistência mecânica.

Os dois principais objetivos da indústria automobilística são a redução do peso do automóvel e melhoria na segurança. Para consegui-los, as maiorias dos painéis que compõem as carrocerias dos automóvel são preferencialmente feitos de materiais de

maior resistência aliados à boa conformabilidade.^(1,2) A redução da rigidez do painel e da susceptibilidade à indentação é um desafio da redução de espessura. Com uso de aços de maior resistência é possível obter redução na espessura sem que haja detrimento da resistência à indentação. Os pesquisadores descobriram que os aços *Bake Hardening* são uma excelente solução para o problema acima.

Os aços *Bake Hardening* são uma nova classe de produtos e apresentam as propriedades citadas acima. Estes aços apresentam uma boa ductilidade (baixo limite de escoamento para uma boa conformação) durante o processo de estampagem e também um moderado incremento em sua resistência devido ao processo de cura da pintura o que contribui para o aumento da resistência a indentação.

O sucesso da aplicação dos aços *Bake Hardening* em painéis expostos levou ao significativo aumento do uso destes aços para todos os painéis exteriores de difícil conformação. Recentemente, as indústrias automobilísticas estão requerendo os aços *Bake Hardening* para reduzir o peso das carrocerias, e para aplicar estes materiais em determinadas peças estruturais para melhorar a resistência a compressão das carrocerias. Como a demanda para a redução do peso é crescente, os pesquisadores vem trabalhando mais no desenvolvimento dos aços ULC com alta conformabilidade e boa resistência mecânica.

2.1 Efeito *Bake Hardening*

Na indústria automobilística, a complexidade do projeto e as exigências de fabricação aumentaram constantemente nos últimos anos. Aspectos tais como a segurança são tão importantes quanto o peso, a qualidade e o custo. Por isso, o projeto de automóveis no futuro será cada vez mais influenciado pelo *mix* de materiais para otimizar estes aspectos. A quantidade de aços diferentes empregados nas carrocerias dos veículos dependerá dos desenvolvimentos de novas classes de aços com suas propriedades melhoradas. Para os painéis expostos, a questão chave é o desenvolvimento de aços de maior resistência aliado a excelente conformabilidade, aumentando a resistência à indentação e reduzindo o peso pela redução de espessura.

Os aços *Bake Hardening* ultra baixo carbono têm inicialmente baixa resistência mecânica e boa conformabilidade, sendo apropriados para as operações de conformações complexas encontradas na fabricação de painéis expostos. Após o processo de estampagem e posterior cura da pintura, o aço apresentará um incremento de resistência mecânica, obtido pela combinação do efeito de encruamento (*Work Hardening*) associado ao processo de conformação mecânica das peças e pelo envelhecimento (efeito BH) durante a cura da pintura, resultando no retorno do patamar de escoamento definido acompanhado por um aumento na resistência mecânica. A Figura 2 ilustra esse mecanismo de aumento de resistência (limite de escoamento).

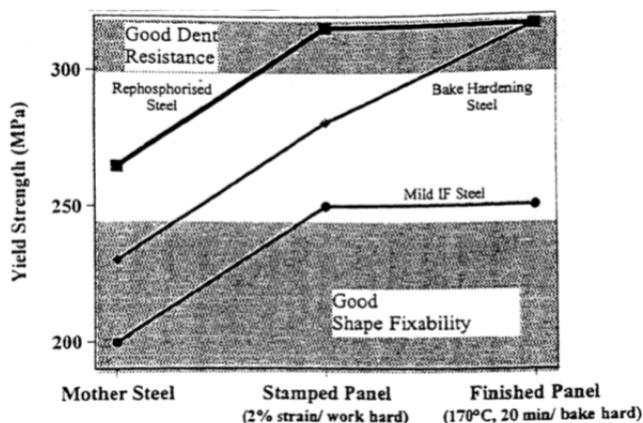


Figura 2 – Aumento da resistência mecânica nos aços BH comparados ao aços IF de alta conformabilidade e Refosforado de Alta Resistência. Pode-se verificar no aço BH a combinação de boa conformabilidade e resistência mecânica, e ainda resistência à indentação⁽¹⁾

A vantagem da utilização dos aços *Bake Hardening* ou, com efeito *Bake Hardening*, que estes aços apresentam, corresponde, na habilidade desse material endurecer durante o processo de cura da pintura. Ou seja, tem-se um aço com boa conformabilidade, e controlando a quantidade do soluto carbono ainda pode-se otimizar o efeito de endurecimento, na cura da pintura, após a conformação. Durante a etapa de estampagem, ocorre o aumento da densidade de discordâncias que promove o efeito de encruamento.

No processo de cura da pintura, o aço BH apresenta um endurecimento. Esse aumento na resistência ocorre devido ao processo de fabricação desse material combinado com sua composição química e microestrutura. A quantidade de carbono nesses aços em solução sólida intersticial é muito baixa, apresentando-se dissolvido na ferrita. Durante a pintura a 170°C, o carbono se difunde, favorecido pela maior energia fornecida, até as discordâncias recém geradas pelo processo de estampagem onde funciona como barreiras ao movimento destas, aumentando assim a resistência do material.

A resistência a pequenos danos (mossas) causados por leves colisões, pelo choque de pedras e por outros detritos durante a movimentação do veículo é um importante fator considerado nos atuais projetos de automóveis, justificando assim a aplicação dos aços BH por oferecer uma maior resistência à indentação tanto estática quanto dinâmica, devido ao seu aumento de resistência após a cura da pintura.^(1,2)

Os aços de alta resistência hoje constituem um total de 30-40% do peso da carroceria do carro.

2.2 Teste *Bake Hardening*

A mudança das propriedades do material pelo tratamento térmico do processo de cura da pintura, especialmente o aumento do limite de escoamento, é denominado como o efeito *Bake Hardening*.

O ensaio para avaliar o efeito *Bake Hardening* é realizado da seguinte forma: O corpo de prova é levado a máquina de tração uniaxial onde ele será submetido a uma pré-deformação de 2%, após esta deformação, o ensaio é interrompido, em seguida existem duas formas de avaliar esse efeito, conforme a indústria de aço ou como a indústria automobilística.

De acordo com a indústria do aço, essas amostras após a pré-deformação, são levadas a um forno, permanecendo durante o tempo de 20 minutos à temperatura constante de 170°C. O ensaio realizado pela indústria automobilística consiste em se fazer o mesmo procedimento, porém antes dele ser levado ao forno de aquecimento, ele é fosfatizado e pintado, simulando assim, o processo de cura da pintura.⁽¹⁻⁴⁾

Depois da pré-deformação, os corpos-de-prova são envelhecidos em uma estufa a 170°C por 20 minutos a fim de simular a cura da pintura. Depois de concluído o envelhecimento artificial, os corpos-de-prova são retirados da estufa e espalhados para resfriarem ao ar. Após os corpos de prova chegarem a temperatura ambiente (25°C), estes são submetido ao ensaio de tração uniaxial para determinação de suas propriedades mecânicas, como o limite de escoamento e resistência, após serem envelhecidos.

O método de se medir o aumento de resistência mecânica do aço devido ao efeito *Bake Hardening* (BH), consistem em subtrair o limite de escoamento obtido para o aço após o tratamento em estufa a 170°C por 20 minutos do menor patamar do escoamento do material, *Work Hardening* (WH), sendo assim, BH – WH é igual ao aumento de resistência mecânica. A figura 3 mostra esquematicamente o método de obtenção dos efeitos BH e WH para um aço pré-deformado 2%.

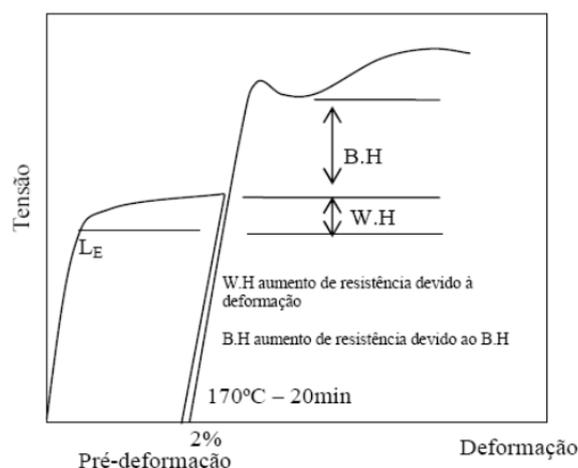


Figura 3 - Método de obtenção dos efeitos *Bake Hardening* (BH) e *Work Hardening* (WH) para um aço pré-deformado 2%.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Para a realização do estudo proposto no presente trabalho, utilizaram-se amostras de quatro aços BH usualmente utilizadas para aplicações em peças internas e expostas, os quais são 180 BH galvanizado, 180 BH *galvannealed*, 220 BH galvanizado e 220 BH *galvannealed* respectivamente, onde foi elaborado um projeto de desenvolvimento do estudo do envelhecimento desses aços. Todos estes são produzidos pela CSN e galvanizados na CSN Porto Real. A diferença de composição química entre os aços 180 BH e 220 BH reside no fato de que no primeiro os teores de manganês e silício são menores do que no segundo

As faixas de composição química de cada aço BH analisado neste trabalho estão apresentadas através da Tabela 1.

3.1 Metodologia

Tabela 1- Composição químicos dos aços BH utilizados na elaboração deste trabalho (% em peso)

Classe de Aço	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Nb	% Ti	% B	% Al	% N
180 BH GI	< 0,0027	< 0,4	< 0,04	< 0,02	< 0,03	< 0,020	< 0,02	< 0,007	< 0,07	< 0,007
180 BH GA	< 0,0027	< 0,4	< 0,04	< 0,02	< 0,03	< 0,020	< 0,02	< 0,007	< 0,07	< 0,007
220 BH GI	< 0,0029	< 0,7	< 0,07	< 0,02	< 0,04	< 0,025	< 0,02	< 0,007	< 0,07	< 0,007
220 BH GA	< 0,0029	< 0,7	< 0,07	< 0,02	< 0,04	< 0,025	< 0,02	< 0,007	< 0,07	< 0,007

Primeiramente, será apresentada uma abordagem da metodologia empregada para comparar as propriedades apresentadas pelos aços usuais, com aplicação nos clientes do segmento automobilístico, nas diversas etapas do processo de desenvolvimento deste trabalho caracterizado pelo estudo do envelhecimento nos aços 180 e 220 BH, com revestimentos GI e GA. Também será apresentada as técnicas utilizadas para a caracterização do envelhecimento bem como os objetivos alcançados.

3.2 Colocação em Prática do Planejamento

A partir do planejamento realizado, foram tomadas as devidas ações.

Foi avaliado o envelhecimento em aços 180 BH e 220 BH ambos galvanizados (GI) e *galvannealed* (GA) durante um período de 6 meses. Estes aços foram avaliados em condições naturais e artificiais. A condição natural consiste em deixar os corpos de prova à temperatura ambiente simulando assim a condição de estocagem das bobinas. A condição artificial consiste em simular artificialmente em um forno variando as condições de tempo e temperatura. Os materiais usados para estudo apresentaram faixas de Carbono (C) e Nióbio (Nb) de 22-26 e 140-160 ppm respectivamente. As amostras foram retiradas em duas regiões diferentes ao longo da largura da bobina, sendo estas $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$. Este trabalho visou a comparação entre dois testes de envelhecimento, um em condição natural e outro artificial. Na condição natural, os corpos de prova foram deixados em temperatura ambiente durante o período de 6 meses e na condição artificial, as variáveis tempo e temperatura foram avaliadas. As tabelas 2 e 3 contemplam a metodologia adotada para a execução das análises.

- Teste de Envelhecimento Natural

Tempo previsto: 6 meses – (26 semanas)

Tabela 2 - Variáveis analisadas para o teste de envelhecimento natural

Variáveis	Fator de multiplicação
12 semanas + quinzenalmente	19
Aços 180 e 220 BH	2
Revestimentos GI e GA	2
Envelhecimento natural e estufa	2
Replicação	2
TOTAL	304

Total de amostras = $19 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 304$ cp's

As amostras foram analisadas semanalmente durante o período de 12 semanas e depois deste quinzenalmente até completar 6 meses. Os aços escolhidos para avaliação foram os aços 180 e 220 BH, ambos com revestimentos, galvanizado e *galvannealed*. Na condição natural, as amostras foram deixadas à temperatura ambiente e em uma estufa com temperatura controlada de 40°C, durante o período de 6 meses. Foram utilizadas duas amostras para cada análise (replicação) para obter uma maior confiabilidade.

- Teste de Envelhecimento Artificial

Tabela 3 - Variáveis analisadas para o teste de envelhecimento artificial.

Variáveis	Fator de multiplicação
Aço 180 e 220 BH	<u>2</u>
Tempos de 30, 60, 120, 180, 240, 360 minutos	<u>6</u>
Temperaturas de 50°, 100°, 150° C	<u>3</u>
Revestimento GI e GA	<u>2</u>
Replicação	<u>2</u>
TOTAL	144

Total de amostras = $2 \times 6 \times 3 \times 2 \times 2 = 144$ cp's

No teste de envelhecimento artificial as amostras foram ensaiadas em um forno onde as variáveis tempo e temperatura foram alteradas para avaliar diferentes condições. Da mesma forma que para o caso anterior, foram utilizadas duas amostras para cada análise. A composição química foi definida através de cálculos estequiométricos, através destes foi possível calcular o carbono em solução sólida de cada material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir estão dispostos na seqüência das etapas da metodologia adotada para o processo de caracterização do aço *Bake Hardening*, baseada no Método de Análise e Solução de Problemas, *QC Story*, através do emprego do ciclo PDCA, compreendendo nas mesmas, as diversas técnicas utilizadas para efetuação das análises requeridas.

4.1 Propriedades Mecânicas

Os resultados dos ensaios de tração realizados foram analisados com o auxílio do *software Excel*. As propriedades mecânicas assim verificadas foram: limites de escoamento e resistência, alongamento total e razão elástica, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas especificadas (DIN BS EN 10325)

Propriedades Mecânicas	LR (MPa)	LE(MPa)		AL(%)	BH(MPa)
Classe de Aço	Min.	Min.	Máx.	Min.	Min.
BH180	300	180	240	33	30
BH220	320	220	280	31	30

Neste tópico, será dividido da seguinte maneira: Aços envelhecidos naturalmente e aços envelhecidos artificialmente.

4.2 Envelhecimento Natural

A seguir estão apresentados os resultados referentes ao ensaio de envelhecimento natural para os aços 180 e 220 BH.

4.2.1 - Aço 180 BH

A figura 4, apresentada a seguir, ilustra os resultados referente a propriedade de limite de escoamento na condição natural de envelhecimento do material, para os aços da classe 180 BH.

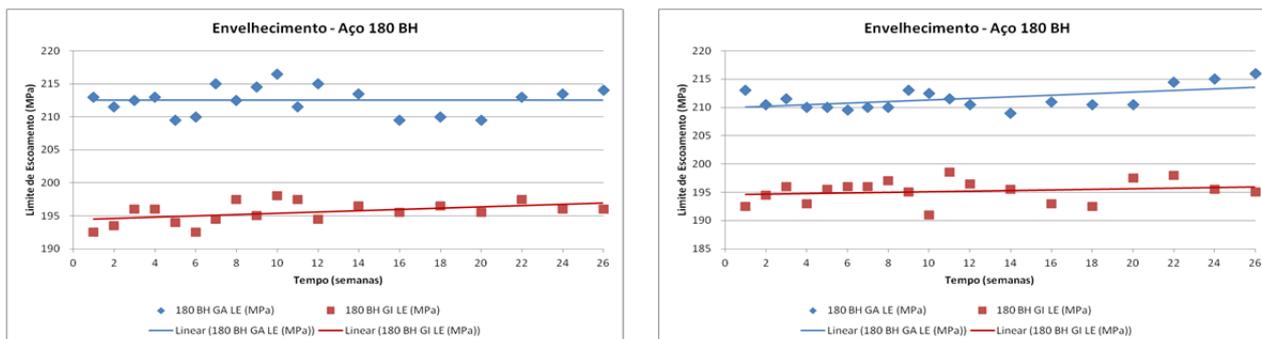


Figura 4 - Variação dos limites de escoamento dos aços 180 BH ao longo do tempo de seis meses na condição de envelhecimento natural deixado no depósito à temperatura ambiente e natural deixado na estufa (40°C).

Pode-se notar pela análise da figura 4 que o limite de escoamento para o aço 180 BH nas condições de envelhecimento natural em depósito à temperatura ambiente e em estufa à temperatura constante de 40°C, apresenta uma pequena tendência de aumento ao longo dos seis meses de estudo, tanto para os revestimentos GA e GI. Não existe diferença significativa nos resultados apresentados pelos dois aços em relação às diferentes condições de envelhecimento natural.

Durante o período de análise verificou-se que houve uma variação dos valores do limite de escoamento para os aços 180 BH GI e 180 BH GA em ambas as condições de ensaio de envelhecimento. Essa variação mantém-se praticamente dentro do desvio padrão da variável limite de escoamento, onde as maiores diferenças talvez possam ser atribuídas a pequenas variações possíveis na realização do ensaio de tração uniaxial.

O fato dos aços 180 BH GA e 180 BH GI apresentarem um pequeno teor de carbono em solução sólida, 2,6 e 2,3 ppm, respectivamente, não é observado um efeito significativo da influência do carbono em solução sólida no limite de escoamento associado as variações observadas ao longo dos ensaios. Porém existe a tendência de aumento da propriedade mecânica em questão.

Existe uma diferença no limite de escoamento associada aos revestimentos GA e GI conforme esperado, pois ambos os revestimentos promovem aumento de resistência mecânica ao sistema revestimento-substrato quando comparado ao aço base sem revestimento, sendo este aumento de resistência maior para o revestimento *galvannealed*, em função da presença do elemento ferro na faixa entre 8-12%. Portanto, as diferenças médias verificadas entre os materiais *galvannealed* e galvanizado, nas condições de envelhecimento à temperatura ambiente e estufa, que foram de 17 e 16 MPa, respectivamente, estão condizentes com os resultados observados atualmente na CSN. Ainda, pelo fato dos materiais representarem bobinas diferentes, tais diferenças podem estar associadas a pequenas variações de composição química e processamento. A figura 5 apresenta os resultados da propriedade mecânica alongamento total na condição de envelhecimento natural, para os aços da classe 180 BH.

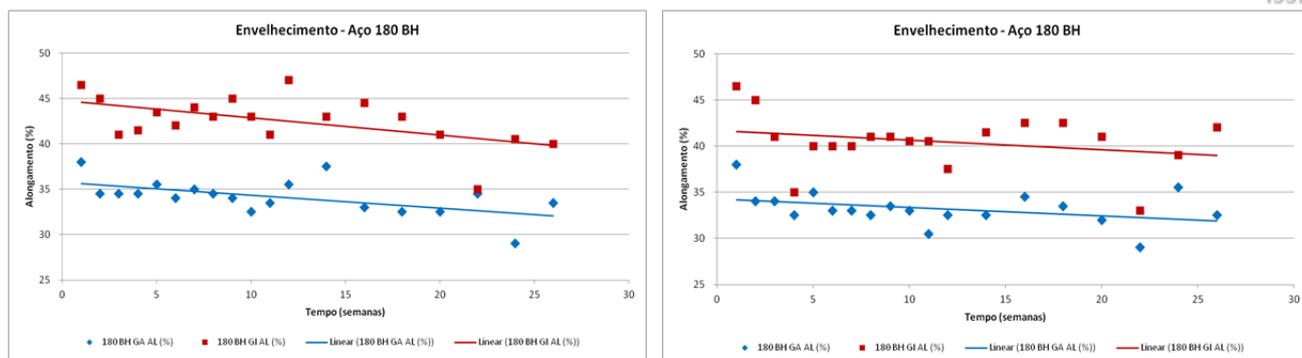


Figura 5 - Variação do alongamento total dos aços 180 BH ao longo do tempo de seis meses na condição de envelhecimento natural deixado no depósito à temperatura ambiente e natural deixado na estufa (40°C).

Para o alongamento total nota-se o efeito do envelhecimento para os aços 180 BH GA e 180 BH GI, onde há uma tendência de redução do alongamento total ao longo do tempo, sendo em torno de 5 e 3 % para aços GA e GI, respectivamente, em ambas as condições de ensaio. Da mesma forma que anteriormente, existe uma variação dos valores de propriedade no decorrer dos ensaios, entretanto é evidente o comportamento de redução do alongamento.

O aço com revestimento *galvannealed* apresenta valores inferiores ao aço galvanizado, conforme esperado, sendo as diferenças médias em torno de 8,5 e 7,5% para as condições de envelhecimento a condição ambiente para depósito e estufa respectivamente.

4.2.2 Aço 220 BH

A seguir são apresentados os resultados de propriedade mecânica referente aos aços da classe 220 BH, envelhecidos na condição natural.

A figura 6, apresentada a seguir, ilustra os resultados referente a propriedade de limite de escoamento na condição natural de envelhecimento do material, para os aços da classe 220 BH.

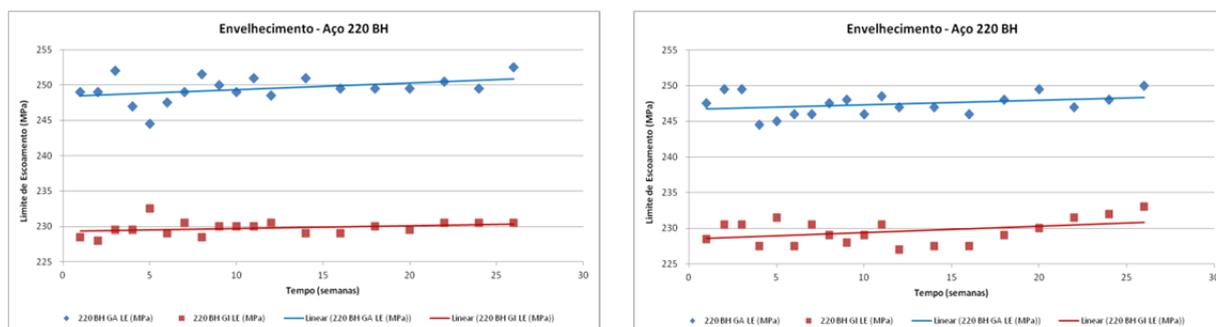


Figura 6 - Variação dos limites de escoamento dos aços 220 BH ao longo do tempo de seis meses na condição de envelhecimento natural deixado no depósito à temperatura ambiente e natural deixado na estufa (40°C).

Da mesma forma que observado para o aço 180 BH há uma leve tendência de aumento do limite de escoamento para os aços 220 BH GA e GI. Semelhante ao aço anterior os teores de carbono em solução sólida são baixos, sendo de 3,6 para o aço 220 BH GI e 4,3 para o 220 BH GA. Os níveis de aumento de resistência mecânica observados pelas curvas de tendência para os aços 220 BH são similares àqueles referentes aos aços 180 BH. Isso pode ser associado ao fato dos teores de carbono em solução sólida serem próximos, onde mesmo os valores apresentados para os aços 220 BH serem ligeiramente maiores, não acarretou diferenças em termos de níveis de envelhecimento.

Não foi observado também diferenças entre os ensaios de envelhecimento em condição de temperatura ambiente e em estufa com temperatura constante de 40°C.

Existe uma diferença no limite de escoamento associada aos revestimentos GA e GI conforme esperado. Existe uma diferença no limite de escoamento associada aos revestimentos GA e GI conforme esperado, similar ao observado para o aço 180 BH, sendo estas de 20 e 18 MPa para as condições de depósito e estufa, respectivamente. Ainda, pelo fato dos materiais representarem bobinas diferentes, essas diferenças podem estar associadas a variações pequenas tanto de composição química quanto de processamento.

A figura 7 apresenta os resultados da propriedade mecânica alongamento total.

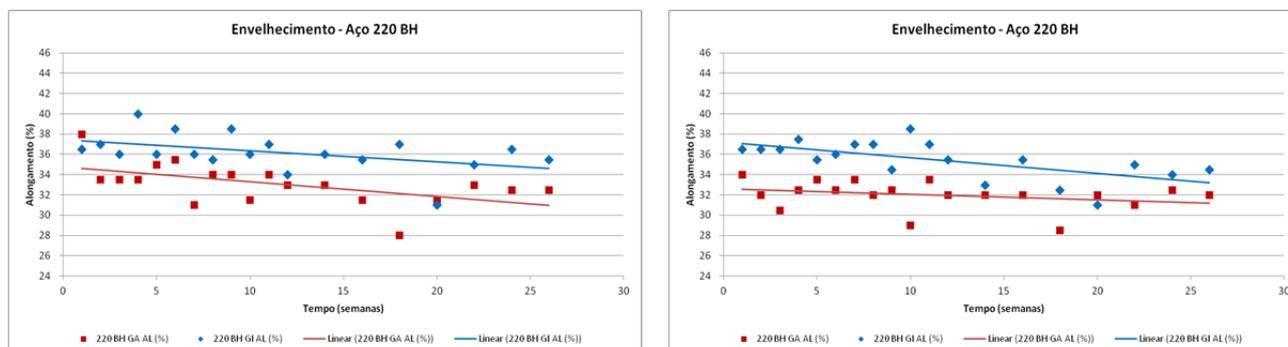


Figura 7 - Variação do alongamento total dos aços 220 BH ao longo do tempo de seis meses na condição de envelhecimento natural deixado no depósito à temperatura ambiente e natural deixado na estufa (40°C).

Observa-se uma tendência de redução para o alongamento total ao longo do tempo durante os seis meses de ensaios, tanto para as condições à temperatura ambiente e para a temperatura constante de 40°C. Esta redução é similar para todos os revestimentos e condições de envelhecimento, sendo em torno de 4%. Porém o aço 220 BH GI na condição estufa apresentou uma menor redução do alongamento total com base na tendência observado no gráfico, sendo em torno de 2%.

Conforme esperado, o aço com revestimento GA apresentou valores para o alongamento total menores em relação ao aço com revestimento GI, o que é justificado pelo maiores valores das propriedades limite de escoamento e limite de resistência observados. A diferença entre os revestimento foi de 3% ambas as condições de envelhecimento natural.

4.3 Envelhecimento Artificial

4.3.1 - Aço 180BH

A seguir são apresentados os resultados referentes ao ensaio de envelhecimento artificial realizado para os aços das classes 180 e 220 *Bake Hardening*.

A figura 8, apresentada a seguir, ilustra os resultados referentes à propriedade limite de escoamento na condição artificial de envelhecimento do material, para os aços da classe 180 BH.

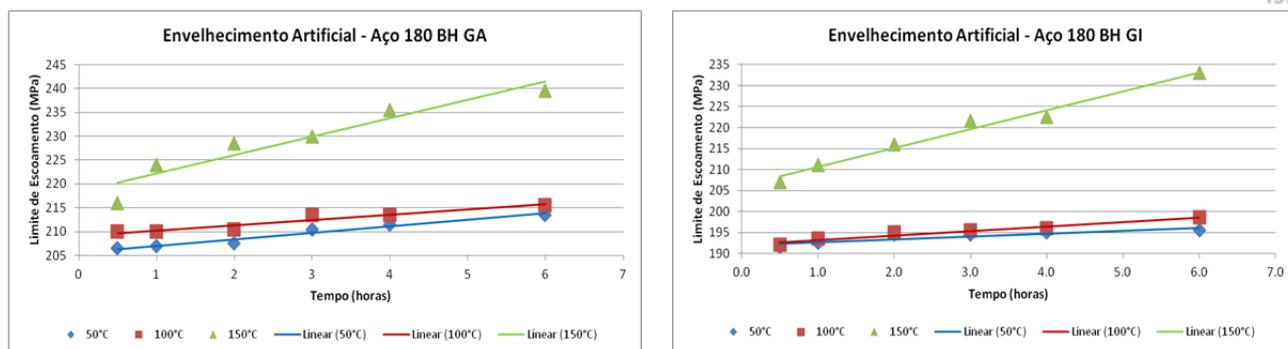


Figura 5 - Variação dos limites de escoamento dos aços 180 BH GA e GI com o tempo de permanência para as temperaturas de 50, 100 e 150°C com a variação de tempo de 0,5, 1, 2, 3, 4 e 6 horas respectivamente.

Pode-se notar pela análise da figura 8 que o limite de escoamento para o aço 180 BH nas condições de envelhecimento artificial apresenta uma tendência de aumento ao longo da simulação artificial do envelhecimento, tanto para os revestimentos GA e GI. Existe diferença significativa nos resultados apresentados em relação às diferentes tempo e temperatura de exposição.

Durante o período de análise verificou-se que o comportamento dos aços 180 BH GI e 180 BH GA em ambas as condições de ensaio de envelhecimento é similar, porém, o aço com revestimento GA apresenta valores superiores ao aço com revestimento GI, conforme observado anteriormente para os ensaios de envelhecimento em condição natural. Ambos os aços apresentaram pequenos incrementos na resistência mecânica, no que diz respeito às temperaturas de 50 e 100°C, onde praticamente não há diferença para o comportamento de envelhecimento entre tais temperaturas. Já para a temperatura de 150°C, os aços 180 BH GA e GI tiveram um incremento de resistência mecânica, referente ao limite de escoamento, em torno de 22 e 26 MPa, respectivamente, após 6 horas de ensaio.

Ainda, a taxa de aumento do limite de escoamento é maior para a temperatura de 150°C, sendo a diferença inicial em torno de 15 MPa, para os aços GA e GI, em comparação com as temperaturas de 50 e 100°C, que apresentam mesmo comportamento. Assim, para maiores tempos de ensaio, a diferença aumenta entre as temperaturas.

Pode-se atribuir os maiores níveis de envelhecimento obtidos para a temperatura de 150°C à maior difusão do elemento carbono para as discordâncias, onde quanto maior a temperatura, maior também é a difusibilidade do carbono na rede cristalina do material. Com isso, ocorre uma maior interação entre os átomos de carbono e as discordâncias (travamento), sendo essa interação conhecida como formação da atmosfera de Cottrell. De forma comparativa, vale ressaltar que a temperatura de 150°C é próxima à temperatura do ensaio *Bake Hardening*, estabelecido pela norma, onde nota-se que um maior nível de resistência mecânica é obtido para a temperatura de 150°C em relação às temperaturas de 50 e 100°C, sendo porém, neste caso, um ensaio de envelhecimento artificial e não de BH.AA figura 9, apresentada a seguir, ilustra os resultados referentes à propriedade alongamento total na condição artificial de envelhecimento do material, para os aços da classe 180 BH.

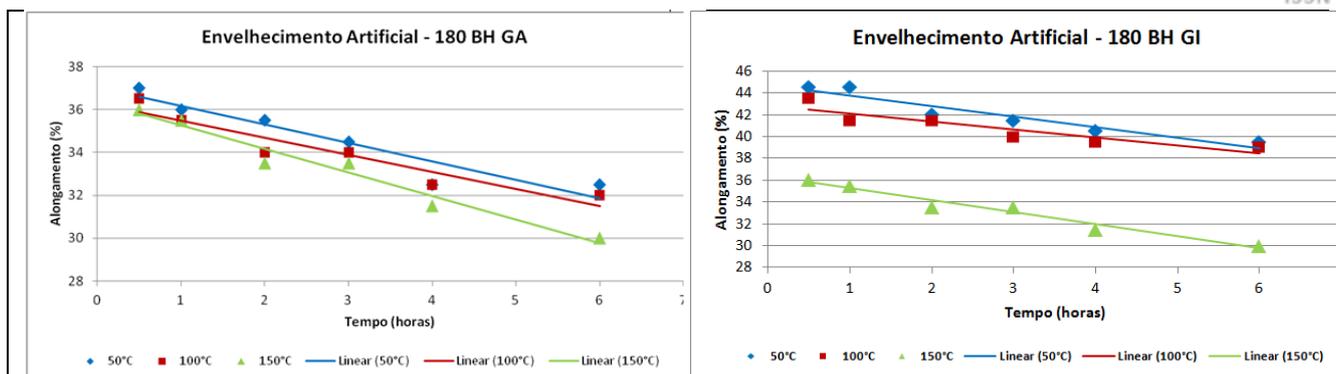


Figura 6 - Variação do alongamento total dos aços 180 BH GA e GI com o tempo de permanência para as temperaturas de 50, 100 e 150°C com a variação de tempo de 0,5, 1, 2, 3, 4 e 6 horas respectivamente.

Para o alongamento total nota-se o efeito do envelhecimento para os aços 180 BH GA e 180 BH GI, onde há uma tendência de redução do alongamento total com a variação do tempo para as diferentes temperaturas.

Ambos os aços da classe 180 BH apresentam comportamento de envelhecimento similar para as temperaturas de 50, 100 e 150°C e não há diferença significativa entre os valores apresentados para as diferentes temperaturas.

Conforme esperado, o aço 180 BH GA apresenta valores inferiores para a propriedade mecânica alongamento total quando comparado ao aço 180 BH GI, uma vez que o revestimento *galvannealed* promove maiores valores de resistência mecânica ao sistema substrato-revestimento metálico.

Mesmo com a grande diferença observada para os aços 180 BH GA e GI em relação ao limite de escoamento para a temperatura de 150°C, não foi verificada variação significativa para o alongamento total. Isso pode estar relacionado ao fato desta propriedade mecânica estar mais ligada ao tamanho de grão, onde para cada aço da classe 180 BH, GA e GI, o tamanho de grão médio é o mesmo, pois todos os ensaios de envelhecimento natural e artificial foram realizados com amostras do mesmo material, ou seja, não há variação microestrutural para as diferentes condições de tempo e temperatura de um mesmo aço. Ainda, os tamanhos de grão médios para os aços 180 BH GA e GI são idênticos, em termos de numeração de tamanho métrico ASTM, o que possivelmente atribui o fato de haver diferença entre os patamares de alongamento total obtidos para os aços GA e GI ao maior incremento de resistência mecânica promovido pelo revestimento *galvannealed* em comparação ao galvanizado. Portanto, o maior efeito verificado no limite de escoamento para os aços com o aumento de temperatura, especificamente a 150°C, está relacionado à formação da atmosfera de Cottrell, o que resulta cada vez mais em uma maior tensão necessária para atingir o escoamento plástico e prosseguir com a deformação plástica, porém, as discordâncias tem o mesmo perímetro médio para deslizamento, em cada aço, caracterizado pelo tamanho de grão médio. Sendo assim, isso possivelmente justifica o maior efeito da temperatura para o limite de escoamento quando comparado ao alongamento total.

4.3.2 Aço 220 BH

A seguir são apresentados os resultados referentes ao envelhecimento artificial realizado para os aços da classe 220 *Bake Hardening*.

A figura 10, apresentada a seguir, ilustra os resultados referentes à propriedade limite de escoamento na condição artificial de envelhecimento do material, para os aços da classe 220 BH.

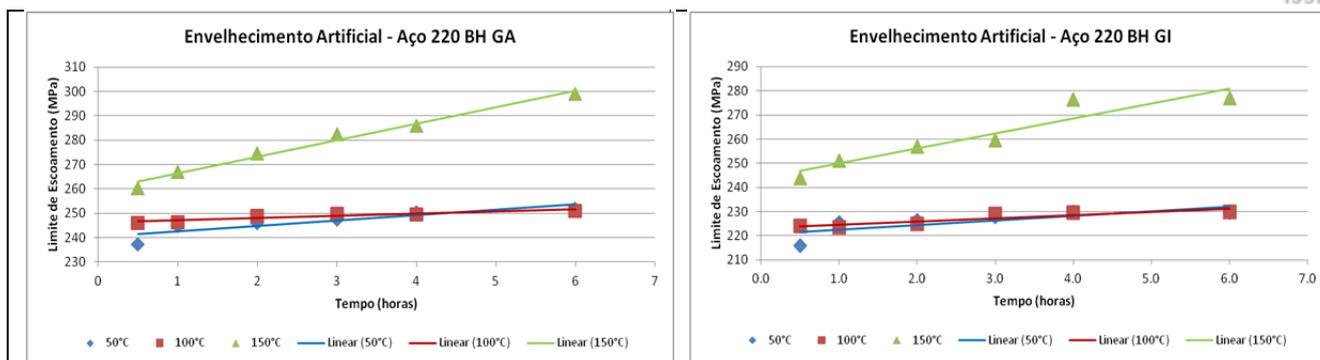


Figura 10 - Variação dos limites de escoamento dos aços 220 BH GA e GI com o tempo de permanência para as temperaturas de 50, 100 e 150°C com a variação de tempo de 0,5, 1, 2, 3, 4 e 6 horas respectivamente.

Da mesma forma que observado para o aço 180 BH há uma tendência de aumento do limite de escoamento para os aços 220 BH GA e GI, onde para as temperaturas de 50 e 100°C os comportamentos são equivalentes, com incrementos finais em torno de 10 MPa para ambos os aços, e para a temperatura de 150°C há um efeito pronunciado de aumento nos valores do limite de escoamento e ainda conforme o tempo de ensaio, ou seja, maior taxa de aumento do limite de escoamento, onde para esta temperatura os incrementos verificados são em torno de 40 MPa, para ambos os aços GA e GI.

Semelhante ao aço anterior os teores de carbono em solução sólida são baixos, sendo de 4,3 e 3,6 ppm, para ambos os aços GA e GI, porém, pouco maiores em relação os teores referentes aos aços 180 BH GA e GI. Isso pode justificar os níveis de envelhecimento mais elevados obtidos para o aço 220 BH em relação ao limite de escoamento.

Da mesma forma que anteriormente, o aço GA apresenta valores de limite de escoamento superiores ao aço GI.

A seguir a figura 11 apresenta o resultado de alongamento total para os aços 220 BH GA e GI.

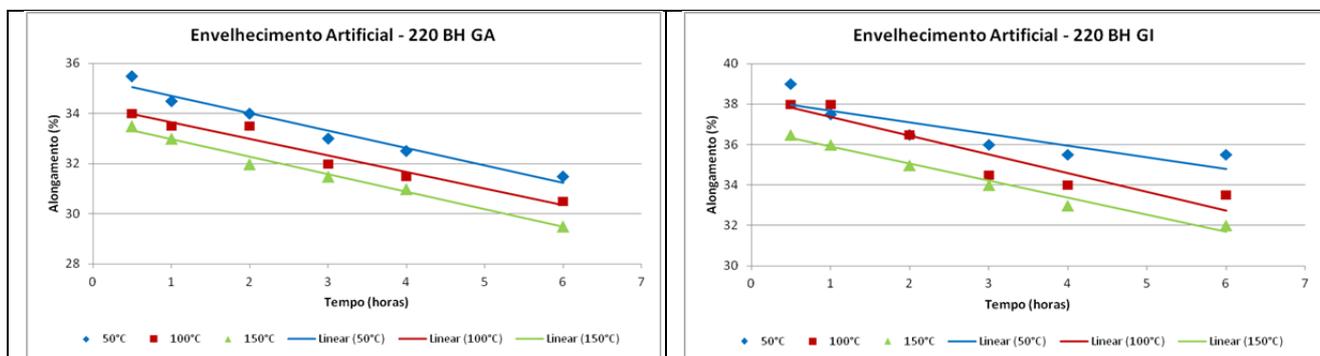


Figura 11 - Variação do alongamento total dos aços 220 BH GA e GI com o tempo de permanência para as temperaturas de 50, 100 e 150°C com a variação de tempo de 0,5, 1, 2, 3, 4 e 6 horas respectivamente.

Observa-se uma tendência de redução para o alongamento total para a condição de envelhecimento artificial, com variações no tempo e temperatura. Esta redução é similar aos aços 180 BH, sendo em torno de 4%.

Ambos os aços da classe 220 BH apresentam comportamento de envelhecimento similar para as temperaturas de 50, 100 e 150°C e ainda não há diferença significativa entre os valores apresentados para as diferentes temperaturas. Conforme esperado, o aço com revestimento GA apresentou valores para o alongamento total menores em relação ao aço com revestimento GI, o que é justificado pelos maiores valores das propriedades limite de escoamento e limite de resistência observados.

Da mesma forma que para o aço 180 BH, há um maior efeito da temperatura no limite de escoamento quando comparado ao alongamento total, onde as considerações são as mesmas.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados analisados no presente trabalho, seguem as considerações abaixo:

Para a condição natural de envelhecimento não foi observado diferenças significativas nos níveis de envelhecimento e também patamares de resistência para cada propriedade mecânica analisada entre os ensaios realizados nos materiais provenientes do depósito caracterizado pela condição de temperatura ambiente e da estufa, onde a temperatura de 40°C foi mantida constante. Isso foi verificado para ambos os aços 180 e 220 BH, GA e GI.

Na condição de envelhecimento natural, os níveis de aumento do limite de escoamento para os aços 180 e 220 BH foram insignificantes. Isso mostra que possivelmente, os baixos teores de carbono em solução sólida não foram eficazes na formação da atmosfera de Cottrell com concentrações de átomos suficientes para geração de um maior aumento do limite de escoamento, para as temperaturas avaliadas e tempos de estudo de seis meses utilizado, sendo esta propriedade mais sensível ao efeito da atmosfera de Cottrell, o que caracteriza o envelhecimento por deformação.

Para as condições de envelhecimento artificial, foi verificado um efeito significativo para a maior temperatura de ensaio, sendo esta de 150°C para a propriedade limite de escoamento, onde níveis bem maiores de aumento de resistência mecânica foram obtidos, em comparação às temperaturas de 50 e 100°C e ainda ao envelhecimento em condição natural. Os resultados referentes às menores temperaturas, 50 e 100°C, são maiores em relação à condição natural de ensaio, porém, mas próximos. Isso mostra que para os teores de carbono em solução sólida verificados para estes aços 180 e 220 BH utilizados no estudo, o efeito de envelhecimento só se apresenta de forma significativa para condições termodinâmicas e cinéticas mais favoráveis, ou seja, maiores temperaturas e tempos utilizados, conforme apresentado pelos ensaios em condição artificial. Isso corrobora com os resultados apresentados pelo envelhecimento em condição natural para temperatura ambiente e de 40°C, onde praticamente não houve diferenças entre essas temperaturas e o nível de envelhecimento verificado foi muito baixo.

Dessa forma, os materiais de estudo, para estas composições químicas analisadas, representadas pelos respectivos teores de carbono em solução sólida, praticamente não são envelhecíveis à temperatura ambiente para o tempo de estudo utilizado, porém, apresentam grande potencial de efeito *Bake Hardening*, pois os resultados de envelhecimento em condição artificial apresentaram aumentos expressivos do limite de escoamento tanto para os aços 180 BH quanto 220 BH para a temperatura de ensaio de 150°C, onde esse efeito combinado é benéfico para aplicação no segmento automotivo.

Os aços 220 BH em comparação com os aços 180 BH, para o ensaio de envelhecimento artificial, apresentaram níveis de envelhecimento maiores, para o limite de escoamento. Isso se deve ao fato destes aços apresentarem maiores quantidades de carbono em solução sólida.

Os aços BH são extremamente sensíveis à temperatura, especialmente temperaturas próximas a de cura da pintura das carrocerias, que é de 170°C, onde esta sensibilidade pôde ser vista quando os aços 180 e 220 BH foram submetidos ao envelhecimento artificial na temperatura de 150°C, temperatura essa próxima a do ensaio padronizado. O tempo de exposição na temperatura de 150°C também foi significativo para alterar as propriedades mecânicas dos aços BH.

REFERÊNCIAS

- 1 L.J.Baker, S.R.Daniel, J.D. Parker; *Metallurgy and processing of ultra low carbon Bake Hardening steels*; Materials Science and Technology; Vol.18; April 2002; 355-368.
- 2 S.Kim; Effect on the chemical composition and processing variables on the bake hardenability of ULC high strength steel; Research work in BAMPRI and POSCO.
- 3 Berbenni. S.V. Favier, X. Lemoine: M. Berveiller. (2004) A Micromechanical Approach to model the *Bake Hardening* Effect for Low Carbon Steels.
- 4 M. Blainscheuin, K.M. Radlmayr, A.Pichler, E.T.Stiaszny; *Bake Hardening effect in components*; Proceedings of the 19th Biennial IDDRG Congress; 10-14th June; 1996; 445-458.