

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO LOCALIZADO A LASER SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA DP 600 E TRIP 750

Marcelo Soares Amorim, marcelo.amorim@anac.gov.br¹

Fernando de Azevedo Silva, fazevedo@feg.unesp.br²

Davi Neves, davis@ieav.cta.br³

¹Agência Nacional de Aviação Civil, Superintendência de Aeronavegabilidade, Rua Laurent Martins, 209, São José dos Campos – SP, CEP 12242-431

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Guaratinguetá, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410

³Instituto de Estudos Avançados, DCTA, Trevo Cel. Av. José Alberto Albano do Amarante, 1, São José dos Campos – SP, CEP 12228-001

Resumo: Os aços avançados de alta resistência são de importância na indústria moderna da mobilidade. Na indústria automobilística, por exemplo, é previsto que o uso destes materiais cresça de maneira acentuada nos próximos anos. Algumas características destes materiais podem ser melhoradas por meio de tratamento térmico, seja ele em toda a extensão do produto ou em partes específicas para as quais se deseja um dado comportamento mecânico. Neste trabalho se propôs a investigação inicial do efeito de um tratamento térmico local por radiação laser, uma forma controlada de adição de energia, nas propriedades mecânicas e na microestrutura de dois destes materiais avançados. Os materiais estudados foram os aços dual phase (DP 600) e o transformed induced plasticity (TRIP 750), e a contribuição pretendida aqui foi prover informações sobre a interação entre a radiação laser e os materiais de estudo, dentro de determinados parâmetros de processamento térmico. Para a caracterização dos materiais, conforme recebidos e após os tratamentos térmicos a laser propostos, foram realizadas análises metalográficas, e ensaios de dureza e de tração. Foi proposta também uma metodologia para a avaliação quantitativa dos efeitos da adição de energia laser sobre os materiais, com base na variação de dureza superficial após os tratamentos térmicos. Verificou-se que, para a faixa de parâmetros de processo experimentada, houve mudanças significativas nas características dos materiais estudados, notadamente um aumento na dureza superficial, alcançando valores correspondentes ao dobro dos relativos aos materiais sem tratamento, nos limites de escoamento, com aumentos de até 15% com relação ao material-base, e de resistência, com aumentos até cerca de 30% com relação ao material-base. Por outro lado, verificou-se uma diminuição no alongamento específico dos materiais, quando submetidos a ensaios de tração, de até 80% com relação aos materiais sem tratamento térmico.

Palavras-chave: caracterização mecânica, tratamento térmico a laser, aços avançados de alta resistência, aços multifásicos

1. INTRODUÇÃO

Os aços avançados de alta resistência (do inglês *Advanced High Strength Steels*, AHSS), assim denominados por apresentarem altos limites de resistência mecânica em comparação aos aços convencionais com teores de carbono equivalentes, são de grande importância na indústria moderna, sobretudo na indústria da mobilidade (por exemplo, para a obtenção em série de peças estruturais automobilísticas). Foi a pressão pela diminuição da relação entre o peso próprio e a carga transportada, que representa em termos gerais a eficiência de determinado meio de transporte, o que levou ao desenvolvimento de novos materiais siderúrgicos aplicáveis à construção de veículos. Também, a imposição de novas restrições legais, com relação a emissões de poluentes e proteção dos ocupantes em cenário de acidente, faz com que os aços em geral levem vantagem com relação a outros materiais, para a construção mecânica.

O desenvolvimento de novos aços foi o principal objetivo do consórcio de empresas siderúrgicas denominado *WorldAutoSteel*, empenhado em desenvolver estes materiais para a indústria automobilística. A pesquisa para a obtenção de microestruturas específicas pôde levar ao desenvolvimento dos chamados AHSS, classificados como aços multifásicos, com pequena adição de elementos de liga, de microestrutura mais complexa do que as ferríticas ou ferrítico-perlíticas que se encontram normalmente em aços com baixos teores de carbono. Estes aços podem conter, em sua microestrutura, frações variáveis de ferrita, martensita, bainita e austenita retida, dependendo do tipo de processamento e dos elementos de liga, de acordo com Keeler e Kimchi (2014). Ainda de acordo com estes autores, é previsto que, ainda antes da década de 2020, mais de um terço da estrutura, em massa, de um automóvel compacto, seja feito com estes tipos aços, a um custo e impacto ambiental equivalentes ou menores do que os de cerca de cinco ou dez anos atrás. Porém, carros de classes superiores já utilizam estes materiais a estes níveis, em países desenvolvidos.

Um balanceamento adequado entre as porcentagens de microconstituintes em um AHSS pode levar a uma minimização da perda de ductilidade, característica de aços com níveis mais altos de resistência mecânica, de acordo com Gorni (2008). Uma outra característica notável de um AHSS é a alta capacidade de absorver energia sob impacto, o que o torna ideal para a fabricação de carrocerias automobilísticas, por exemplo. Em caso de desaceleração súbita, característica de um acidente, carros produzidos com este tipo de material tendem a transmitir uma carga de impacto menor aos ocupantes, aumentando sua probabilidade de sobrevivência neste cenário. Dois dos mais importantes aços classificados como AHSS são o bifásico (do inglês *Dual Phase*, DP) e o com plasticidade induzida por transformação (do inglês *Transformed Induced Plasticity*, TRIP). Apesar de ainda não existir uma classificação padronizada aceita em nível mundial, para estes tipos de aços, a classificação proposta pelo consórcio *WorldAutoSteel* é adotada aqui. Esta classificação identifica os materiais de acordo com a sua microestrutura e seu limite de resistência mínimo, em Megapascal.

De acordo com Gorni (2008), a microestrutura dos aços DP apresenta uma matriz ferrítica (cerca de 80% da composição) associada à martensita como segunda fase, na forma de ilhas, em adição a porcentagens muito pequenas de outros microconstituintes, como a bainita. Conforme se aumenta a fração em volume da segunda fase, há geralmente um aumento da resistência do material. Quando solicitado mecanicamente, este aço apresenta uma concentração de deformação na fase macia (ferrita), criando uma alta taxa de encruamento. A resistência dos aços DP é dependente da fração em volume e da dureza da martensita presente na microestrutura, de acordo com Oliver *et al.* (2007).

Apesar de o efeito do aumento da resistência induzido pela transformação da austenita retida na estrutura de alguns tipos de aço em martensita, por deformação mecânica, característico dos aços TRIP, ter sido relatado na Alemanha ainda na década de 1930, de acordo com Anazawa (2007), a viabilidade do fenômeno à temperatura ambiente foi descrita apenas na década de 60. A estes tipos de aço deu-se o nome de *Transformed Induced Plasticity*. Os aços produzidos por plasticidade induzida por transformação apresentam, em sua microestrutura, austenita retida em uma matriz de ferrita. Em adição a um mínimo de cinco por cento de em volume desta austenita, fases duras como martensita e bainita também estão presentes em composições variáveis. De acordo com Anazawa (2007), na década de 1980 sugeriu-se que o efeito TRIP poderia ser observado em aços de baixa liga, desde que houvesse uma quantidade mínima de austenita retida na microestrutura. Isso levou ao surgimento do conceito moderno de aço assistido por efeito TRIP.

As propriedades mecânicas de aços multifásicos do tipo TRIP são determinadas não somente pela transformação da austenita retida por deformação, mas também pelas características e interações das fases presentes. Nestes materiais, a ferrita poligonal e a bainita são responsáveis pela boa combinação entre ductilidade e resistência mecânica, de acordo com Timokhina *et al.* (2004).

Algumas das características dos AHSS, como por exemplo a sua capacidade de conformação plástica, podem ser melhoradas por meio de tratamentos térmicos adequados, sejam eles em toda a extensão do produto ou em partes específicas para as quais se deseja um dado comportamento, caso no qual se pode utilizar o processamento a laser. Assim, podem-se aliar qualidades desejáveis de resistência e ductilidade em partes específicas de uma peça, sem que sejam alteradas outras regiões da mesma, de acordo com Neugebauer *et al.* (2009).

De acordo com Svelto (2004), o laser caracteriza-se, principalmente, por ser um feixe de luz muito intenso e com uma faixa espectral estreita (ou seja, um conjunto de emissões com frequências muito próximas). Além disso, possui características utilizadas para o estudo da matéria, como por exemplo as coerências espacial e temporal, que fazem com que o laser seja uma fonte de energia muito precisa e controlada, podendo ser utilizado para medições, e auxiliar em processos químicos de determinação da estrutura, seleção e purificação de substâncias. Estas aplicações foram as primeiras em âmbito científico e industrial deste tipo de equipamento. Com o aumento da potência disponível, porém, as possibilidades de aplicação foram ampliadas para o processamento de materiais, ainda de acordo com Svelto (2004).

Em geral, a literatura sobre tratamentos térmicos localizados com radiação laser para AHSS ainda é incipiente. Por exemplo, mudanças nas características locais de alguns tipos de AHSS após processamento térmico a laser foram reportadas por Neugebauer *et al.* (2009), Asadi *et al.* (2012) e Baumann *et al.* (2012). Na maioria dos casos, porém, o objetivo era a avaliação de parâmetros de corte e soldagem, seja entre aços de mesmo tipo mas com classes de resistência diferentes, seja entre aços de tipo diferente (por exemplo *dual phase* e TRIP). Além disso, estes trabalhos não apresentam de maneira completa todos os parâmetros de processo utilizados. No caso do aço TRIP existe uma ainda maior escassez de informação nesta área do conhecimento. Estudos realizados por Grajcar *et al.* (2014), sobre a soldagem de aços TRIP, revelaram que um problema importante que surge durante o processo é a formação de trincas resultantes de altas taxas de resfriamento na junção. Neste sentido, um tratamento térmico localizado e sob medida, adequado à aplicação de processamento a laser, poderia atenuar o problema se feito antes e depois do processo de soldagem. Assim seria importante uma investigação mais aprofundada dos efeitos do tratamento térmico local sobre as propriedades mecânicas deste tipo de aço.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dois tipos de materiais estudados foram fornecidos por empresa participante do consórcio *WorldAutoSteel*, em chapas de espessura nominal de 1,6 mm. A composição química em porcentagem, dos dois materiais, está apresentada

na Tab. 1. Nesta tabela, os valores em branco representam uma porcentagem menor do que 0,005. O aço TRIP 750 foi fornecido sem recobrimento superficial, e o DP foi fornecido galvanizado. Porém, a galvanização do aço DP 600 foi removida manualmente por lixamento antes da aplicação dos tratamentos térmicos propostos. Já as amostras do aço TRIP 750 foram ligeiramente lixadas para a remoção de óxidos superficiais decorrentes do armazenamento, antes dos tratamentos térmicos.

Tabela 1. Composição química dos materiais estudados (% em peso).

Aço	C	Mn	Si	Mo	Al	P	Ni	Nb	Cr	N	S	Cu	Ti
DP	0,076	1,67	0,017	0,16	0,032	0,016	0,017	0,01	0,023	0,0052	0,0048	0,015	--
TRIP	0,22	1,49	1,36	--	0,44	0,021	0,008	--	0,13	0,004	0,0013	0,005	0,006

A caracterização, realizada a princípio nos materiais conforme recebidos e após os tratamentos térmicos propostos, foi feita através de ensaios de tração e microdureza Vickers para levantamento das propriedades mecânicas, e metalografia das amostras. Para este trabalho foi utilizado um laser a fibra óptica dopada com itérbio (IPG Photonics modelo YLR-2000), de alta potência (2 kW de potência nominal máxima). O laser é montado em um rack à parte do experimento, e a entrega de potência é feita via fibra óptica ao cabeçote do equipamento.

O feixe gerado apresenta distribuição de energia aproximadamente homogênea, na forma de uma gaussiana, sendo que ilumina uma área circular sobre a peça, aproximadamente homogêneo sobre esta área. A configuração de ensaio, para chapas de medidas 200 x 200 mm, está apresentada na Fig. 1, sendo que uma chapa de suporte, feita em alumínio e com espessura de 20 mm, está fixa sob os espécimes de ensaio. Um arranjo de equipamento de posicionamento, controlado por Comando Numérico Computadorizado (CNC) permite a programação de uma geometria específica para o tratamento térmico, além de um controle estrito dos parâmetros de processo.

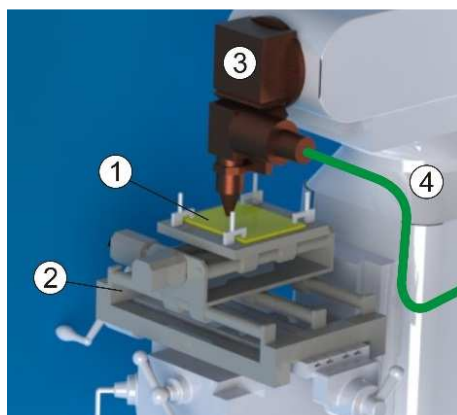


Figura 1. Arranjo experimental. 1) amostra. 2) mesa CNC (eixos x e y). 3) mesa CNC (eixo z, inclui a óptica de entrega do feixe). 4) fibra óptica de entrega do feixe laser.

Numa primeira etapa da pesquisa, o processo de tratamento térmico a laser foi caracterizado experimentalmente para que se relacionassem os parâmetros de operação do equipamento com os efeitos sobre os materiais sendo tratados. Considerando-se os três parâmetros de processo: potência nominal do feixe laser em Watts, a distância vertical entre o foco do feixe e a superfície de irradiação da amostra (denominada desfocalização), em milímetros, e a velocidade de avanço do feixe sobre esta em milímetros por minuto, e os efeitos desejados (transformações no estado sólido), para materiais metálicos em geral um valor inicial de densidade de energia laser DE , calculada conforme Eq. (1), entre 1 e 100 J/mm² seria desejável, de acordo com Ion (2005).

$$DE = DP \cdot \tau \quad (1)$$

Na Eq. 1, DP é a densidade de potência, dada pela Eq. 2, τ é o tempo de interação entre o material e o feixe, relacionado à velocidade de avanço deste sobre a peça conforme a Eq. 3:

$$DP = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Na Eq. 2, P é a potência do feixe e A a área iluminada por ele sendo função da desfocalização do feixe no processo.

$$\tau = \frac{D}{v} \quad (3)$$

Na Eq. 3, D é o diâmetro do círculo iluminado pelo feixe laser sobre a peça, e v é a velocidade de avanço do feixe.

Resultados anteriores, reportados por Ki e So (2012), sobre aquecimento superficial a laser em aços sem elementos de liga, mas de porcentagens de carbono próximas às dos materiais estudados aqui, para faixa de densidades de energia laser entre 10 e 20 J/mm², mostraram que foi promovida a austenitização superficial do material. Assim, esta faixa de valores de densidade de energia foi considerada inicialmente. Após a caracterização inicial, o alvo para os ensaios posteriores foi escolhido com os seguintes parâmetros de processo: 300 W de potência nominal do feixe, 50 mm de desfocalização e 150 mm/min de avanço do feixe. Uma segunda etapa de experimentos foi feita, com variações de parâmetros em torno do alvo. Os parâmetros de operação aplicados nesta etapa estão na Tab. 2. Os códigos D e T representam respectivamente o aço DP 600 e o aço TRIP 750. A faixa de densidade de energia varia de 15,15 J/mm² a 25,15 J/mm². Para algumas densidades de energia usaram-se dois valores diferentes de densidades de potência, por exemplo nos casos de ensaio T1 e T4. Os espécimes para os ensaios de tração, por sua vez, foram confeccionados conforme norma ASTM E8/E8M-11 (2012), sendo do tipo *Sheet* com 12,5 mm x 50 mm de largura e comprimento nominais, respectivamente, e sendo obtidos de forma a terem um alinhamento longitudinal com o sentido de laminação das chapas, por eletroerosão a fio.

Tabela 1. Parâmetros experimentais para tratamento térmico a laser.

Código	Desfocalização (mm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Potência nominal do feixe (W)	Densidade de potência (W/mm ²)	Densidade de energia (J/mm ²)
T1/ D1	50	135	270	5,05	18,52
T2/D2	50	135	330	6,17	22,63
T3/D3	50	165	270	5,05	15,15
T4/D4	50	165	330	6,17	18,52
T5/D5	45	135	270	6,23	20,57
T6/D6	45	135	330	7,62	25,15
T7/D7	45	165	270	6,23	16,83
T8/D8	45	165	330	7,62	20,57

Todos os ensaios de tração realizados utilizaram extensômetro acoplado ao corpo de prova, para o monitoramento da deformação experimentada. A velocidade da separação da travessa da máquina de ensaio, constante, foi estipulada em 0,8 mm/min. Os ensaios de microdureza Vickers superficiais para este trabalho foram realizados com um instrumento da Future Tester, FM-700, de acordo com a norma ASTM E384 (2011), adotando-se uma carga de 500 gf e tempo de espera de 10 s. As indentações foram igualmente distribuídas, no sentido transversal à direção de avanço do feixe laser utilizado nas experiências, a fim de que se pudessem observar as mudanças promovidas pela interação, a partir do material-base. A distância percorrida total foi escolhida de tal forma que pudesse acompanhar todas as áreas afetadas pelo tratamento. Também foram feitas medições de dureza Vickers transversalmente à espessura das chapas tratadas termicamente, para a verificação da profundidade de penetração dos efeitos da energia laser adicionada, a partir da superfície de incidência, e na região central de incidência do feixe laser. Para estas medições utilizou-se um microdurômetro instrumentado Anton Paar, e foram realizadas medições ao longo de uma linha, com distância entre indentações de 0,1 mm, e, como neste caso a distância entre indentações foi menor, utilizou-se como carga de indentação 100 gf. Com relação à metalografia, para aços de microestrutura mais complexa do que as apresentadas pelos convencionais de baixo teor de carbono (com microestruturas ferrítico-perlíticas), como no caso dos AHSS, o nital comumente usado para ataque químico seletivo em análises metalográficas não permite uma completa observação das fases presentes. Assim, desenvolveram-se outros reagentes na tentativa de identificar tais fases, como por exemplo o reagente desenvolvido por LePera (1979). Porém, é reconhecida a dificuldade na avaliação adequada das microestruturas de aços multifásicos e na aplicação de uma solução adequada para ataque e a revelação das fases presentes, conforme reportado por Kantoviski (2005). No caso do aço DP, por outro lado, se forem desconsideradas as porcentagens de microconstituintes que não a ferrita e a martensita, que realmente são pequenas, pode-se usar o nital

com resultados satisfatórios. Assim, adotou-se neste trabalho, como padrão, o nital como reagente metalográfico, e, após algumas experiências, fixou-se a concentração em 2% e o tempo de ataque em 10 s.

Após a caracterização das amostras dos materiais sem tratamento térmico (material-base), foram feitos os tratamentos térmicos conforme propostos e uma nova caracterização. Utilizando-se um conceito de “severidade de interação”, avaliada conforme Fig. 2, que representa a área do gráfico relacionando as indentações superficiais e a dureza medida, pôde-se quantificar a interação entre a energia laser adicionada em cada caso de ensaio e o efeito sobre a dureza superficial dos materiais, e utilizar este conceito como medida de comparação. Nesta técnica, se consideram ambas as áreas em cinza à direita da Fig. 2. Para os ensaios de tração das amostras após tratamentos térmicos a laser, escolheu-se, para casos de ensaio de mesma densidade de energia, mas densidades de potência diferentes (por exemplo os casos de ensaio T1 e T4), aqueles que promoveram maiores efeitos, ou seja, um maior valor de severidade de interação, para a obtenção de corpos de prova.

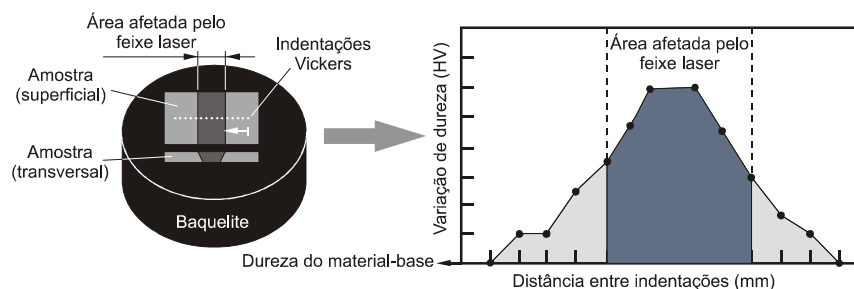


Figura 2. Avaliação quantitativa dos efeitos dos tratamentos térmicos a laser nas amostras (severidade de interação).

Os espécimes para os ensaios de tração, após tratamento térmico a laser, foram obtidos de chapas conforme mostrado na Fig. 3, que é uma montagem, de corpos de prova sem tratamento térmico sobre uma chapa, de 200 x 200 mm, tratada termicamente. Também estão representadas as linhas percorridas pelo feixe laser em um lado da chapa, com uma distância entre elas de 10 mm. A outra superfície da chapa também foi tratada termicamente, com linhas distantes entre si também de 10 mm e defasadas em 5 mm com relação à face representada na Fig. 3. Para cada caso de ensaio (combinação de parâmetros de tratamento térmico) foram obtidos seis corpos de prova para ensaio de tração. Os furos presentes são para fixação em uma chapa de suportes em alumínio com espessura de 20 mm.

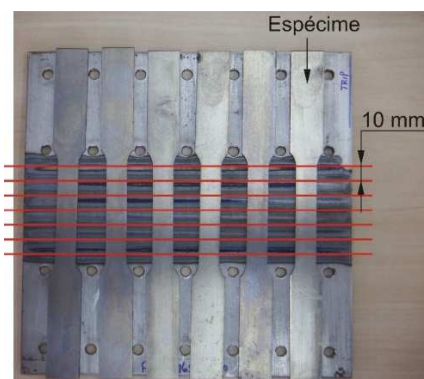


Figura 3. Obtenção de espécimes tratados termicamente para ensaios de tração. As linhas em vermelho representam as trajetórias do feixe laser.

3. RESULTADOS, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As durezas dos materiais conforme recebidos foram avaliadas em $229 \pm 5,3 \text{ HV}_{0,5}$ para o aço TRIP 750, e $203 \pm 5,7 \text{ HV}_{0,5}$ para o aço DP 600. Já os resultados obtidos nos ensaios de tração, para os materiais-base, estão apresentados na Tab. 3. Ao contrário dos resultados obtidos em outros trabalhos (Keeler e Kimchi, 2014, e Kantoviski, 2005), o diagrama tensão-deformação para o aço TRIP 750 apresentou um patamar de escoamento, sendo que este comportamento pode ser atribuído ao envelhecimento natural do material, mantido durante certo tempo, o que foi descrito por Cottrell e Bilby (1949). O mesmo não ocorreu com o aço DP 600 porque ele foi estocado conforme recebido, ou seja, com uma camada superficial de proteção. Após os tratamentos térmicos novos ensaios de tração

levaram a resultados apresentados na Fig. 4, que tem como referência os valores dos materiais sem tratamento (igual a zero nos diagramas). Os resultados são apresentados conforme aumenta a densidade de energia laser adicionada.

Tabela 3. Propriedades mecânicas avaliadas para os materiais conforme recebidos.

Aço	Lim. Escoam. (MPa)	Lim. de Resist. (MPa)	Def. uniforme (%)	Def. total (%)
DP	333±11	633±12	16,8±0,4	27,5±0,9
TRIP	440±12	750±8	24,4±0,7	33,3±1

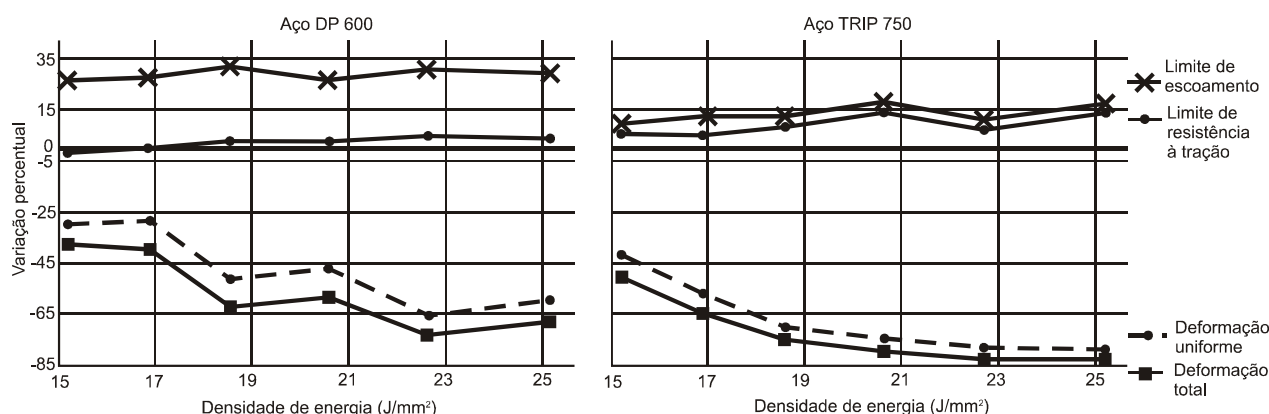


Figura 4. Alteração nas propriedades avaliadas por ensaios de tração, conforme energia do tratamento térmico.

Os resultados mostram que, no caso do aço DP 600, existe um aumento no limite de escoamento até em torno de 30% com relação ao material-base, para toda a faixa de densidades de energia experimentada, sendo que o limite de resistência à tração permanece praticamente inalterado. Já a deformação uniforme e a deformação total apresentam queda a partir de 30% com relação ao material-base, alcançando até níveis em torno de 70% conforme aumenta a densidade de energia. No caso do aço TRIP 750, o aumento tanto no limite de resistência à tração quanto no limite de escoamento alcança valores muito semelhantes para toda a faixa de variação de densidades de energia experimentada, atingindo valores em torno de 15% a mais com relação ao material-base.

Já a diminuição do alongamento uniforme e do alongamento total é mais dramática do que no caso do aço DP 600, com valores a partir de 50% menores, até cerca de 80%, com relação ao material-base, para a faixa de densidades de energia experimentada.

Tanto o aumento nos limites de resistência à tração e limite de escoamento, como a diminuição nas propriedades de ductilidade experimentadas pelos materiais após os tratamentos térmicos localizados propostos, podem ser atribuídas ao aumento da porcentagem dos microconstituintes mais duros, como a martensita, resultado característico de tratamentos térmicos de têmpera.

A análise das superfícies úteis dos corpos de prova tratados termicamente, após ensaios de tração e para ambos os materiais, revelou que foram formadas diferentes regiões, o que pode ser verificado pelo aspecto ondulado das superfícies laterais, abaixo na Fig. 5. Além disso, as superfícies de fratura apresentam-se inclinadas aproximadamente a 45 graus com relação às superfícies irradiadas, indicando que foram formadas regiões de diferentes resistências conforme o diagrama de cima na Fig. 5.

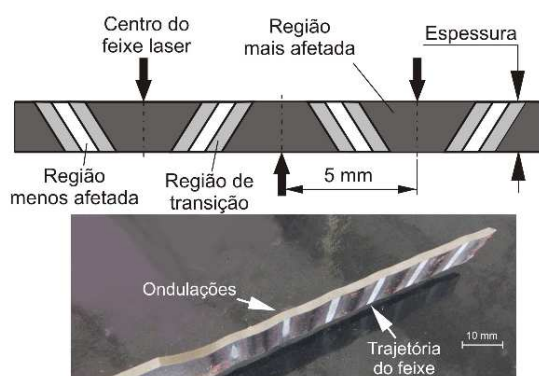


Figura 5. Estimativa das regiões afetadas na transversal nas amostras tratadas termicamente.

Com relação às alterações microestruturais promovidas pelos ensaios conforme propostos, a Fig. 6 mostra a evolução a partir da microestrutura original sem tratamento (índice *a* na figura), um resultado para um ensaio com média densidade de energia ($18,52 \text{ J/mm}^2$, indicado por *b*), e um resultado para o maior nível experimental de densidade de energia ($25,15 \text{ J/mm}^2$, indicado por *c*), para o aço DP 600. Também se representam as imagens das transversais relativas a cada caso apresentado. A microestrutura original se apresenta na forma de uma matriz ferrítica com ilhas de martensita ao redor. A partir do material-base, conforme aumenta a densidade de energia adicionada ao material, primeiro se promove um refinamento da microestrutura, o que, porém, é indistinguível em imagens transversais das amostras. A partir do patamar de $18,52 \text{ J/mm}^2$, além do refinamento da microestrutura, começa a aparecer uma calota nas imagens transversais, ou seja, os efeitos na microestrutura não avançam até o lado oposto da chapa. A partir do patamar de $20,57 \text{ J/mm}^2$, porém, a calota na imagem transversal dá lugar a um trapézio, que cresce em largura até cerca de 5 mm. Além disso começam a se formar pacotes de finas agulhas de martensita, agrupados em tamanhos cada vez maiores, até o máximo de energia laser adicionada ao material, $25,15 \text{ J/mm}^2$. Estes pacotes são típicos de processo de têmpera para aços de baixo teor de carbono. Isso também mostra que as temperaturas superficiais alcançadas, para a faixa de densidades de energia testada, variaram entre níveis um pouco acima da temperatura crítica inferior de transformação austenítica e níveis abaixo da temperatura crítica superior.

Um resultado digno de nota é a comparação entre os casos de ensaio D4 e D1, ambos com igual densidade nominal de energia aplicada. Ao passo que, no caso D1, as imagens transversais não mostram áreas afetadas facilmente distinguíveis, no caso D4 a imagem mostra claramente uma calota a partir da superfície irradiada. Isso mostra a influência, nos resultados físicos dos tratamentos térmicos, da densidade de potência laser, que é maior no caso de ensaio D4.

Já a microestrutura do aço TRIP 750, conforme recebido, apresenta-se de forma mais complexa, mas, de acordo com o tipo de ataque químico utilizado, apenas se pode distinguir a fase ferrítica de outras, como a bainita e a martensita. Esta microestrutura está representada à esquerda na Fig. 7. À direita da mesma figura está a imagem para o caso de ensaio com maior densidade de energia aplicada. No caso deste material, verifica-se que existe uma maior susceptibilidade ao tratamento térmico, desde todos os casos de ensaio resultaram na formação de estruturas tipicamente martensíticas, com tamanhos de conjuntos de ripas crescente conforme aumenta a densidade de energia. As imagens transversais das amostras mostram duas regiões distintas, para todos os casos de ensaio: uma calota inscrita em um trapézio, e também revelam que todos os casos de ensaio resultaram em penetrações totais dos efeitos sobre a microestrutura do material. As larguras das zonas termicamente afetadas variam de 4 a 5,5 mm.

Com relação às diferenças de dureza local nos materiais após os tratamentos térmicos, verificou-se que, no caso do aço DP, para faixas de densidade de energia de até $18,52 \text{ J/mm}^2$, promove-se um aumento em torno de 10% e 20%, dependendo da densidade de potência, porém esta camada endurecida é pouco espessa, alcançando no máximo 0,4 mm de profundidade a partir da superfície irradiada. Acima deste patamar de energia, conseguem-se aumentos de dureza de até 50%, que decrescem a partir da superfície irradiada até valores em torno de 10% a mais com relação ao material-base, na superfície oposta. Já no caso do aço TRIP 750, novamente os resultados revelam que a capacidade de interação com o feixe laser é maior, levando a aumentos de dureza em torno de 100% para todos os casos de ensaio, sendo que a camada endurecida atinge toda a espessura do material, caindo da superfície irradiada até valores em torno de 20% a mais do que a dureza inicial. Nas regiões limítrofes das linhas de tratamento térmico, verificou-se que existe uma tendência à uma pequena queda de dureza. Isso foi verificado para vários casos de ensaio e para ambos os materiais, e pode ser atribuído ao revenimento da martensita presente originalmente nos materiais, sendo que este efeito foi anteriormente reportado por Farabi (2010).

A severidade de interação, avaliada conforme proposto, está apresentada na Fig. 8 para o aço DP 600. Nitidamente se verifica que, conforme aumenta a densidade de energia laser adicionada, aumentam também os efeitos sobre o material. Nota-se também que, para determinados casos de ensaio, os valores da severidade são negativos, indicando que houve um revenimento na martensita presente originalmente no material. Também se consegue notar a influência da densidade de potência sobre os resultados, pela avaliação das severidades de interação, diferentes entre si, relativas aos pares de casos de ensaios D4 e D1 e D8 e D5, relativos a casos com igual densidade de energia adicionada.

Resultados semelhantes foram obtidos para o aço TRIP 750, mas, devido à sua maior capacidade de interação com a radiação laser, os valores de severidade de interação começam em patamares acima de 400 HV.mm, atingindo mais de 900 HV.mm conforme aumenta a densidade de energia.

Com relação à influência de cada parâmetro de processo sobre os efeitos do tratamento térmico realizado, avaliada pela severidade de interação para cada caso de ensaio, pode-se concluir o seguinte: com relação à potência nominal de saída do laser, conforme ocorre um aumento no seu valor, os efeitos físicos sobre a amostra são mais pronunciados. Isso porque parcela maior de energia está disponível para ser absorvida pelo material, aumentando os efeitos físicos.

Da mesma forma que a variação da potência promove alteração na severidade de interação, os outros parâmetros de operação do laser interferem nesta severidade. Uma velocidade de avanço menor aumenta o tempo de interação, permitindo que mais energia seja absorvida pelo material, promovendo assim maior aporte térmico. Uma diminuição na distância de desfocalização, por sua vez, diminui o tamanho da área iluminada, aumentando a densidade de energia. Densidades de energia maiores levam a maiores severidades de interação.

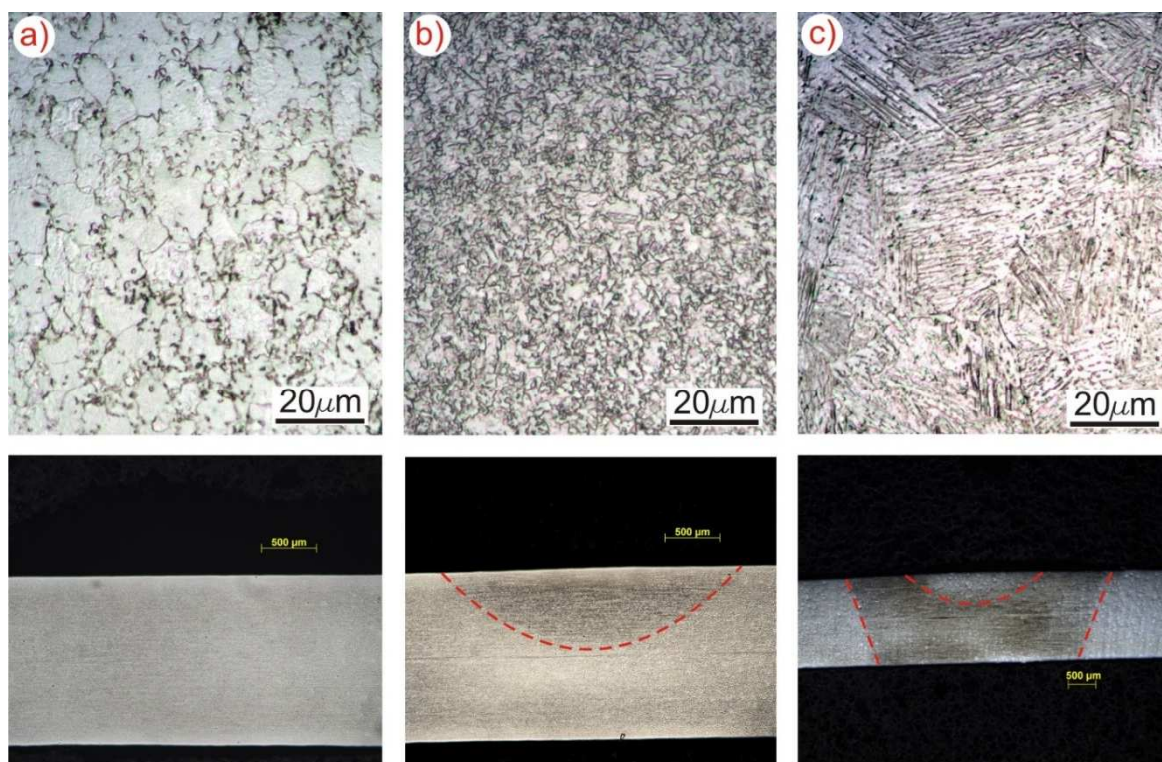


Figura 6. Aspecto superficial e transversal das amostras de aço DP 600. a) material-base. b) caso de ensaio com densidade de energia média. c) caso de ensaio com maior densidade de energia aplicada.

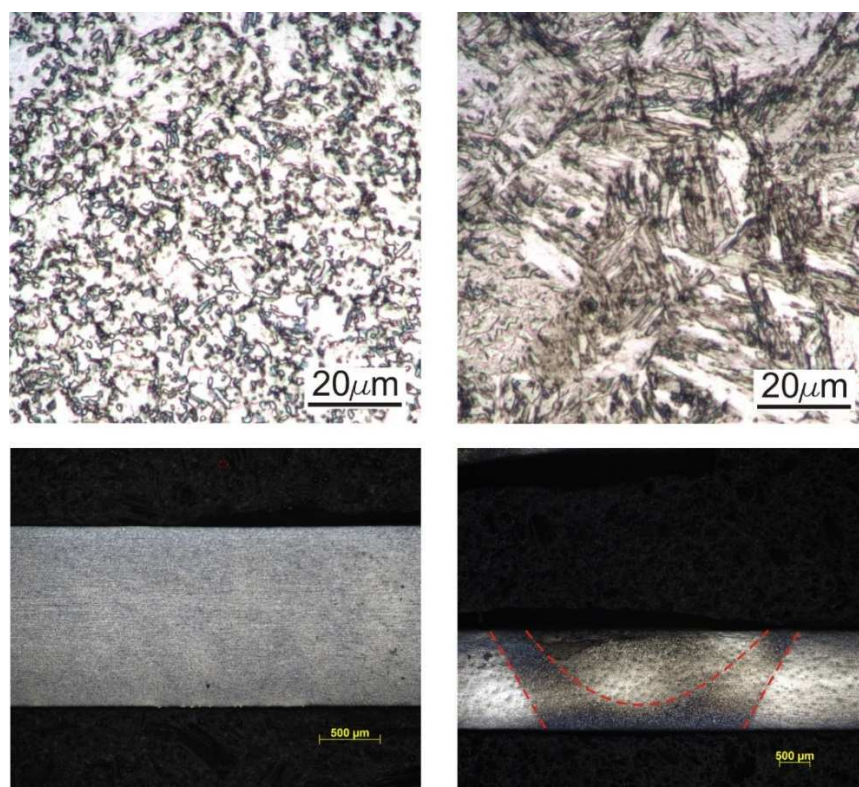


Figura 7. Aspecto superficial e transversal das amostras de aço TRIP 750. À esquerda: material-base. À direita: caso de ensaio com maior densidade de energia aplicada.

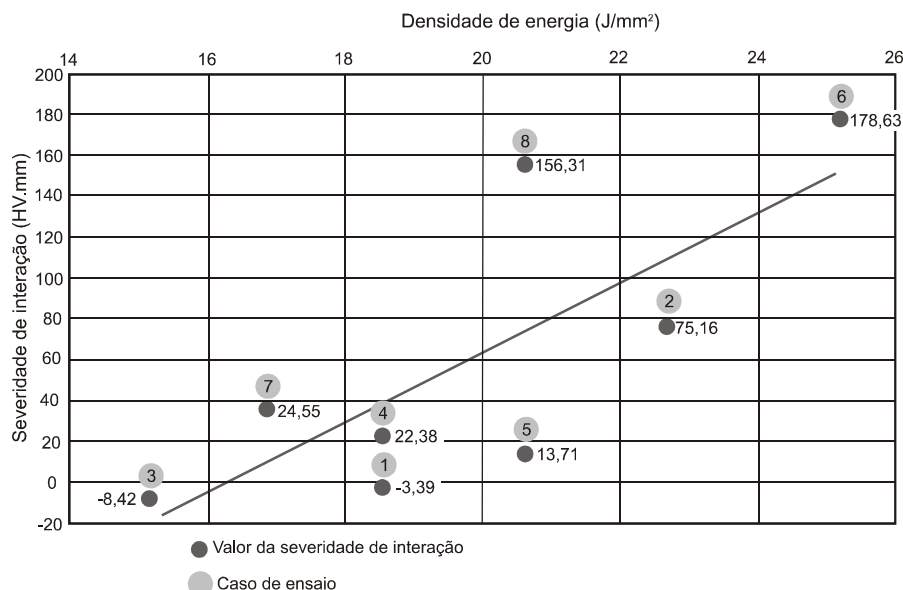


Figura 8. Severidade de interação para o aço DP 600, de acordo com a densidade de energia laser do processo

O procedimento experimental utilizado permite a identificação de qual das variáveis independentes é a mais influente no tratamento térmico. No caso da interação entre as variáveis, o planejamento de experimentos adotado (fatorial 2^3) permite a identificação desta influência, com a utilização do diagrama de Pareto, a partir do qual é possível a visualização das variáveis mais importantes num experimento controlado, de acordo com Moen, Nolan e Provost (1999). Viabiliza-se a identificação da variável ou da interação de maior efeito, responsável pela maior parcela de modificação nos resultados do experimento. O gráfico de Pareto, tendo como saída a severidade de interação, para o aço TRIP 750, revelou que a variável de processo de maior influência é a potência nominal do feixe laser, correspondendo a 38% de influência, sendo seguida pela desfocalização (21%) e pela velocidade de avanço (13%). A influência da combinação dos parâmetros é pequena, o que é desejável num conjunto de experimentos como este. É de se esperar que os resultados, com relação à influência de cada variável e sua interação com relação à severidade de interação, para ambos os materiais, sejam relativamente parecidos.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente neste trabalho as seguintes conclusões foram observadas:

1) Dentro dos parâmetros experimentais estabelecidos foi possível realizar tratamentos térmicos nos aços DP 600 e TRIP 750. Nos dois aços foi possível obter uma transformação de fase que levou à formação de microestruturas tipicamente martensíticas, muito diferentes das microestruturas do material-base;

2) Foram observadas, nos perfis de microdureza Vickers superficiais obtidos, regiões ao redor da área irradiada pelo feixe laser, nas quais a dureza diminuiu com relação ao material-base. Isso poderia ser atribuído ao revenimento da martensita presente originalmente nos dois materiais estudados, mas também à variabilidade implícita dos resultados do processo pode ter influenciado;

3) A dureza superficial dos materiais sofreu aumento pronunciado na área irradiada, em concordância com o tipo de microestruturas resultantes. No caso do aço DP 600 o aumento máximo experimentado foi em torno de 50%; já para o aço TRIP 750 verificaram-se aumentos acima de 100%;

4) De acordo com a geometria dos tratamentos térmicos propostos, foram geradas áreas com diferentes microestruturas e limites de resistência à tração, nas amostras utilizadas para ensaios de tração. Isso foi evidenciado pelo aspecto ondulado das regiões de fratura, nos corpos de prova;

5) A densidade de energia afeta a severidade dos efeitos físicos sobre os materiais, porém a densidade de potência também afeta estes resultados; isso foi verificado pela comparação de resultados para casos de ensaio com valores iguais de densidades de energia, mas com diferentes densidades de potência. Neste caso, com o aumento da densidade de potência os efeitos sobre os materiais foram mais pronunciados;

6) O efeito dos tratamentos térmicos conforme propostos foi muito mais pronunciado no aço TRIP 750 do que no aço DP 600; isso porque, de acordo com os parâmetros experimentais escolhidos, houve uma tendência de se promover a têmpera nos dois materiais. A composição do aço TRIP, com relação a elementos de liga que promovem a endurecibilidade do material, favorece esse efeito;

7) O limite de escoamento aumentou em ambos os materiais, devido ao aumento na fração de microconstituintes mais duros, por exemplo a martensita. Já o limite de resistência à tração foi aumentado apenas no aço TRIP 750. Isso foi atribuído à presença de áreas muito pouco ou em nada afetadas pelo tratamento térmico, no caso do aço DP 600;

8) O parâmetro de maior influência no processo, considerando-se a severidade de interação, que foi o meio proposto para a quantificação dos efeitos, é a potência nominal do feixe. O controle da potência do feixe e da desfocalização reduz em aproximadamente 59% a variabilidade da severidade de interação.

4. REFERÊNCIAS

- Anazawa, R. M. “Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica”. 2007. 193 p. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- Asadi, M.; Frommeyer, G.; Aghajani, A.; Timokhina, I.; Palkowski, H. “Local laser heat treatment in dual-phase steels”. 2012. Metallurgical and materials transactions A, 1244-volume 43A.
- ASTM E8/E8M-11 – Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2012. ASTM American Society for Testing and Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM E384 – 11e1. Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials. 2011. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- Baumann, M.; Krause, V.; Bergweiler, G.; Flaischerowitz, M.; Banik, J. “Local heat treatment of high strength steels with zoom-optics and 10 kW-diode laser”. 2012. Proc. of SPIE Vol. 8239.
- Cottrell, A.H.; Bilby, B. “Dislocation theory of yielding and strain aging of iron”. 1949. Proc. Phys. Soc., 62A, 49.
- Farabi, N.; Chen, D.L.; Li, J.; Zhou, Y.; Dong, S.J. “Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints”. 2010. Materials Science and Engineering A 527. pp. 1215-1222.
- Gorni, A.A. “Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas”. 2008. Corte & Conformação de Metais, 4:44, p. 26-57.
- Grajcar, A.; Rózanski, M.; Kaminska, M.; Grzegorzczak, B. “Study on non-metallic inclusions in laser-welded TRIP-aided Nb microalloyed steel”. 2014. Archives of metallurgy and materials, v. 59, issue 3.
- Ion, J.C. Laser processing of engineering materials. 2005. Oxford, UK. Elsevier Butterworth-Heinemann, 556p.
- Kantovicki, A.R. “Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga TRIP 800”. 2005. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Keeler, S.; Kimchi, M. (editores). “Advanced high-strength steels application guidelines v.5.0”. 2014. WORLDAUTOSTEEL. Middletown, OH.
- Ki, H.; So, S. “Process map for laser heat treatment of carbon steels”. 2012. Optics & Laser Technology 44. pp. 2106–2114.
- Lepera, F. S. “Improved etching technique for the determination of percent martensite in high-strength dual-phase steels”. 1979. Metallography, vol. 12, pp. 263 – 268.
- Moen, R. D.; Nolan, T. W.; Provost, L. 1999. “Quality Improvement Through Planned Experimentation”. McGraw Hill.
- Neugebauer, R.; Scheffler, S.; Poprawe, R.; Weisheit, A. “Local laser treatment of ultra high strength steels to improve formability”. 2009. Prod. Eng. Res. Devel., v 3, p. 347-351.
- Oliver, S.; Jones, T.B.; Fournalis, G. “Dual phase versus TRIP steels: Microstructural changes as a consequence of quase-static and dynamic tensile testing”. 2007. Material Characterization 58, p. 390-400.
- Svelto, O. “Principles of lasers”. 2004. 4ª Ed., Springer, New York.
- Timokhina, I.; Hodgson, P.; Pereloma, E.V. “Effect of microstructure on the stability of retained austenite in transformation-induced-plasticity steels”. 2004. Metallurgical and materials transactions. A, Physical metallurgy and materials science, vol. 35A, no. 8, pp. 2331-2341.

5. DIREITOS AUTORAIS

STUDY OF THE INFLUENCY OF THE LOCAL LASER TREATMENT ON THE CHARACTERISTICS OF THE ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS DP 600 AND TRIP 750

Marcelo Soares Amorim, marcelo.amorim@anac.gov.br¹

Fernando de Azevedo Silva, fazevedo@feg.unesp.br²

Davi Neves, davis@ieav.cta.br³

¹National Civil Aviation Agency, Airworthiness Superintendency, Rua Laurent Martins, 209, São José dos Campos –

²São Paulo State University “Julio de Mesquita Filho” – Campus Guaratinguetá, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410

³Advanced Studies Institute, DCTA, Trevo Cel. Av. José Alberto Albano do Amarante, 1, São José dos Campos – SP, CEP 12228-001

Abstract. *The advanced high strength steels are of importance in modern mobility industry. In the automotive industry, for example, it is anticipated that the use of these materials will grow considerably in the next years. Some characteristics of these materials can be improved through heat treatment, considering the entire mass of a given product or in specific regions of a part, for which it is necessary a particular mechanical behavior. This paper proposed the initial investigation of the effects of a local heat treatment by laser radiation, a controlled form of energy addition, in the mechanical properties and microstructures of two of these materials. The studied materials were the Dual Phase steel (DP 600) and the Transformed Induced Plasticity steel (TRIP 750), and the desired contribution here was to provide information about the interaction between the laser radiation and the materials within certain thermal processing parameters. For the characterization of materials, as received and after thermal laser treatment, metallographic analyzes were carried out, in addition to hardness and tensile tests. It was also proposed a method for quantitative assessment of the effects of the addition of laser energy on the materials, based on the variation of surface hardness after treatments. It was found that, for the range of experienced process parameters, there were significant changes in the characteristics of the studied materials, notably an increase in surface hardness, reaching values corresponding to twice of those for materials without treatment, an increase in yield limits, of up to 15% with respect to the base material, and strength limits, with increases up to about 30% with respect to the base material. On the other hand, there was a decrease in the specific elongation of the material, when subjected to tensile tests, up to 80% compared to material without thermal treatment.*

Keywords: *mechanical characterization, laser heat treatment, advanced high strength steels, multiphase steels.*

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.