

O FENÔMENO DO ESCOAMENTO DESCONTÍNUO

Alguns materiais apresentam o escoamento descontínuo, em que o início do escoamento é caracterizado por uma queda na tensão acompanhada de uma grande deformação. Neste caso, pode-se definir os limites de escoamento superior e inferior, bem como o alongamento no escoamento. Este fenômeno foi descoberto originalmente em aços de baixo carbono. Geralmente é acompanhado da formação, no corpo-de-prova, de bandas de escorregamento que formam um ângulo de aproximadamente 45° com o eixo de tração e são denominadas Bandas de Lüders. Observe as Figuras 1 e 2 a seguir. Elas correspondem a resultados de ensaios realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMAR/FAENQUIL, em amostras de titânio comercialmente puro e de aço de baixo carbono, respectivamente. A Figura 3 é uma ampliação da parte da Figura 2 em que os pontos experimentais correspondentes ao escoamento descontínuo foram captados.

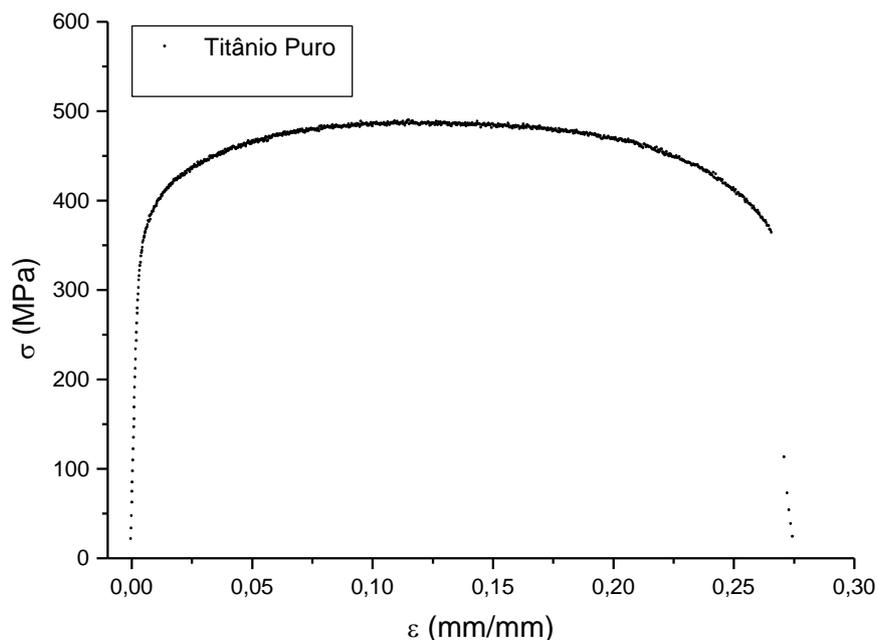


Figura 1 – Ensaio de tração do titânio de pureza comercial (ASTM grade II)

O escoamento descontínuo pode ser observado ou não, dependendo de condições do ensaio como rigidez da máquina, alinhamento do corpo-de-prova, temperatura suficientemente baixa e taxa de deformação suficientemente alta. Valores usuais do limite de escoamento superior são de 10 a 20% maiores que o limite de escoamento inferior, mas pode haver situações em que um seja o dobro do outro.

A conhecida explicação para o escoamento descontínuo em termos do bloqueio das discordâncias pela interação com átomos intersticiais, como C e N (estes átomos, que constituem as chamadas “atmosferas de Cottrell”, se difundem rapidamente para posições de mínima energia), foi um dos primeiros sucessos da teoria das discordâncias.

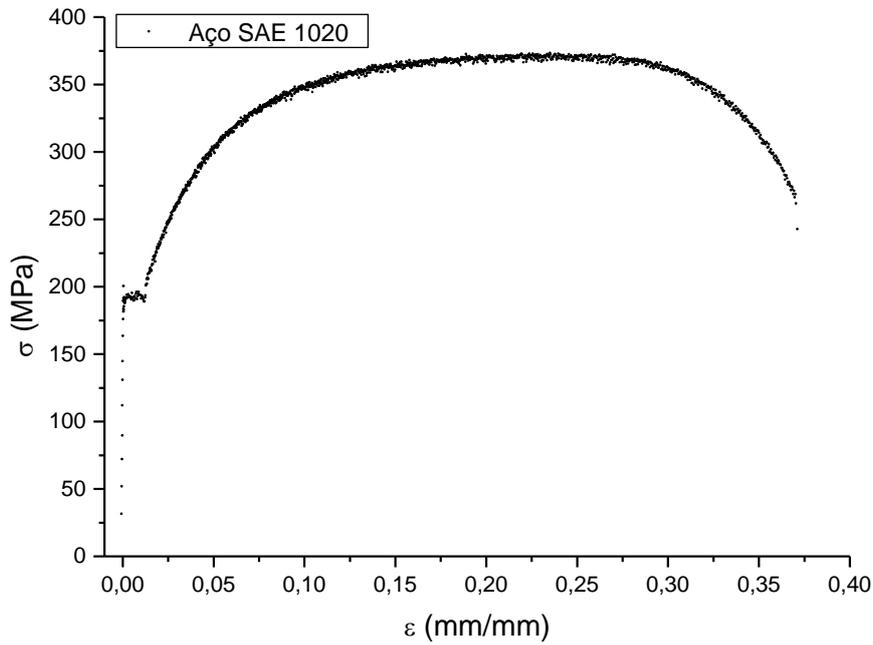


Figura 2 – Ensaio de tração em amostra de aço de baixo carbono.

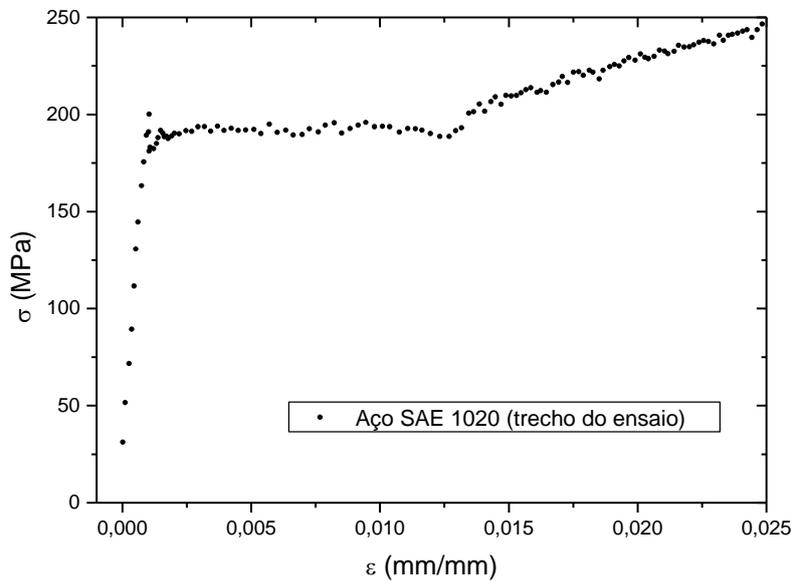


Figura 3 – Região do escoamento descontínuo e início do encruamento

A associação com as pequenas quantidades dos intersticiais C e N no aço pôde ser feita porque observou-se experimentalmente que a remoção destas impurezas por tratamento térmico em atmosfera controlada suprimia o escoamento descontínuo. Além, disso, a adição de apenas 0,001% desses elementos é suficiente para ocorrer novamente o fenômeno.

Porém, à medida em que o escoamento descontínuo foi descoberto em outros metais e ligas, passou a ser aceito como um fenômeno mais geral. Além do ferro e aço, o escoamento descontínuo foi observado em molibdênio policristalino, titânio e ligas de alumínio. Além disso, pode aparecer em monocristais de Fe, Cd, Zn, Al e latão.

O escoamento descontínuo foi notado também em cristais de LiF, Ge e *whisquers* de Cu. Nesses materiais, a densidade de discordâncias é baixa, e o bloqueio por átomos de impureza não explica o fenômeno. Assim, uma nova teoria foi desenvolvida por Johnston e Hahn para o caso geral de materiais em que a tensão diminui rapidamente após o início do escoamento.

Sabe-se que a taxa de deformação plástica é proporcional ao produto de três fatores, como mostrado abaixo:

$$\dot{\epsilon}_p \propto Nb\bar{v}$$

onde: N é o número de discordâncias móveis por unidade de área,
b é o vetor de Burgers,
v é a velocidade média das discordâncias.

A densidade de discordâncias N aumenta com a deformação e a velocidade média depende da tensão aplicada. Stein, Low, Gilman, Johnston e outros demonstraram que a velocidade das discordâncias aumenta com o aumento da tensão, da forma mostrada na expressão a seguir:

$$\bar{v} = \left(\frac{\tau}{D} \right)^m$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento,
D, m são propriedades do material.

Para materiais com baixa densidade inicial de discordâncias, ou com forte bloqueio das mesmas (como no ferro), a única maneira de impor uma alta taxa de deformação é ter alta velocidade de discordâncias. Mas altas velocidades só podem ser atingidas em altas tensões. Porém, quando algumas discordâncias começam a se movimentar (ou seja, início do escoamento), elas começam a se multiplicar e N aumenta rapidamente. Embora isto cause algum encruamento, este é compensado pelo fato de que, com N maior, a velocidade pode ser menor e desta forma (como a velocidade se relaciona com a tensão) cai a tensão necessária para mover as discordâncias. Isto explica porque a tensão requerida para deformar o material pode cair após o escoamento ter começado. Dependendo das propriedades do material, este poderá ou não apresentar o escoamento descontínuo. Na continuidade do ensaio, haverá a predominância do encruamento e a tensão voltará a subir.