

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Representação esquemática de uma turbina a gás.....	02
2.1 - Curva típica de fluência com a designação dos três estágios.....	04
2.2 - Corpo de prova padrão para ensaios de tração com seção reta circular.....	05
2.3 – Influência da tensão σ e da temperatura T sobre o comportamento em fluência de materiais.....	06
2.4 – Tensão em função do tempo de vida até a ruptura para uma liga carbono-níquel com baixo teor de liga a três temperaturas diferentes.....	06
2.5 – Curva típica de fluência mostrando os três estágios do processo. Curva A, ensaio de carga constante; curva B, ensaio de tensão constante.....	07
2.6 – Representação esquemática da fluência por difusão em uma microestrutura de grãos.....	10
2.7 – Fluxo de vazios resultando em aumento de comprimento de grão.....	11
2.8 – Ativação térmica do movimento de uma discordância em cunha.....	12
2.9 – Três etapas do movimento de uma discordância em cunha.....	13
2.10 – Representação esquemática das mudanças de discordâncias durante a fluência.....	14
2.11 – Representação esquemática da formação de dobra num ponto triplo da microestrutura de grãos.....	15
2.12 – Energia de ativação para fluência em monocristais de alumínio.....	18
2.13 – Variação da tensão local e a densidade de discordâncias em regiões “duras” (paredes da célula) e “moles” (interior da célula) durante fluência.....	19
2.14 – Curva força/distância para uma discordância superar uma barreira ABCDE.....	19
2.15 – Representação esquemática de uma escalagem de discordância.....	20
2.16 – Curvas de tensão em função do parâmetro de Larson-Miller para um ferro S-590.....	21

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	iii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	iv
1.INTRODUÇÃO	01
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	03
2.1 Aspectos Gerais do Fenômeno da Fluência.....	03
2.2 O Ensaio de Fluência.....	04
2.3 Efeitos da Tensão e da Temperatura	05
2.4 Comportamento das Curvas de Fluência	07
2.4.1 Estágio I.....	07
2.4.2 Estágio II	07
2.4.3 Estágio III	08
2.5 O Comportamento dos Materiais em Temperaturas Altas	08
2.6 Mecanismos Responsáveis pela Deformação por Fluência.....	10
2.6.1 Fluência por Difusão	10
2.6.2 Fluência por Deslizamento e Escalagem de Discordâncias	12
2.6.3 Fluência por Deslizamento de Contorno de Grão	14
2.7 A Lei de Potência.....	16
2.8 Energia de Ativação para o Estado de Equilíbrio em Fluência	17
2.9 Teorias de Fluência.....	18
2.10 Apresentação dos Dados Experimentais de Fluência para Engenharia.....	20
2.10.1 Métodos para Extrapolação de Dados	20
2.10.2 Ligas Metálicas Resistentes à Fluência	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção transversal, constante característica do material
- A_0 - Área inicial, constante característica do material
- B, B_0 - Constantes características do material
- b - Vetor de Burgers, constante característica do material
- C - Constantes características do material
- D - Coeficiente de difusão
- d - Tamanho médio de grão, constante característica do material
- D_0 - Fator de frequência
- D_{cg} - Coeficiente de difusão ao longo dos contornos granulares
- D_v - Coeficiente de autodifusão
- G - Módulo de elasticidade transversal
- k - -constante de Boltzman, constante relativa ao estágio primário
- n - Expoente de tensão
- Q_c - Energia de ativação para fluência
- Q_{id} - Energia de ativação para interdifusão de átomos de soluto
- Q_{sd} - Energia de auto-difusão na rede cristalina
- R - Constante universal dos gases
- T - Temperatura absoluta
- t - Tempo
- T_f - Temperatura absoluta de fusão do material base
- t_f - Tempo correspondente à fratura do material
- ϵ - Deformação verdadeira, deformação total
- ϵ_0 - Deformação instantânea

- $\dot{\epsilon}$ - Taxa de deformação
- $\dot{\epsilon}_s$ - Taxa de fluência estacionária
- $\dot{\epsilon}_{s,\sigma}$ - Taxa de acomodação
- $\dot{\epsilon}_{s,k}$ - Taxa mínima de fluência ao longo dos contornos de grão
- σ - Tensão aplicada

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ASTM - American Society for Testing and Materials
EDE - Energia de Defeito de Empilhamento

1. INTRODUÇÃO

Fluência é a deformação lenta e contínua de um sólido com o tempo. Em geral, fluência é uma função complexa de tensões, tempo, temperatura, tamanho, forma e distribuição de tamanhos dos grãos, fração volumétrica, viscosidade da fase vítrea dos contornos de grãos e mobilidade das discordâncias^[1].

O comportamento dos metais em alta temperatura está intimamente relacionado com a presença de imperfeições cristalinas, devido à maior mobilidade atômica, e conseqüentemente aos processos que envolvem o fenômeno da difusão. As temperaturas elevadas aumentam a capacidade de movimentação de discordâncias e podem ativar outros mecanismos responsáveis pelo processo de deformação, como a possibilidade de operação de novos sistemas de deslizamento e a deformação localizada ao longo dos contornos de grãos. As condições ambientais, a exemplo dos meios agressivos, exercem uma forte influência no comportamento da grande maioria das ligas, principalmente quando conjugadas com processos que envolvem a instabilidade metalúrgica, conduzindo um componente estrutural a uma possível falha de forma prematura.

O fenômeno de fluência consiste no acúmulo lento e progressivo de deformação ao longo do tempo, manifestando-se em todos os sólidos cristalinos em condições favoráveis de temperatura e tensão^[2].

Tipicamente, a fluência de um sólido é calculada pela medição da deformação como função da carga ou tensão aplicada. É aplicada uma carga estática sobre uma amostra em temperaturas elevadas (da ordem de 0,4 a 0,7 $T_{\text{fusão}}$), medindo-se a deformação como função do tempo.

A importância técnica do fenômeno de fratura por fluência tornou-se evidente a partir da metade do século passado, sendo reconhecida como um dos maiores problemas da área industrial, devido ao crescente nível de exigência das condições de operação empregadas em usinas de geração de energia, instalações químicas e em componentes estruturais desenvolvidos junto às indústrias aeroespaciais^[3]. Desta maneira, os estudos dos materiais usados nestes componentes passaram a exigir cada vez mais sofisticadas tecnológicas, aprimoramentos nos ensaios experimentais (destrutivos e não destrutivos), e uma constante busca de uma vasta base de dados. Tais bases, associadas aos métodos matemáticos e computacionais, podem conduzir a um melhor entendimento de todos os fenômenos estruturais que podem ocorrer nos materiais, quando, por exemplo, submetidos à tensões em regimes de temperaturas elevadas^[2].

Em condições reais de serviço, os componentes de uma forma geral operam em regimes complexos de tensão e de temperatura, podendo atingir condições de carga e temperatura variáveis, sendo projetados para tempos de serviços da ordem de 10.000 a 250.000 horas. Entretanto, ao nível laboratorial, os ensaios de fluência são realizados por períodos mais curtos de tempo, surgindo, portanto a necessidade de técnicas de extrapolação dos resultados obtidos para situações reais de trabalho^[4, 5].

No caso específico dos metais, a complexidade metalúrgica de muitas ligas comerciais exige um conhecimento exato dos micromecanismos que controlam o processo de fluência, tanto para a elaboração de equações constitutivas, quanto para as técnicas de extrapolação atualmente utilizadas^[6].

Os métodos mais comuns de avaliação do comportamento de um sólido cristalino em alta temperatura envolvem, geralmente, procedimentos gráficos e analíticos, através de análises estatísticas ou pela elaboração de equações empíricas simples que relacionam a deformação ou a taxa de fluência à tensão e à temperatura constante. Através destes procedimentos e pela forma como os dados geralmente são apresentados, é comum a perda de uma gama de informações sobre o fenômeno, resumindo-se aos valores de taxa mínima, tempo de ruptura e deformação correspondente à fratura final. Isto resulta, de forma preponderante, na perda de informações

relativas às regiões primária e terciária, as quais dominam o comportamento em fluência de muitas ligas metálicas em engenharia^[7].

Em muitos projetos, a taxa mínima de deformação é encarada como o parâmetro mais representativo do comportamento em fluência. Entretanto, quando determinado percentual de deformação torna-se um fator que limita a vida útil em determinadas condições, a fluência primária normalmente negligenciada, passa a exercer um papel fundamental. Da mesma forma, no caso de parâmetros como a deformação ou o tempo correspondentes à fratura seja um forte limitante da vida útil do material, o estágio terciário, que prevalece em muitas ligas de aplicação em engenharia, deve ser considerado devido a sua relevante importância^[8].

Os critérios de seleção, especificamente para componentes estruturais aeronáuticos, envolvem a relação custo/benefício e a eficiência estrutural, as quais requerem estruturas mais leves, geralmente abrangendo um grupo de ligas à base de titânio, alumínio e magnésio^[2].

A indústria aeroespacial absorve 75% da produção mundial de titânio, sendo a liga Ti-6Al-4V uma das mais versáteis. Uma das características que mais tem contribuído para o crescimento do uso do titânio e suas ligas para fins estruturais é o seu alto ponto de fusão. Sua utilização concentra-se em temperaturas atingidas por componentes aeroespaciais em serviço, onde as resistências à fluência, à fadiga e à degradação são consideradas essenciais para suas aplicações em altas temperaturas^[9]. Desta maneira, em aplicações convencionais e condições em que as ligas à base de alumínio e ligas à base de magnésio não sejam satisfatórias, as ligas de titânio normalmente são empregadas, apresentando uma performance competitiva com as ligas à base de níquel^[3].

Existem muitos exemplos práticos onde diversos materiais são usados para trabalhar sob carregamento por longos períodos de tempo em altas temperaturas. Podemos considerar as palhetas da turbina em uma aeronave, mostrada na Figura 1.1.

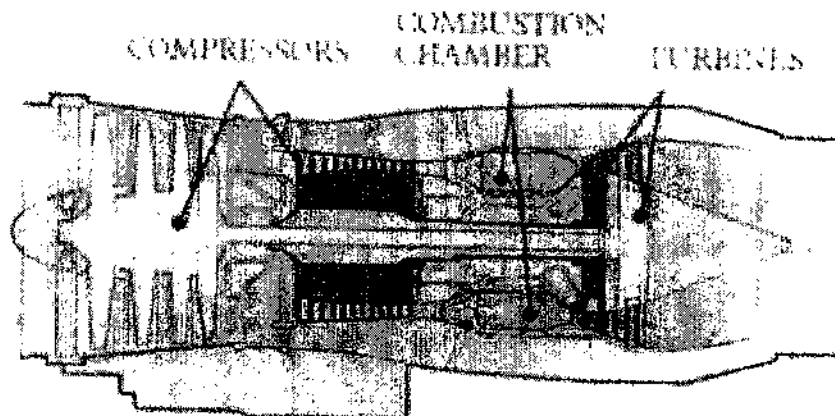


Figura 1.1 Representação esquemática de uma turbina a gás^[10].

Nos modernos motores a jato, os materiais dos quais as palhetas de turbina são feitas, devem ser capazes de trabalhar sob tensão em temperaturas de aproximadamente 1027°C no mínimo, por milhares de horas entre as inspeções do motor^[10].

Na seleção dos materiais para uso em altas temperaturas de serviço, muitos fatores devem ser considerados. Incluem-se, neste caso, o custo do material, facilidade de manufatura dos componentes, densidade do material, resistência de ataque do meio ambiente sob condições normais de operação e a capacidade de resistir às distorções ou ruptura durante o serviço. Na avaliação da resistência de materiais para a deformação e a ruptura, em tempos longos sob carregamento em altas temperaturas, particular atenção deve ser dada a um fenômeno conhecido como *fluência*^[10].

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ASPECTOS GERAIS DO FENÔMENO DA FLUÊNCIA

A fluência é caracterizada por um escoamento lento do material. Sob esse ponto de vista, o material tem um comportamento viscoso. Caso um componente mecânico esteja submetido à carga trativa constante, a diminuição da área da seção transversal gera um aumento na tensão. Quando é alcançado o ponto em que o material não pode mais resistir estaticamente à carga aplicada, ocorre a sua ruptura^[1].

A fluência é definida como sendo a deformação permanente e dependente do tempo de materiais, quando estes são submetidos a uma carga ou tensão constante. Geralmente a fluência é um fenômeno indesejável e, com frequência, é fator de limitação na vida útil de uma peça. Ela é observada em todos os tipos de materiais e para os metais, ela se torna importante apenas em temperaturas superiores à aproximadamente $0,4 T_f$ (T_f é a temperatura absoluta de fusão)^[12]. Assim, a temperatura ambiente é alta para o chumbo cuja fusão é 327°C , mas baixa para cobre que funde em 1083°C . Então, os tubos de chumbo em prédios antigos são geralmente encontrados deformados devido à fluência na temperatura ambiente. No entanto, problemas relacionados à fluência não são encontrados em tubos de cobre, amplamente usados em sistemas de aquecimento centrais domésticos que operam em aproximadamente 77°C . Embora a fluência atue em todas as temperaturas acima do zero absoluto, em geral, os problemas associados com a excessiva distorção de fluência ou eventual ruptura são observados após longos períodos de serviço experimentados apenas em altas temperaturas^[10].

O ensaio de fluência é realizado em temperaturas altas (e constantes) e com uma tensão aplicada constante. Como a seção do corpo de prova diminui durante o ensaio, dificultando a manutenção de uma tensão constante, é mais comum realizar-se o ensaio com carga constante^[13]. No ensaio de fluência, mede-se o alongamento do corpo de prova em função do tempo. O regime de temperatura em que a fluência se torna um fenômeno de importância é $0,5 T_f < T < T_f$. Esta é a faixa de temperatura em que a difusão se torna um fator significativo. A difusão, sendo um processo termicamente ativado, apresenta uma dependência exponencial com a temperatura. Abaixo de $0,5 T_f$, a velocidade de difusão é tão lenta, que a influência deste fator pode ser desprezada^[11]. A temperatura crítica para que a fluência comece a ser significativa varia de material para material. Por exemplo, enquanto o chumbo apresenta deformação por fluência na temperatura ambiente, no ferro este fenômeno só se torna importante acima de cerca de 600°C .

O comportamento dos metais em alta temperatura está intimamente relacionado com a presença de imperfeições cristalinas, devido à maior mobilidade atômica e conseqüentemente aos processos que envolvem o fenômeno de difusão. As temperaturas elevadas aumentam a capacidade de movimentação de discordâncias e podem ativar outros mecanismos responsáveis pelo processo de deformação, como a possibilidade de operação de novos sistemas de deslizamento e a deformação localizada ao longo dos contornos de grãos. As condições ambientais, a exemplo dos meios agressivos, exercem uma forte influência na grande maioria dos metais e ligas, principalmente quando associadas com os processos que envolvem a instabilidade metalúrgica, conduzindo um componente estrutural a uma possível falha de forma prematura^[2].

Apesar da fluência já ser conhecida desde 1834, quando Vicat fez as primeiras experiências constatando o fenômeno, foi somente no século XX que investigações sistemáticas foram realizadas. As curvas de fluência podem, em geral, ser classificadas em três estágios: I, primário ou transiente; II secundário, de taxa constante, ou quase-viscoso; III ou terciário. Esta divisão em estágios foi feita por Andrade^[11], um dos pioneiros do estudo da fluência. O estágio II, em que a taxa de deformação é constante, é o mais importante. Essa taxa de fluência é também conhecida como taxa mínima de fluência e corresponde ao ponto (ou região) de inflexão

da curva. No estágio III, há uma aceleração da taxa de deformação levando a uma eventual ruptura do corpo de prova. No ensaio de fluência em tensão constante, a carga deve diminuir à medida que a seção transversal diminui, de tal modo que a tensão permaneça constante. Em ensaios de fluência em carga constante, a tensão aumenta continuamente devido ao decréscimo da área da seção transversal do corpo de prova. Em deformação plástica, o volume do corpo de prova é admitido como constante e um aumento de comprimento resulta em um decréscimo da área^[11]. A Figura 2.1 apresenta uma curva típica de fluência com a designação dos estágios.

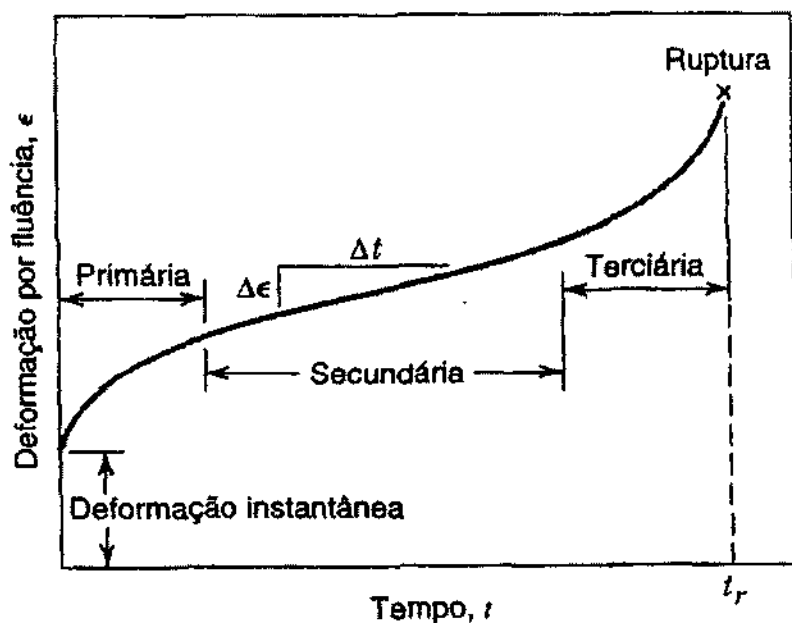


Figura 2.1: Curva típica de fluência com a designação dos estágios^[12].

2.2. ENSAIO DE FLUÊNCIA

Um ensaio típico de fluência (Norma ASTM E139) consiste em se submeter um corpo de prova a uma carga ou tensão constante. A deformação é medida e plotada como uma função do tempo decorrido. A maioria dos ensaios é do tipo com carga constante, os quais fornecem informações de uma natureza que pode ser empregada na engenharia. Por outro lado, os ensaios com tensão constante são empregados para proporcionar uma melhor compreensão dos mecanismos de fluência^[12].

A curva de fluência resultante consiste em três regiões, cada uma das quais possuindo a sua própria característica distinta de deformação-tempo. Com a aplicação da carga ocorre uma deformação instantânea no material, e esta é essencialmente elástica. As demais regiões da curva de fluência estão associadas à deformação plástica ou permanente. A *fluência primária ou transiente* ocorre em primeiro lugar, caracterizada por uma taxa de fluência continuamente decrescente; isto é, a inclinação da curva diminui ao longo do tempo. Isso sugere que o material está experimentando um aumento na resistência à fluência ou encruamento, ou seja, a deformação se torna mais difícil à medida que o material é deformado. Para a *fluência secundária*, algumas vezes conhecida como *fluência em regime estacionário*, a taxa de deformação é constante; isto é, o gráfico se torna linear. Em geral, este estágio comportamento em fluência apresenta a duração mais longa em relação aos demais. A constância da taxa de fluência é explicada com base em um equilíbrio entre os processos concorrentes de encruamento e de recuperação, sendo o processo de recuperação um processo pelo qual o material se torna

mais macio e retém a sua habilidade em experimentar deformação. Finalmente, no estágio chamado de *fluência terciária*, ocorre uma aceleração da taxa de deformação e, por fim, a fratura. Essa falha do material é conhecida freqüentemente por *ruptura* e resulta de falhas microestruturais, como por exemplo, a separação do contorno de grão, e a formação de trincas, cavidades e vazios internos. Para carregamentos em tração, pode ocorrer a formação de um pescoço em algum ponto no interior da região de deformação. Todos estes efeitos resultam em uma diminuição da área da seção reta efetiva e em um aumento na taxa de deformação. Para os materiais metálicos, a maioria dos ensaios de fluência é realizada sob tração uniaxial, usando um corpo de prova que possui a mesma geometria usada para os ensaios em tração^[12], como é mostrado na Figura 2.2.

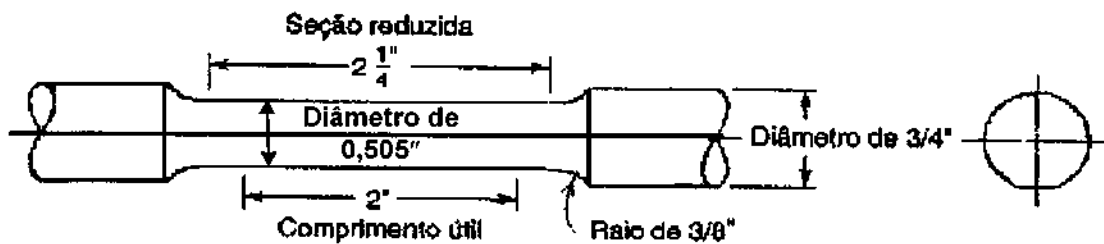


Figura 2.2 Corpo de prova padrão para ensaios de tração com seção reta circular^[12].

Por outro lado, ensaios de compressão uniaxial são mais apropriados para materiais frágeis; esses proporcionam uma melhor medida das propriedades intrínsecas de fluência no que diz respeito ao fato de, em compressão, não ocorrem amplificações de tensão e propagação de trincas, como ocorre para ensaios em tração. Os corpos de prova para ensaios em compressão são geralmente cilindros retos ou paralelepípedos que possuem razões comprimento/diâmetro que variam entre aproximadamente 2 e 4. Para a maioria dos materiais, as propriedades de fluência são virtualmente independentes da direção do carregamento. Possivelmente, o parâmetro mais importante em um ensaio de fluência é a inclinação da região secundária da curva de fluência. Esta região é conhecida como *taxa mínima ou taxa de fluência em regime estacionário*. Este é o parâmetro de projeto de engenharia que é levado em consideração para aplicações de longo prazo, tais como, em um componente de uma usina de energia nuclear que esteja programado para operar por diversas décadas, ou quando a fratura ou uma deformação muito grande são fenômenos que não podem sequer ser considerados. Por outro lado, para muitas situações em fluência com vidas relativamente curtas (por exemplo, palhetas de turbinas em aeronaves militares e em motores de foguetes), o tempo de ruptura, ou o tempo de vida até a ruptura t_f , é a consideração predominante do projeto. Obviamente, para a sua determinação devem ser realizados ensaios de fluência até o ponto de fratura; esses são denominados *ensaios de ruptura por fluência*. Dessa forma, um conhecimento dessas características de fluência para um material permite ao engenheiro de projetos assegurar a sua adequação para uma aplicação específica^[12].

2.3. EFEITOS DA TENSÃO E DA TEMPERATURA

Tanto a temperatura quanto a quantidade tensão aplicadas influenciam o comportamento do material em fluência (Figura 2.3). Em uma temperatura substancialmente inferior a $0,4 T_f$, e após a deformação inicial, a deformação é virtualmente independente do tempo. Seja pelo aumento da tensão ou da temperatura, será observado o seguinte: (1) a deformação instantânea no momento da aplicação da tensão aumenta, (2) a taxa de fluência em regime estacionário é aumentada e (3) o tempo de vida até a ruptura é diminuído. Os resultados de ensaios de ruptura

por fluência são geralmente apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura. Um destes gráficos é mostrado na Figura 2.4, para uma liga de níquel, onde pode ser vista uma relação linear para cada temperatura. Para algumas ligas, a não-linearidade dessas curvas é observada ao longo de faixas de tensão relativamente extensas.

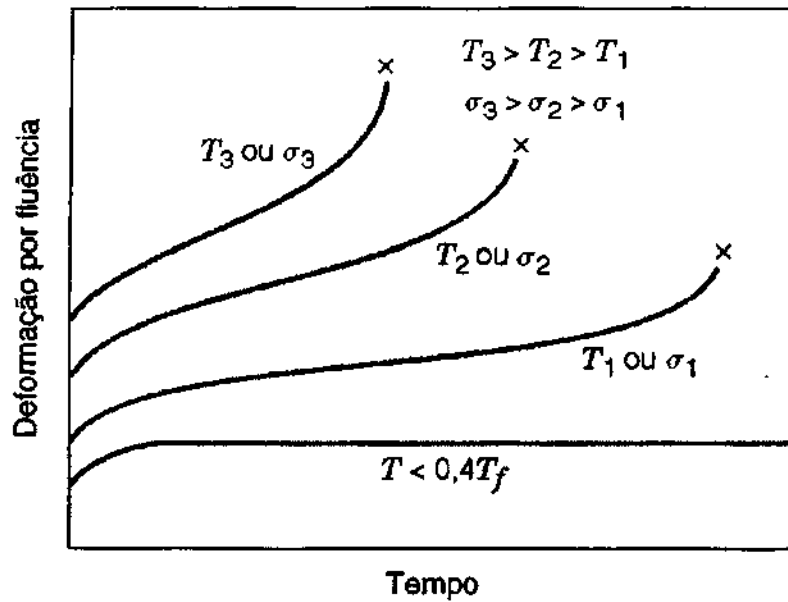


Figura 2.3 Influência da tensão σ e da temperatura T no comportamento em fluência de materiais^[12].

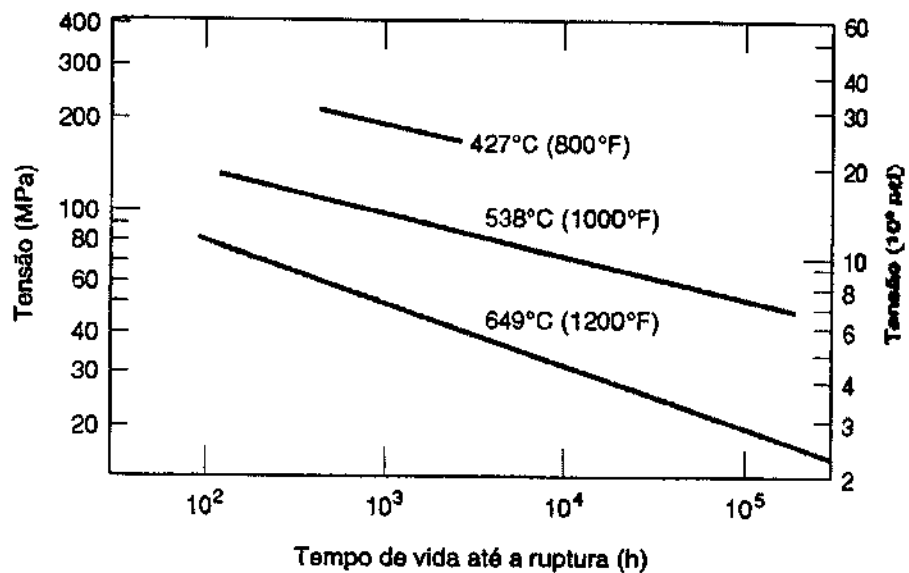


Figura 2.4 Tensão em função do tempo de vida até a ruptura para uma liga carbono-níquel com baixo teor de liga a três temperaturas diferentes^[12].

2.4. COMPORTAMENTO DAS CURVAS FLUÊNCIA

Na Figura 2.5 é mostrado o comportamento em fluência característico para metais e ligas.

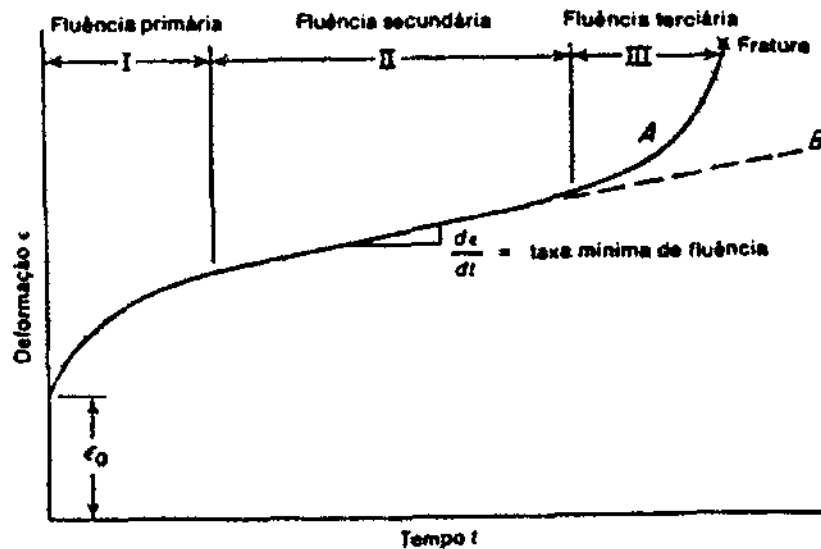


Figura 2.5 Curva típica de fluência mostrando os três estágios do processo^[15].

2.4.1. Estágio I

Ocorre um encruamento que diminui a velocidade de fluência no material. O escorregamento de discordância (deformação plástica) é impedido por barreiras (florestas ou empilhamento de discordâncias, precipitados, etc.) que surgem no decorrer do tempo. Portanto, quando se aplica uma tensão no metal em uma dada temperatura, as discordâncias são primeiramente impedidas de escorregar por pequenas barreiras. Depois por ativação térmica, elas conseguem vencer as barreiras, porém encontram novas barreiras maiores que só serão vencidas após tempos mais longos. Além disso, ainda ocorrem processos de recuperação devido à ascensão de discordâncias e alguns deslizamentos cruzados, principalmente quando a temperatura for suficientemente alta. A recuperação, neste estágio, é pequena, uma vez que o fator controlador deste estágio é o mecanismo de interseção das discordâncias com as barreiras^[14].

2.4.2. Estágio II

O processo de recuperação é suficientemente rápido para contrabalançar o encruamento. A recuperação significa a libertação de discordâncias dos obstáculos ou barreiras (florestas ou empilhamento de discordâncias, precipitados, etc.), por meio de ascensão ou deslizamento cruzado. A ascensão de discordâncias requer uma maior energia de ativação, e é o processo controlador da velocidade de fluência e depende da temperatura; quanto maior for a temperatura, maior será a recuperação e, portanto, menos estacionário será o estágio II. Em temperaturas muito altas o estágio II é mais curto, atingindo mais rápido o estágio III. A ascensão de discordâncias é feita por absorção e emissão de lacunas. A energia de ativação para esse

processo é, portanto a de difusão de lacunas. Desta forma, quanto maior for a energia de ativação, mais resistente o material será à fluência, pois para haver a ascensão, será necessário vencer uma barreira energética maior. Finalmente, tem-se outra contribuição importante, porém não predominante, para os processos de deformação, que é o deslizamento de contornos de grão. Esse deslizamento também pode criar lacunas que facilitam a ascensão de discordâncias. O deslizamento é um processo de cisalhamento que ocorre na direção dos contornos de grão, sendo que está relacionado com o aumento da temperatura e com tensões baixas. O fenômeno acontece intermitentemente com o tempo, fazendo com que a deformação não seja uniforme ao longo do contorno. A precipitação de partículas duras nos contornos de grão e a acomodação desses contornos em novas posições diminuem a velocidade de deslizamento. Quanto menor for o tamanho do grão de um metal ou liga, maior será a área dos contornos. Portanto, um refino dos grãos pode ser prejudicial à resistência à fluência, ou seja, o inverso observado na resistência à temperatura ambiente^[14].

2.4.3. Estágio III

Este estágio é caracterizado por uma grande movimentação das discordâncias, ocorrendo mais acentuadamente a estricção do corpo de prova ensaiado em tração. Ocorre também a nítida formação contínua de microtrincas no material. Estas microtrincas provêm de fenômenos de deformação localizados nos contornos de grão, ocasionando fratura intergranular. Em situações de altas tensões e temperaturas mais baixas, ocorrem pontos triplos formados onde três contornos de grão se encontram. O deslizamento dos contornos de grão resultam em tensões diversas suficientemente altas, que provocam o início de trincas. No caso de tensões baixas e temperaturas altas, formam-se pequenos poros (orifícios) nos contornos de grão na direção normal à tensão externa aplicada, que crescem e coalescem devido à concentração de lacunas. Quando em altas temperaturas ou se ocorrer a migração de contornos de grãos para alívio de tensões, também pode ocorrer o aparecimento de fraturas transgranular (no interior dos grãos). Em certos casos, também pode ocorrer fratura transgranular em temperaturas relativamente baixas e em velocidades de fluência altas, analogamente às fraturas dúcteis comuns^[14].

2.5. COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS EM TEMPERATURAS ALTAS

A resistência dos metais diminui com o aumento da temperatura. Uma vez que a mobilidade dos átomos cresce rapidamente com a temperatura, deve-se esperar que, neste caso, os processos controlados por difusão exerçam um efeito muito significativo sobre as propriedades mecânicas. Temperaturas altas também resultam numa maior mobilidade das discordâncias devido ao mecanismo de escalagem, que se torna importante devido à maior facilidade de difusão e também devido ao aumento do número de lacunas em equilíbrio com a temperatura. Em temperaturas elevadas podem tornar-se operativos novos mecanismos de deformação. Em alguns metais, com o aumento da temperatura, o sistema de deslizamento muda, ou são introduzidos sistemas de deslizamento adicionais. A deformação nos contornos de grão torna-se uma possibilidade adicional na deformação dos metais em temperaturas elevadas. Um outro fator importante a se considerar é o efeito da exposição prolongada de ligas e metais a temperaturas altas.

Sabe-se, por exemplo, que os metais trabalhados a frio, durante o processo de fluência irão se recristalizar e experimentar crescimento de grão. No entanto, as ligas endurecidas por envelhecimento podem sofrer superenvelhecimento e perder a resistência mecânica à medida que as partículas de segunda fase crescem. Uma outra consideração importante é a interação da superfície do metal com o meio ambiente em altas temperaturas, pois devem ser evitadas a oxidação catastrófica e a penetração intergranular de óxido. Desta forma, pode-se constatar que a

superfície do metal com o meio ambiente em altas temperaturas, pois devem ser evitadas a oxidação catastrófica e a penetração intergranular de óxido. Desta forma, pode-se constatar que a utilização adequada dos metais em temperaturas elevadas envolve diversos problemas. Vários metais com suas propriedades melhoradas em temperaturas altas foram produzidos pelos programas tremendamente acelerados de desenvolvimento de ligas, mas a demanda sempre crescente da tecnologia moderna exige materiais com resistência mecânica e resistência à oxidação ainda maiores. Durante um longo tempo as principais aplicações em temperaturas altas estiveram associadas com a instalação de máquinas a vapor, refinarias de petróleo e indústrias químicas. A temperatura de operação raramente excedia 550°C, em equipamentos tais como caldeiras, turbinas a vapor e unidades de craqueamento. Com a introdução da turbina a gás, foram necessários desenvolvimentos que permitissem a operação de componentes criticamente tencionados, como as palhetas de turbinas, em temperaturas de cerca de 800°C. Os projetos de máquinas com potências maiores excederam este limite para cerca de 925°C.

A forte dependência da resistência com o tempo torna-se importante para materiais diferentes em temperaturas também diferentes. O que é considerado temperatura alta para um metal pode não ser para outro. Para compensar este fato, a temperatura é muitas vezes expressa como uma temperatura homóloga, isto é, a razão entre a temperatura do ensaio e a temperatura de fusão do metal em questão, ambas em unidade absoluta. De uma maneira geral, o comportamento em fluência atinge significância na engenharia para temperaturas homólogas superiores a 0,5. Os ensaios utilizados para a medição da resistência mecânica em temperaturas altas devem ser selecionados com base na escala de tempo de serviço que o material deve suportar. Então, um ensaio de tração em temperatura alta pode fornecer informações de grande utilidade sobre o desempenho em temperatura alta de um componente, cujo tempo de serviço seja curto, como um foguete ou a ogiva de um projétil. No entanto, será obtida somente uma pobre informação sobre o desempenho de uma tubulação de vapor, a qual necessita suportar 100000 h de serviço em temperaturas elevadas. Desta forma, serão necessários ensaios especiais para avaliar o desempenho dos materiais em tipos diferentes de serviço em temperaturas altas. O *ensaio de fluência* mede as variações dimensionais que ocorrem devido à exposição a temperaturas elevadas, enquanto que o *ensaio de ruptura por fluência* mede o efeito da temperatura na capacidade do material suportar carregamento por longos tempos. A perfeita distinção entre os três estágios de fluência depende fortemente da tensão aplicada e da temperatura. Ao se construir uma curva de fluência, constitui prática usual manter a carga constante ao longo de todo o ensaio. Assim sendo, à medida que o corpo de prova se alonga e sofre a diminuição de sua seção transversal, a tensão axial aumenta. O valor anunciado da tensão de ensaio é na verdade o valor da tensão inicial aplicada ao corpo de prova. No entanto, já foram desenvolvidos métodos para compensar as variações das diminuições do corpo de prova, a fim de se realizar o ensaio em tensão constante. Nos ensaios realizados sob tensão constante não se observa a região de taxa de fluência acelerada (região III) e a curva obtida é similar à curva B da Figura 2.5. No entanto, quando ocorrem mudanças microestruturais no metal, pode-se observar a fluência acelerada em ensaios sob tensão constante. A curva B pode ser considerada representativa da curva básica de fluência para um metal. A deformação representada por ϵ_0 ocorre quase que instantaneamente com a aplicação da carga. Mesmo que a tensão aplicada esteja abaixo do limite de escoamento, nem toda a deformação instantânea é elástica. A maior parte desta deformação é recuperada instantaneamente com a retirada de carga (elástica), enquanto uma segunda parte é recuperada com o tempo (anelástica) e o resto não se recupera (plástica). Embora a deformação instantânea não seja realmente fluência, ela é importante porque pode constituir uma fração considerável da deformação total permitida em componentes de máquinas. Algumas vezes a deformação instantânea é subtraída da deformação total do corpo de prova, para que se tenha somente a deformação devido à fluência. Este tipo de curva de fluência parte da origem das coordenadas [15].

2.6. MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA DEFORMAÇÃO EM FLUÊNCIA

Com o desenvolvimento da microscopia eletrônica de transmissão, foi possível a realização de estudos diretos da estrutura de discordâncias dos metais deformados. Estas investigações indicaram que, para uma gama muito grande de metais, existe uma relação simples entre a densidade de discordâncias e a tensão de deformação plástica de um metal. O encruamento dos metais está diretamente associado a formação de discordâncias no metal. A densidade de discordâncias formadas em uma dada deformação é frequentemente uma função da temperatura do ensaio. Isso significa que, quando um metal é deformado até um determinado valor, o aumento de sua resistência mecânica pode depender da temperatura de deformação. Na maioria dos casos, quando o corpo de prova é deformado de um valor determinado, o encruamento resultante decresce com o aumento da temperatura^[16].

De uma forma geral, os mecanismos mais aceitos para a explicação do processo de deformação por fluência são os seguintes:

- Transporte de átomos por difusão;
- Escalagem e deslizamento de discordâncias e
- Deslizamento de contornos de grão.

2.6.1. FLUÊNCIA POR DIFUSÃO

Este mecanismo é resultante do movimento de defeitos pontuais orientados pelo campo de tensões sem envolver diretamente o movimento de discordâncias. Trata-se de um processo termicamente ativado, que pode resultar em um fluxo de átomos de uma região comprimida para uma região tracionada, Figura 2.6. Dependendo das condições de tensão e de temperatura, o fluxo de defeitos pode ocorrer principalmente através da rede ou dos contornos de grão, tornando-se importante principalmente em temperaturas muito altas e em baixos níveis de tensão mecânica^[17].

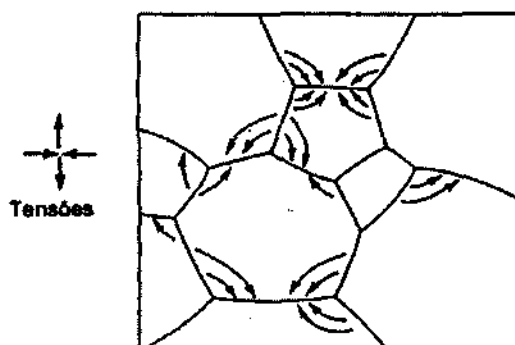


Figura 2.6 Representação esquemática da fluência por difusão em uma microestrutura de grãos^[16].

A autodifusão resultará em deformação plástica se a matéria for levada dos contornos sujeitos à tensão de compressão (contornos verticais) até os contornos sob tensão de tração (contornos horizontais)^[16].

De acordo com Langdon^[2], uma análise apropriada dos principais mecanismos pode ser discutida de forma mais prática pela utilização da equação (2.1), que relaciona a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, como uma função da tensão aplicada σ , e da temperatura absoluta T :

$$\dot{\epsilon}_s = A \frac{DGb}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^n \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \quad 2.1$$

com o coeficiente de difusão D relacionado com a temperatura T pela equação (2.2):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad 2.2$$

onde:

A: constante adimensional

D_0 : fator de frequência

G: módulo de elasticidade transversal

b: vetor de Burgers

k: constante de Boltzman

Q_c : energia de ativação para fluência

R: constante universal dos gases

d: tamanho médio de grão

As constantes p e n contribuem para a distinção entre os mecanismos que dependem de atividades intragranulares ou intergranulares.

Dois mecanismos são considerados importantes nesta região. O mecanismo proposto por *Nabarro e Herring* que resulta da difusão de vazios entre regiões sobre os contornos condicionados a diferentes estados de tensão, cujo fluxo ocorre através do volume da rede cristalina, pelo interior dos grãos, alongando-os na direção da tensão aplicada, Figura 2.7.

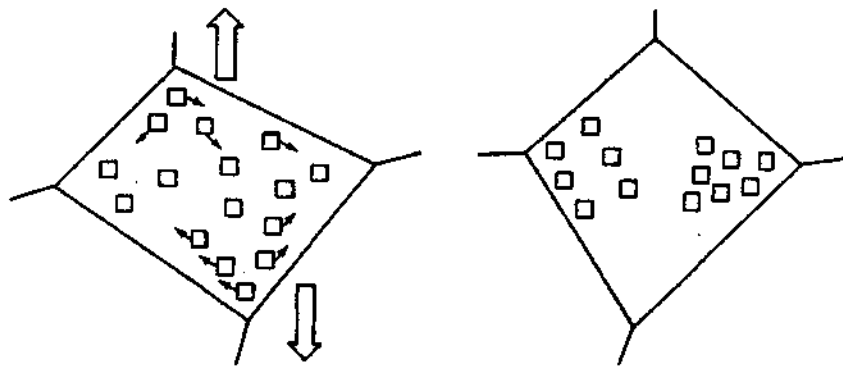


Figura 2.7 Fluxo de vazios resultando em aumento de comprimento de grão^[16].

A taxa de fluência no estado secundário como função da temperatura T e da tensão aplicada σ , pode ser expressa pela relação (2.3).

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{AD_v Gb}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad 2.3$$

onde D_v é o coeficiente de autodifusão, e as demais variáveis definidas anteriormente.

Um outro mecanismo é o de *Coble* e envolve a difusão pelos contornos de grão ao invés de pela rede cristalina. Esta difusão resulta no deslizamento dos contornos de grão. Um modo

prático de se obter uma liga com elevada resistência à fluência de Nabarro-Herring e Coble é aumentar o tamanho de grão^[11].

No mecanismo proposto por Coble, a deformação resulta do processo de difusão, cuja trajetória preferencial situa-se ao longo dos contornos de grão. A taxa de fluência estacionária pode ser representada pela equação (2.4):

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{AD_{cg}Gb}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^3 \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad 2.4$$

onde D_{cg} é o coeficiente de difusão ao longo dos contornos granulares.

O mecanismo proposto por Coble pode atuar simultaneamente com o de Nabarro-Herring, e a taxa de fluência resultante corresponde à soma das contribuições. O mecanismo de Nabarro-Herring predomina em condições de temperaturas elevadas ($T > 0,7 T_f$) e metais com granulação grosseira. O mecanismo de Coble predomina preferencialmente em temperaturas mais baixas ($0,4 T_f < T < 0,7 T_f$) e materiais com estrutura granular fina. Evans e Wilshire complementaram as análises esclarecendo que esse comportamento tem sido encontrado para vários metais. Este autores demonstraram que o expoente de tensão n , próximo do valor 1 não é necessariamente indicativo de que o processo ocorre por fluência difusional, tendo sido observado aumento na densidade de discordâncias e formação de uma estrutura de subgrãos em metais como alumínio puro^[2].

2.6.2. FLUÊNCIA POR DESLIZAMENTO E ESCALAGEM DE DISCORDÂNCIAS

Em condições de baixa temperatura ($T < 0,5 T_f$), o controle da deformação por fluência ocorre através do processo de deslizamento de discordâncias em seus planos preferenciais. O mecanismo predominante inclui superação da *barreira de Peierls*, através do qual as vibrações térmicas eventualmente favorecem o movimento de um segmento de discordância por um *vetor de Burgers*, nucleando e propagando, com certa facilidade, uma dobra dupla (par de *kinks*) sob ação da tensão aplicada e consequentemente, provocando o cisalhamento do cristal, ao passo que barreiras como precipitados são superadas atermicamente por anéis de discordâncias, Figura 2.8 [16, 18].

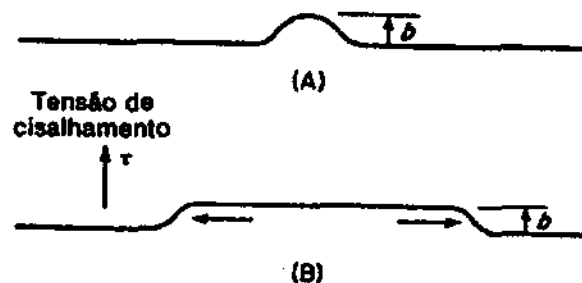


Figura 2.8 Ativação térmica do movimento de uma discordância em cunha^[16].

A energia térmica ajuda a tensão na formação de uma prega, que depois se estende sob a ação da tensão. Uma discordância se move de uma maneira gradativa, em degraus. A força que retém uma discordância na sua posição de menor energia no reticulado é chamada de força de

Peierls, e o mecanismo mencionado é um dos propostos para explicar a superação desta força, Figura 2.9.

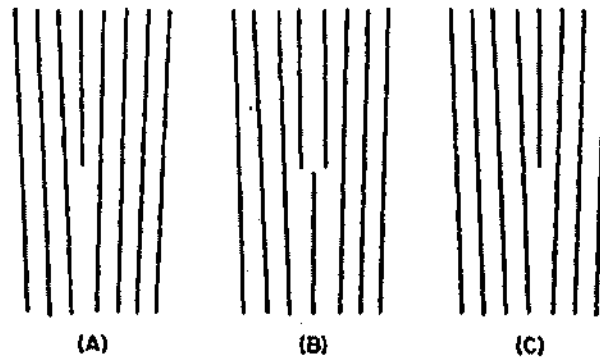


Figura 2.9 Três etapas do movimento de uma discordância em cunha^[16].

Já é bem conhecido o fato de que as discordâncias são criadas num metal durante o processo de deformação plástica. Como é preciso trabalho para formar um anel de discordâncias em qualquer tipo de fonte, é possível que a energia térmica possa ajudar uma tensão aplicada a vencer essa barreira energética. A importância desse efeito ainda não está comprovada, mas atualmente parece que a maioria das discordâncias se nucleia heterogeneamente em partículas de impurezas. Neste caso, o efeito da energia térmica seria difícil de ser avaliado.

À medida que a deformação plástica aumenta, cresce a complexidade da rede de discordâncias, induzindo à formação de *florestas de discordâncias* e ao fenômeno da interseção, que atuam como obstáculos para a movimentação de outras discordâncias em seus respectivos planos de escorregamento. Todos os cristais reais contêm uma rede de discordâncias que crescem em complexidade à medida que aumenta a deformação plástica. Essa rede foi denominada como *floresta de discordâncias*. Devido à floresta, qualquer discordância deslizante não caminha muito, pois ela intercepta outras discordâncias que passam por seu plano de escorregamento, em vários ângulos. O processo de interseção de discordâncias é importante pois o ato de forçar uma discordância a passar pelo campo de tensão de outra discordância envolve um elemento de trabalho e, devido à interseção, as discordâncias podem apresentar cotovelos, cujos movimentos através do reticulado são termicamente ativados^[16].

O processo de deformação, quando realizado em condições de temperaturas mais elevadas, envolve o mecanismo de escalagem de discordâncias. Assim, no caso de uma discordância ancorada, bloqueando a atividade de outras nos seus respectivos planos de escorregamento, resulta na formação de empilhamentos, de tal forma que a ascensão da primeira discordância bloqueada permite a continuidade da deformação. Como a fluência ocorre em temperaturas altas, a geração e a movimentação da discordância resulta na deformação de endurecimento, enquanto que processos de recuperação como a escalagem (Figura 2.10) e deslizamento cruzado permite que discordâncias também possam ser aniquiladas ou rearranjadas em configurações de baixa energia^[10].

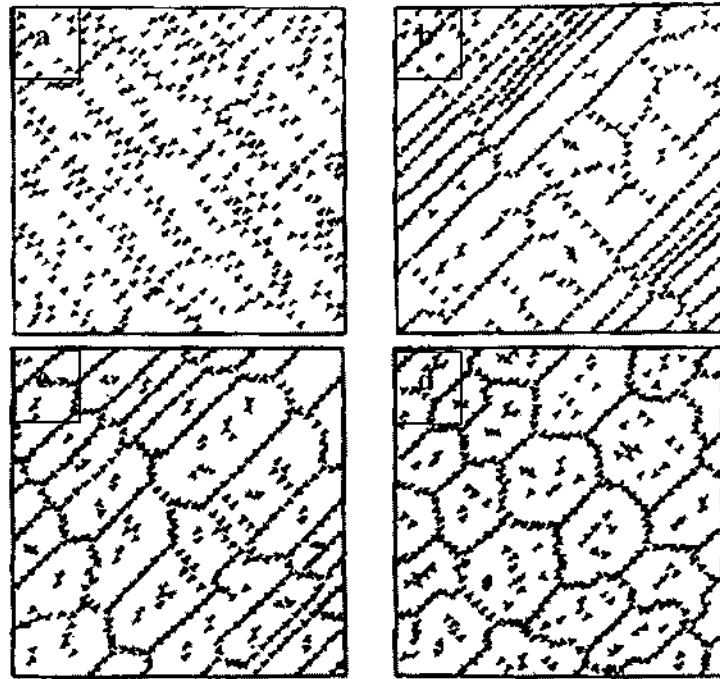


Figura 2.10 Representação esquemática da movimentação das mudanças de discordâncias durante a fluência^[10].

A capacidade de superação dos obstáculos envolve também o mecanismo de *Orowan*, através do qual a formação progressiva de anéis formados em torno de partículas duras ou precipitados bloqueia a movimentação de discordâncias na rede cristalina. Através do processo de escalagem, as discordâncias em cunha podem movimentar-se sobre uma partícula aniquilando-se. Por outro lado, as discordâncias em hélice por deslizamento, podem conduzir ao colapso do anel, resultando na possível continuidade do fenômeno da fluência através de outras discordâncias móveis. Os mecanismos de interação destacados anteriormente correspondem aos processos de endurecimento e recuperação dinâmica. Quando os dois processos operam de forma simultânea, a equação constitutiva de fluência para descrever o processo estacionário é dada por^[16, 19, 20]:

$$\dot{\epsilon}_s = A D_v \frac{Gb}{kT} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (2.5)$$

2.6.3. FLUÊNCIA POR DESLIZAMENTO DE CONTORNO DE GRÃO

Neste mecanismo, o processo de deformação ocorre com a movimentação relativa entre grãos de um metal policristalino, através da ação de um componente cisalhante de tensão atuando de forma descontínua e irregular, tornando-se mais efetivo com o aumento da temperatura e redução da taxa de deformação. Na deformação plástica em metais policristalinos, a maior distorção ocorre em regiões adjacentes aos contornos devido aos mecanismos comuns de recuperação, de maneira que o deslizamento de contornos é considerado como resultado da ação combinada do movimento de discordâncias e mecanismos de fluência por difusão^[21, 22]. O papel mais importante desempenhado pelo deslizamento dos contornos de grão está relacionado com o início da fratura intergranular. Para que ocorra deformação nos contornos de grão sem que haja

formação de trincas, deve existir um mecanismo de deformação que permita a continuidade da deformação ao longo do contorno de grão. Uma maneira de acomodar a deformação nos contornos de grão em temperaturas altas é através da formação de dobras (Figura 2.11) no final de um contorno de grão^[15]

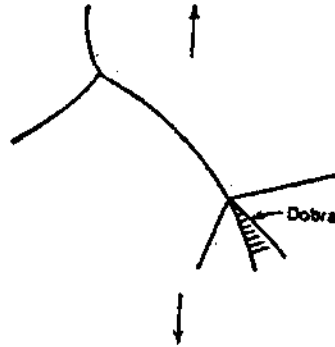


Figura 2.11 Representação esquemática da formação de dobra num ponto triplo da microestrutura de grãos^[15].

Um processo de acomodação para o alívio de tensões pode ocorrer pela migração de contornos de grãos para fora da região tensionada, através da formação de dobras simples ou duplas, que correspondem a uma alteração da superfície à frente do contorno deslizado^[17]. A taxa mínima de fluência ao longo dos contornos de grão ($\dot{\epsilon}_{sg}$) pode ser expressa por:

$$\dot{\epsilon}_{sg} = \left(\frac{AD_{cg}Gb}{kT} \right) \left(\frac{b}{d} \right) \left(\frac{\sigma}{G} \right) \quad (2.6)$$

e a taxa de acomodação ($\dot{\epsilon}_{sa}$) é dada por:

$$\dot{\epsilon}_{sa} = \left(\frac{A_0 D_v G b}{kT} \right) \left(\frac{b}{d} \right) \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (2.7)$$

onde:

A_0 e n = constantes características do material

D_{cg} = coeficiente de difusão nos contornos de grãos

d = diâmetro do grão

k = constante de Boltzman

A taxa resultante ($\dot{\epsilon}_s$) corresponde a uma relação devido a ambos os mecanismos de deslizamento e acomodação de contorno de grão:

$$\epsilon_s = \frac{AA_0 D_{cg} D_v \left(\frac{Gb}{kT}\right) \left(\frac{b}{d}\right) \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n}{AD_{cg} + A_0 D_v \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{n-1}} \quad (2.8)$$

onde: A_0 = área inicial, constante característica do material

D_v = Coeficiente de autodifusão

2.7. A LEI DE POTÊNCIA

Dentre as várias relações propostas na literatura, a de maior aplicabilidade prática, relaciona a dependência da taxa de fluência estacionária com a tensão para temperaturas acima de aproximadamente $0,3 T_f$, sendo representada pela *Lei de Potência*, conhecida universalmente como *Lei de Norton*:

$$\dot{\epsilon}_s = B \sigma^n \quad (2.9)$$

onde:

B = constante característica do material

O coeficiente B e o expoente de tensão n , de acordo com Brathe e Josefson dependem da temperatura, composição e microestrutura do material, e do nível de tensão aplicado. Normalmente, estes coeficientes são determinados utilizando um conjunto de curvas à carga ou tensão e temperaturas constantes, com o expoente de tensão representando o gradiente da relação $\ln \dot{\epsilon}_s$ vs $\ln \sigma$. Como a deformação por fluência ocorre por processos termicamente ativados, a *Lei de Norton* pode ser modificada para uma dependência com a temperatura, sendo geralmente representada por uma equação do tipo Arrhenius^[23, 24, 25, 26]:

$$\dot{\epsilon}_s = B_0 \sigma^n \exp(-Q_c/RT) \quad (2.10)$$

onde:

B_0 = fator dependente da tensão e da estrutura do material

Q_c = energia de ativação para fluência

Os valores de B_0 e Q_c podem ser obtidos graficamente através de um conjunto de ensaios à tensão ou carga constantes pela relação $\ln \dot{\epsilon}_s$ vs $(1/RT)$.

Não há evidências experimentais de que a fluência em materiais metálicos seja controlada por um único processo em cada região. Ao contrário, todos os mecanismos previstos podem apresentar contribuições ao longo dos três estágios, mas não necessariamente na mesma proporção. Assim, o conceito de um mecanismo dominante pode ser caracterizado por diferentes valores de n ou Q_c . Com isso, a transição do expoente de tensão de $n > 3$ para $n \approx 1$ é geralmente considerada como um indicativo de mudança de um mecanismo de fluência por discordâncias para um processo difusional. Estas considerações indicam que o mecanismo de fluência dominante depende dos diferentes regimes de tensão e de temperatura sendo, portanto, destacada a importância dos *Mapas de mecanismos de deformação*, que sintetizam as faixas de tensão e de temperatura nos quais cada mecanismo predomina, principalmente nos casos de metais puros e ligas monofásicas^[27]. Esses mapas indicam os regimes (ou áreas) tensão-temperatura ao longo dos quais vários mecanismos operam. Os contornos com taxas de deformação constantes também são incluídos com frequência. Dessa forma, para uma dada situação de fluência, dado o

mapa apropriado para o mecanismo da deformação e quaisquer dois dos três parâmetros – temperatura, nível de tensão ou taxa de deformação em fluência – o terceiro parâmetro pode ser determinado^[12].

Os metais puros, de acordo com Langdon, apresentam um comportamento denominado de Classe M, com $n \approx 5$, cujas características envolvem uma deformação instantânea após a aplicação de carga e um estágio primário normal associado ao desenvolvimento inicial de uma subestrutura, mantendo-se razoavelmente constante durante o estágio estacionário. A velocidade de fluência é função da EDE (energia associada aos defeitos de empilhamento), sendo então o processo controlado por escalagem de discordâncias. O estágio terciário está associado com o desenvolvimento de instabilidades, a exemplo da estricção, ou pela formação de cavidades intergranulares. Evans e Wilshire resumem de forma apropriada o conjunto de informações relativas aos valores de Q_c e n para os metais puros, atribuindo valores entre 4 e 6 para o expoente de tensão. Em temperaturas elevadas, acima de $0,7 T_f$, em valores intermediários de tensão, a escalagem ocorre por difusão de vacâncias através da rede, com valores de $Q_c \approx Q_{sd}$ (energia de ativação para escalagem de discordâncias). No entanto, para valores de $Q_c \approx 0,5 Q_{sd}$ com n entre 4 e 6 em níveis intermediários de tensão, o mecanismo de difusão passa a ocorrer ao longo das discordâncias. Para valores baixos de tensão e temperaturas acima de $0,7 T_f$ ou na faixa de $0,4$ a $0,7 T_f$, os valores de n são próximos de 1 e correspondem aos processos difusionais de Nabarro-Herring com $Q_c \approx Q_{sd}$ e Coble com $Q_c \approx 0,5 Q_{sd}$, respectivamente. Os valores de n próximos de 3 e Q_c igual à energia de ativação correspondente a interdifusão de átomos de soluto Q_{id} ^[2].

2.8. ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA O ESTADO DE EQUILÍBRIO EM FLUÊNCIA

O estado de equilíbrio, ou *fluência secundária*, é predominante nas temperaturas superiores a $T_f/2$. Como a fluência depende claramente dos processos termicamente ativados, é importante examinar o papel da temperatura nos mecanismos de fluência. A hipótese mais simples considera a fluência como um único processo ativado, podendo ser expressa por uma equação de taxa de deformação do tipo de Arrhenius^[15]:

$$\dot{\epsilon} = A \exp(-\Delta H/RT) \quad (2.11)$$

onde:

ΔH = energia de ativação do processo controlador da taxa

A = constante pré-exponencial complexa contendo a frequência de vibração da unidade de escoamento, a variação de entropia e um fator que depende da estrutura do material

T = temperatura absoluta (°K)

R = constante universal dos gases (1,987 cal/mol.°K)

Uma vez que as discordâncias não são formadas facilmente por ativação térmica, é razoável admitir que a estrutura de discordâncias permaneça constante durante a mudança de temperatura. Como a energia de ativação para autodifusão é a soma das energias para formação e movimentação de lacunas, isto fornece um forte suporte para o ponto de vista de que a escalagem de discordâncias é o mecanismo controlador da taxa de fluência em temperaturas altas. Um outro fator que dá suporte a esta suposição é a formação de uma estrutura de discordâncias de subgrãos. Seria de se esperar que os metais nos quais as lacunas se movem rapidamente apresentassem resistência à fluência baixa. Um dos papéis mais importantes segundo o qual a escalagem de discordâncias está envolvida na deformação em fluência é ajudar as discordâncias a superar os obstáculos que se interpõem ao deslizamento. Devido à grande variedade de

mecanismos de fluência possíveis, dificilmente para um dado conjunto de condições de fluência ocorrerá um único mecanismo. Se estes mecanismos operam independentemente uns dos outros, aquele de taxa de deformação maior (ou com energia de ativação menor) será o mecanismo dominante. No entanto, o mais provável é que vários mecanismos sejam interdependentes e, neste caso, aquele que apresenta a taxa de deformação menor, isto é, aquele que possui maior energia de ativação será o mecanismo controlador.

A utilização de medidas de energia de ativação para a identificação do mecanismo predominante de fluência, deve levar em consideração que as variações na temperatura, tensão ou estrutura podem produzir variações na importância relativa dos mecanismos competidores. A Figura 2.12 mostra que existem três energias de ativação diferentes para deformação de monocristais de alumínio. A maior energia de ativação, 35500 cal/mol, está associada com escalagem de discordâncias, e o valor intermediário, 28000 cal/mol, é próximo da energia de ativação para o deslizamento cruzado termicamente ativado. Para o valor mais baixo, 3400 cal/mol não se identificou um mecanismo definido, embora tenham sido sugeridos mecanismos baseados na tensão de Peierls e na interseção de discordâncias^[15].

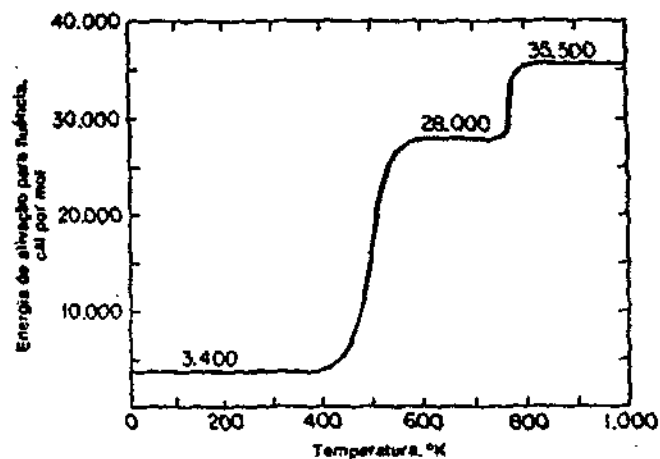


Figura 2.12 Energia de ativação para fluência em monocristais de alumínio^[15].

2.9. TEORIAS DE FLUÊNCIA

A Figura 2.13 mostra uma subestrutura de uma discordância idealizada desenvolvida em um metal em fluência, com sua distribuição de tensões associada. O metal é formado por algumas áreas com alta densidade de discordância que podem ser consideradas duras em relação ao movimento de discordâncias; e outras áreas são moles (com menor densidade de discordâncias). Para cada uma das regiões (e podem existir mais do que duas), existem obstáculos de resistência mecânica (σ) que se opõem ao movimento das discordâncias contínuas sob a ação de uma tensão corrente local (σ)^[10].

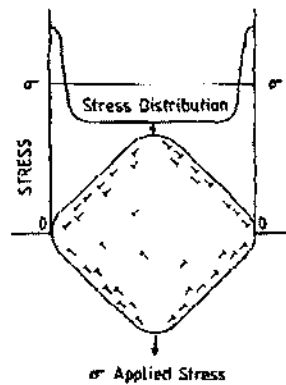


Figura 2.13 Variação da tensão local e a densidade de discordâncias em regiões “duras” (paredes da célula) e “moles” (interior da célula) durante a fluência^[10].

A energia total necessária para superar a barreira apresentada na Figura 2.14 é a força da discordância multiplicada pela distância percorrida, representada pela área ABCDE. Os princípios envolvidos nas diferentes teorias de discordâncias em fluência podem ser ilustrados por um esboço da idéia desenvolvida por Weertman, que vê a escalagem (ascensão) de discordâncias como um processo de recuperação. O material deformado é considerado contendo um número de fontes de discordâncias. Durante a fluência estas fontes emitem discordâncias que se movem ao longo de seus planos de deslizamento até que as discordâncias são presas em obstáculos, formando um empilhamento^[10].

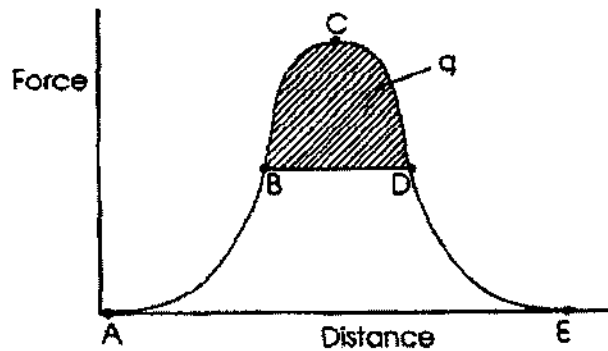


Figura 2.14 Curva força x distância para uma discordância superar a barreira ABCDE^[10].

Este processo constitui um endurecimento de fase. A discordância líder irá então escalar (saltar) este plano de deslizamento. Esta escalagem de discordância (Figura 2.15) pode ser aniquilada pelo encontro com uma outra discordância com sinal oposto, ou após alguma distância da escalagem pode estar livre para deslizar em um novo plano de deslizamento até o encontro de outro obstáculo. Uma outra discordância pode ser emitida de uma fonte para que o processo de fluência continue. O processo de escalagem representa a recuperação da estrutura do material^[10].

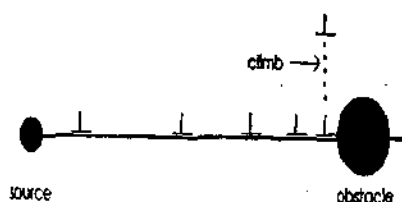


Figura 2.15 Representação esquemática de uma escalagem de discordância^[10].

2.10. APRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DE FLUÊNCIA EM ENGENHARIA

Na apresentação de dados de resistência em temperaturas altas, é muito comum se falar de *resistência mecânica à fluência* ou *resistência à ruptura por fluência*. A resistência mecânica à fluência é definida como sendo a tensão que produz, em uma dada temperatura, uma taxa de deformação secundária com um valor fixo, normalmente estabelecido como 0,00001 ou 0,001% por hora. A resistência mecânica à fluência pode também ser definida como sendo a tensão necessária para causar uma deformação de 1%, na temperatura considerada. A resistência à ruptura por fluência refere-se à tensão necessária para produzir, em uma dada temperatura, uma vida em serviço de tempo determinado, normalmente 1000, 10000 ou 100000 horas. Para aplicações de curta duração (como em mísseis ou aeronaves de alta velocidade), são necessários dados experimentais relativos às tensões e temperaturas superiores e em tempos mais curtos do que usualmente são determinados nos ensaios de fluência. A partir de um conjunto de curvas de fluência em temperatura constante e tensões variadas, é possível construir curvas de tensão-deformação traçando-se linhas em tempos pré-fixados, como por exemplo, $t = 0, 1, 10, 100$ horas. Muitas vezes é mais barato e conveniente realizar ensaios de ruptura por fluência do que ensaios convencionais de fluência, e seria de grande utilidade se a resistência mecânica à fluência pudesse ser estimada a partir da resistência à ruptura por fluência com precisão suficiente que permitisse sua aplicação em projetos^[15].

2.10.1. MÉTODOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DE DADOS

Com freqüência surge a necessidade da obtenção de dados de engenharia sobre a fluência que são impraticáveis de serem coletados a partir de ensaios normais em laboratório. Isso é especialmente verdadeiro quando se deseja obter resultados para exposições prolongadas do material (da ordem de anos). Uma solução para esse problema envolve a execução de ensaios de fluência e/ou de ruptura por fluência em temperaturas além daquelas exigidas, por períodos de tempo mais curtos, e em um valor de tensão comparável, para então se realizar uma extrapolação apropriada para as reais condições de serviço. Um procedimento de extrapolação comumente utilizado emprega o parâmetro de Larson-Miller, que é definido como sendo^[12]:

$$T(C + \log t_f) \quad (1.8)$$

onde:

C = é uma constante (geralmente da ordem de 20)

t_f = tempo de vida até a fratura (horas)

O tempo de vida até a fratura para um dado material, medido em algum valor de tensão específico, irá variar com a temperatura de tal modo que esse parâmetro permanece constante. Os dados podem também ser apresentados como o logaritmo da tensão em função do parâmetro de Larson-Miller^[12], como mostrado na Figura 2.16.

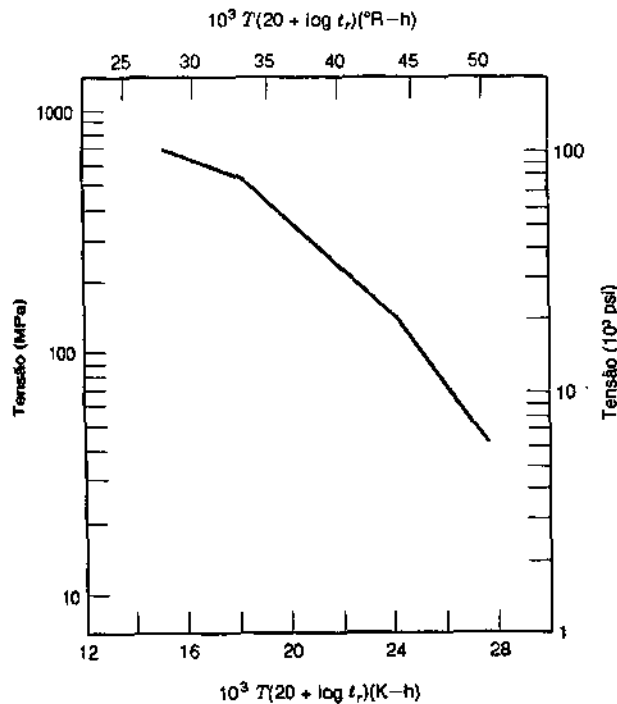


Figura 2.16 Curvas de tensão em função do parâmetro de Larson-Miller para um ferro S-590^[12].

2.10.2. LIGAS METÁLICAS RESISTENTES À FLUÊNCIA

Em geral, a resistência mecânica de um metal à deformação por fluência é tanto maior quanto maior é a sua temperatura de fusão, visto que a taxa de autodifusão é menor nos metais cuja T_f é alta. Uma vez que o deslizamento cruzado é um mecanismo importante para que as discordâncias possam superar os obstáculos, os metais com baixa energia de falha de empilhamento possuem maior resistência mecânica à fluência, porque se torna difícil a recombinação das discordâncias parciais necessárias ao deslizamento cruzado. No entanto, a adição de elementos de liga com valências altas, formadores de solução sólida, constitui a maneira mais efetiva de aumentar a resistência mecânica à fluência destes materiais porque produzem uma grande diminuição da energia da falha de empilhamento. Para uma alta resistência mecânica à fluência é necessária a presença de precipitados finamente dispersos. O valor deste parâmetro aumenta (diminuição da taxa de deformação em fluência secundária) à medida que o tamanho de grão diminui.

Os materiais empregados em temperaturas altas devem ser, além de resistentes, adequados para suportar o meio ambiente no qual operam. Alguns metais, como o molibdênio, são de grande resistência mecânica, mas apresentam pequena resistência química à oxidação e, por isto, devem ser cobertos por uma camada de material com alta resistência à oxidação quando empregados em temperaturas altas. O meio ambiente no qual o corpo de prova é ensaiado pode exercer uma influência importante na resistência em temperaturas altas.

Em ensaios de fluência realizados em monocristais de zinco foi observado que a fluência era praticamente interrompida quando os corpos de prova recebiam uma camada de cobre por eletrodeposição. Quando esta camada era retirada a fluência recomeçava com taxas de deformação aproximadamente iguais às originais. Em ensaios de ruptura por fluência realizados em ligas de níquel e de níquel-cromo, os resultados mostraram uma dependência complexa com a atmosfera. Em temperaturas altas e em baixas taxas de deformação estes materiais apresentam-se mais resistentes quando ensaiados ao ar do que em vácuo, enquanto que em temperaturas baixas e taxas de deformação altas ocorre o contrário. Este comportamento é atribuído aos efeitos competitivos de aumento da resistência mecânica resultante da oxidação e do enfraquecimento do material devido à diminuição da energia superficial resultante da absorção de gases.

A natureza da oxidação pode ter uma influência importante sobre as propriedades em temperaturas altas. Uma camada fina de óxido normalmente conduzirá a um aumento na resistência mecânica, mas a penetração intergranular do óxido geralmente implica em um decréscimo no tempo de ruptura por fluência e fratura intergranular. A vida em serviço de um material é bastante reduzida quando este deve operar em atmosfera de combustão de gases quentes ou em meios corrosivos^[15].

A influência do tamanho de grão na resistência mecânica à fluência não é muito bem estabelecida. Em muitas situações, o material com tamanhos de grãos grosseiros apresenta menores valores de taxas de deformação em fluência e valores de tensões de ruptura por fluência superiores às do material com grãos com tamanhos menores. A explicação simplista é de que um material com tamanhos de grãos grandes possui uma menor área total de contornos de grão disponível para o escorregamento, do que um material com granulação fina. Em várias ligas tem sido observada a existência de um tamanho de grão ótimo para o qual a resistência mecânica à fluência é máxima. Devido ao fato dos contornos de grão serem locais propícios para a nucleação de fratura em temperaturas altas, o seu controle, ou eliminação, irá retardar a fratura e aumentar a vida em serviço do material. O melhor exemplo para esta afirmação é o controle da orientação dos grãos através de solidificação direcional.

Numa palheta de turbina solidificada direcionalmente os contornos de grão estão dispostos, predominantemente, de forma paralelas ao eixo longitudinal da turbina, de maneira que os valores dos esforços em flexão, que atuam sobre eles, sejam baixos. Este material apresenta a mesma curva de fluência que a peça fundida convencionalmente, com orientações aleatórias dos grãos, porém o terceiro estágio de fluência é consideravelmente retardado e a alongação na fratura é apreciavelmente mais elevada. Melhorias no tempo de ruptura e aumento nos valores de ductilidade são obtidas através da utilização de um monocristal, no qual os contornos de grão foram eliminados.^[15]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Society for Testing and Materials. In: **Surface Engineering**. Philadelphia: 1996. v. 5.
- [2] BARBOZA, M.J.R. **Estudo e Modelagem sob Condições de Fluência da Liga Ti-6Al-4V**. São José dos Campos. 1-4p. Tese - ITA, 2001.
- [3] BARSOU, M. **Fundamentals of Ceramics: Materials Science and Engineering Series**, 1997. 668 p.
- [4] McQUEEN, H.J. **Materials Science and Engineering A**, v. 101, p. 149, 1988.
- [5] SAKAI, T.; OHASHI, M. ; CHIBA, K. **Acta Metall.**, v. 36, p. 1781, 1988.
- [6] EYLON, D.; FUJISHIRO, S.; POSTANS, P.J.; FROES, F.H. High-temperature titanium alloys - a review. **Journal of Metals**, p. 55-62, 1984.
- [7] GARDNER, A.; Tight times for titanium. **Metal Bulletin Monthly**, v. 286, p. 34-35, 1994.
- [8] SIEGEL, M.; Tendências em ligas para temperaturas elevadas. **Metarurgia & Materiais**, p. 208-211, 1996.
- [9] NORRIS, G.; Feeling the heat. **Metal Bulletin Monthly**, v. 386, p. 36-39, 1994.
- [10] EVANS, R.W.; WILSHIRE, B. **Introduction to Creep**. London: The Institute of Materials, 1993. 1-77 p.
- [11] MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. **Princípios de Metalurgia Mecânica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 406-420 p.
- [12] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 157-161 p.
- [13] PADILHA, A.F. **Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus, 1997. 246 p.
- [14] SOUZA, S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais - Fundamentos Teóricos e Práticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 201-219 p.
- [15] DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 385-418 p.
- [16] REED-HILL, R.E. **Princípios de Metalurgia Física**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982. 703-753 p.
- [17] HONDROS, E.H.; HENDERSON, P.J. Role of grain boundary segregation in diffusional creep. **Metallurgical Transactions A**, v. 14, p. 521-530, 1983.
- [18] FRIEDEL, J.; **Dislocations**. London: Pergamon Press, 1967. 491 p.
- [19] HIRTH, J.P.; The influence of grain boundaries on mechanical properties. **Metallurgical Transactions**, v. 3, p. 3047-3067, 1972.
- [20] HUMPHREYS, F.J.; Dislocation-particle interactions. In: Conference to celebrate the Fiftieth Anniversary of the Concept of Dislocation in Crystals. **Anais**. London: Bristol, 1984 p. 175-204.
- [21] AMELINCKX, S.; DEKEYSER, W. The structure and properties of grain boundaries. **Solid State Physics**, v. 8, p. 325-499, 1960.

- [22] BROWN, A.M.; ASHBY, M.F. On the power-law creep equation. **Scripta Metallurgica**, v. 14, p. 1297-1302, 1980.
- [23] BRATHE, L.; JOSEFSON, L. Estimation of Norton Bailey Parameters from Creep Rupture Data. **Metal Science**, v. 13, p. 660-664, 1979.
- [24] FROST, H.J.; ASHBY, M.F. **Deformation-mechanism maps**: Pergamon Press, 1984. p. 141