

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO: TRANSIÇÃO DE DESGASTE EM RISCAMENTO CIRCULAR E INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ocorrência de ocorrer mecanismo de desgaste abrasivo normalmente é esperada em ensaios de riscamento como visto no Capítulo 2. Como se pode verificar na Figura 5.1, o riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentadores de diamante na forma de cones com extremidade semi-esférica, ângulo de ataque α de 45° e raio de ponta r_ϵ de 50 μm (Diamante SE-45 R50) indica um comportamento de desgaste abrasivo, mesmo com a aplicação de uma pequena carga normal $W = 0,2 \text{ N}$. Essa consideração é calçada na observação de partículas de desgaste na forma de cavacos nas proximidades do sulco e ao perfil do risco (área de material deslocado $A+$ é maior do que a área de material deformado nas laterais $A-$), ou seja, a um de desgaste por mecanismo de abrasão com predominância de micro-corte. Entretanto, no início do riscamento não se verifica a presença de cavacos, ou seja, não há remoção de material. Apenas após um determinado tempo de riscamento é que a remoção ocorre, o qual coincide com um aumento pronunciado na força ou no coeficiente de atrito (Figura 5.2).

O que acontece antes do início da remoção de material como no exemplo citado não é facilmente encontrado e completamente explicado na literatura, principalmente quando se analisa esse comportamento em vários materiais metálicos e sob as possíveis condições de riscamento. Por exemplo, o mecanismo de desgaste por abrasão pode não ser determinante para o desenvolvimento do desgaste nesses casos. A utilização de pequenas cargas normais e a variação

nas formas dos indentadores, ou seja, de elementos que possibilitem uma baixa tensão de contato podem ocasionar uma influência decisiva de outros mecanismos de desgaste.

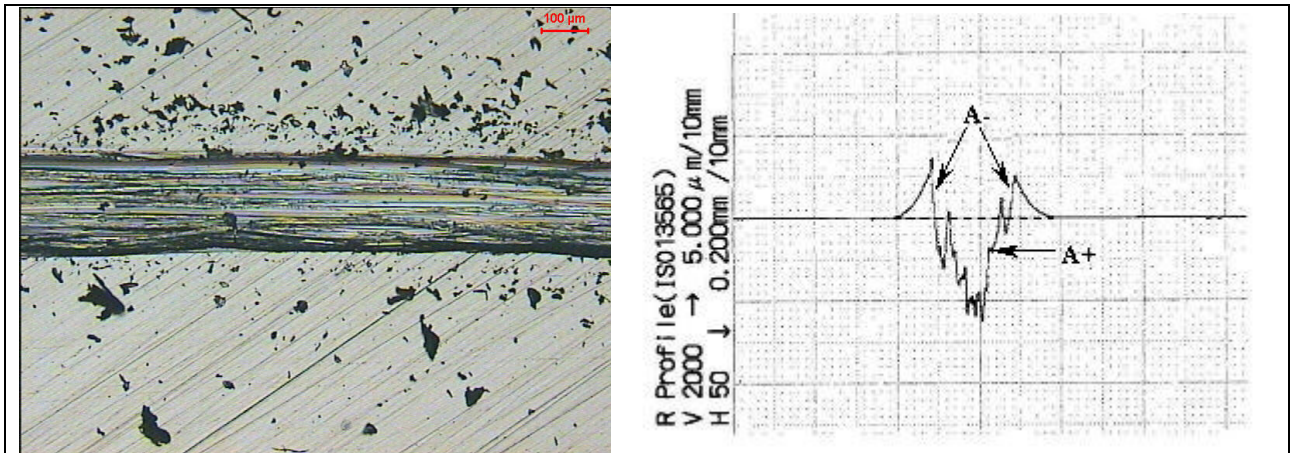


Figura 5.1 – Superfície e perfil transversal de riscamento no aço 0,4 % C de baixa liga: Indentador de diamante SE-45 R50 (extremidade semi-esférica, ângulo de ataque 45°, raio de ponta de $r_e = 50 \mu\text{m}$); carga $W = 0,2 \text{ N}$; velocidade tangencial $v_t = 0,5 \text{ m/s}$; velocidade rotacional $n = 145 \text{ rpm}$; tempo de riscamento $t = 331 \text{ s}$, distância percorrida $x = 165 \text{ m}$; número de ciclos $N_c = 800$ ciclos; Ar ambiente - umidade relativa do ar - UR = 61 %.

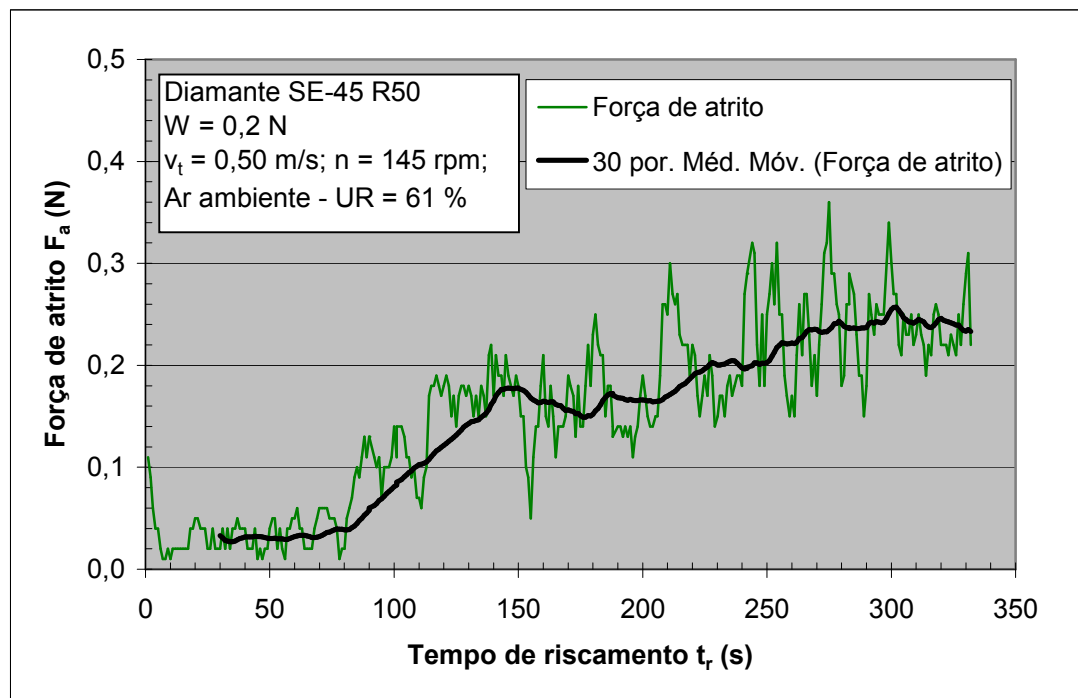


Figura 5.2 – Evolução da força de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante SE-45 R50 nas condições especificadas.

O número total de ensaios realizados nos diversos materiais foi de 350, o que gerou uma grande quantidade de dados e possibilidades de análise. Nesse trabalho são apresentadas apenas as consideradas mais relevantes para o entendimento dos comportamentos de desgaste.

Os resultados e discussões apresentados a seguir não seguem a seqüência de ensaios especificada no planejamento experimental. A seqüência de ensaios para um dado material de ensaio foi iniciada normalmente com a variação de carga normal para todos os indentadores e posteriormente ensaiada em ensaios segmentados nas condições de carga onde a curva de atrito apresentasse as melhores possibilidades de análise dos comportamentos de desgaste. Para facilitar o entendimento, são apresentados aqui, os resultados de análise dos mecanismos de desgaste predominantes para os vários materiais metálicos em relação a cada tipo de indentador, procurando-se identificar as condições que levaram a sua ocorrência.

5.2. TRANSIÇÃO DE DESGASTE EM RISCAMENTO CIRCULAR

5.2.1. Identificação

É bem conhecida a existência de uma transição da taxa de desgaste de moderado para severo quando variada a carga normal em ensaios de deslizamento, resultados obtidos por Hirst e Lancaster (1956) e posteriormente confirmados por Welsh (1965). Entretanto, como será demonstrado, também se pode encontrar uma transição no tipo de desgaste por deslizamento para desgaste abrasivo apenas com o decorrer do número de ciclos de contato. Esses resultados são obtidos em situações de contato repetido, onde alterações na estrutura do material da superfície podem facilitar o desprendimento de material na forma de partículas de desgaste.

Neste trabalho foram analisados os mecanismos envolvidos nessa transição de desgaste em contatos repetidos por riscamentos circulares sob baixas cargas normais, principalmente no aço 0,4 % C de baixa liga, mas também para outros materiais metálicos. Isso é feito pelo acompanhamento das forças e coeficientes de atrito em relação ao número de voltas do disco ou seja, o número de ciclos N_c .

A premissa para se poder verificar a transição de desgaste com o decorrer do número de ciclos em relação à variação da força de atrito parte de que no riscamento sob cargas muito reduzidas, as pressões de contato são inferiores às pressões de escoamento dos materiais. Nestas condições iniciais, não ocorrem desprendimentos significativos de material e o comportamento é similar a um desgaste por deslizamento. Com o decorrer do riscamento, partículas de desgaste acumuladas na superfície à frente do indentador exercem resistência ao movimento. Essa resistência é passível de detecção por células de carga, resultando em alterações na força e coeficiente de atrito. As condições de validade para essa premissa são apresentadas no decorrer dos capítulos de resultados.

Na Figura 5.3 é apresentado um gráfico esquemático em que se propõe resumir o comportamento de desgaste obtido para as situações de análise propostas. São identificados três estágios bem distintos:

- ***Estágio I ou Desgaste "Zero"***: as médias das forças ou coeficientes de atrito são aproximadamente constantes e de pequenos valores. Os desgastes são tão reduzidos, que se existirem, se confundem com o perfil de rugosidade da superfície.
- ***Transição***: aumento pronunciado dos valores de atrito. Condição intermediária de desgaste: danos superficiais são identificados, mas não são contínuos na trilha de riscamento.

- **Estágio II ou Desgaste em Regime Permanente:** retorno a baixas taxas de aumento nos valores de forças de atrito, similar ao primeiro estágio, mas com tendência maior de aumento com o decorrer do número de ciclos de riscamento. Os danos superficiais aparecem em toda a trilha de desgaste.

No *Estágio II* e na *Transição* podem ser identificados vários mecanismos de desgaste. A predominância de um em relação aos demais depende principalmente dos seguintes fatores de influência: materiais de ensaio, forma geométrica da extremidade de contato do indentador, carga normal aplicada e meio interfacial. Assim, podem ocorrer todos os principais mecanismos de desgaste, ou seja, abrasão, oxidação, adesão e fadiga. Além desses mecanismos foi identificado um tipo característico de desgaste que aqui é designado de *desgaste por deformação plástica acumulada* e é tratado como um mecanismo.

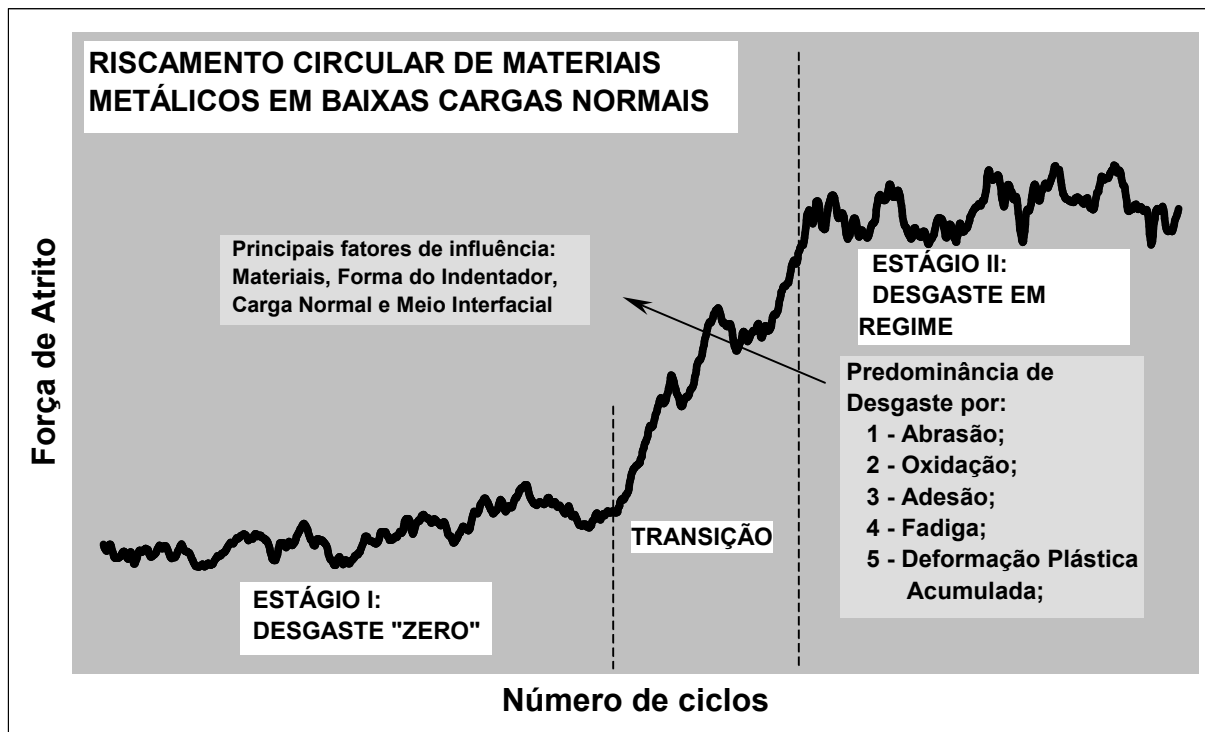


Figura 5.3 – Comportamento de desgaste de materiais metálicos em riscamento circular com baixas cargas normais

Esses mecanismos de desgaste normalmente não atuam isoladamente, podendo ocorrer uma competição ou uma sinergia para o desgaste resultante. Assim, buscou-se a influência mais determinante para a geração do desgaste, ou seja, qual mecanismo é predominante.

Uma constatação importante a ser feita é sobre a forma geométrica dos indentadores em relação à predominância de desgaste gerada nos riscamentos com baixas cargas normais. Para indentadores em forma de tronco de cone, os mecanismos de desgaste predominantes foram os normalmente obtidos no deslizamento, ou seja, oxidação, adesão e deformação plástica acumulada. Aumentando-se a carga normal, a tendência é ocorrer o desgaste por mecanismo de abrasão. Nos indentadores com forma semi-esférica, prevalece normalmente o mecanismo de abrasão mesmo em cargas reduzidas. Para facilitar o estudo, os resultados apresentados nos próximos capítulos estão separados pela geometria do indentador. Primeiro, analisa-se os mecanismos de desgaste predominantes com indentadores em forma de tronco de cone e posteriormente, os resultados para os indentadores com forma semi-esférica.

A predominância de desgaste por fadiga não foi observada nos ensaios de riscamento realizados, mas foi colocado como uma possibilidade de ocorrência pelos relatos da literatura, por exemplo no riscamento de cerâmicas e carbeto sinterizados (GEE, 2001; ENGQVIST et al, 1999; JIA et al., 1996) e por participar, como será visto, no processo de desprendimento de partículas no mecanismo de desgaste com predominância de oxidação.

Um comportamento anômalo aos demais materiais ensaiados foi obtido nos riscamentos de ferros fundidos com indentadores em forma de tronco de cone. Mesmo utilizando-se cargas reduzidas, não se pode identificar o *Estágio I* e também aparentemente não há uma correspondência do início da remoção de material com o aumento das forças de atrito (*Transição*). Esse comportamento será analisado com mais detalhes no item 6.4. Para

indentadores com forma semi-esférica, o comportamento de desgaste dos ferros fundidos é similar aos outros materiais metálicos ensaiados.

5.2.2. Estágio I ou Desgaste “Zero”

O comportamento de desgaste do *Estágio I* é similar em todos os materiais ensaiados. Esse estágio é caracterizado pelos baixos coeficientes de atrito (abaixo de 0,2) e por não se perceber uma remoção significativa de material. Ocorre também um pequeno endurecimento por deformação superficial que pôde ser constatado pelo aumento da microdureza nas superfícies. Exemplos: a microdureza do latão 360 aumenta de 140 HV para algo em torno de 190 HV; a do cobre eletrolítico de 120 HV para aproximadamente 130 HV; a do aço 0,4 % C de baixa liga de 485 HV para aproximadamente 520 HV. Aumentos sensíveis da microdureza dos materiais são observados na *Transição e Estágio II*.

Quando se utilizam indentadores com extremidade semi-esférica em ensaios em cobre eletrolítico, latão 360 e ligas de alumínio (ou seja, materiais que são facilmente deformados plasticamente), ocorre uma deformação plástica inicial normal à superfície já nos primeiros ciclos, mas esta é insuficiente para provocar grandes deslocamentos tangenciais de material. A conseqüência da deformação plástica normal deve ser um aumento na área real de contato, diminuindo as pressões nominais e inviabilizando o prosseguimento da penetração no material nesse estágio. Na Figura 5.4 é mostrado um desses comportamentos no riscamento do latão 360. A deformação é tão pequena que se pode ver a alteração na trajetória dos sinais de rugosidade do polimento de preparação do corpo de prova. Esses deslocamentos tangenciais de material são no mesmo sentido do riscamento.

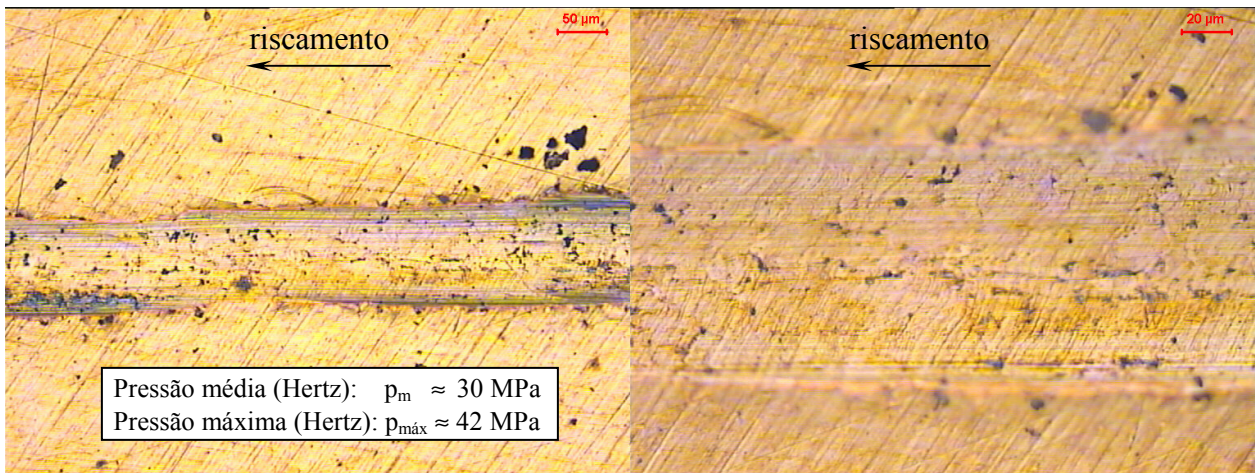


Figura 5.4 – Exemplo de superfície do *Estágio I* de desgaste: riscamento em latão 360. Indentador de diamante SE-30 R200 (extremidade semi-esférica, ângulo de ataque 30°, raio de ponta $r_e = 200 \mu\text{m}$), carga $W = 0,2 \text{ N}$, velocidade tangencial $v_t = 0,157 \text{ m/s}$, ar ambiente – UR = 53%, número de ciclos $N_c = 66$ ciclos (microscopia óptica).

Quando se utilizam indentadores em forma de tronco de cone não se percebe sequer uma alteração sensível da topografia em medições de perfil da superfície, se comparados com a topografia inicial de preparação.

Como o desgaste nesse estágio é tão pequeno pode-se usar o termo desgaste “zero”. Encontrou-se na literatura essa denominação em resultados de desgaste semelhante nos experimentos de Amamoto e Goto (2006) para o deslizamento de pino com diâmetro 6 mm contra disco, ambos de aço com 0,35 % C.

Existe um processo de melhoria da qualidade superficial por conformação mecânica que funciona da mesma forma que a encontrada no *Estágio I*, utilizando-se rolos ou esferas em vez de indentadores. É chamado de *burnishing* (alisamento da superfície sem a remoção de material) que foi pessimamente traduzido para brunimento – processo de remoção abrasiva. Conforme Morimoto (1988), o objetivo do *burnishing* é reduzir a rugosidade e provocar um endurecimento por deformação superficial. Para esse processo usa-se um número bem reduzido de ciclos.

A explicação para os eventos que ocorrem no *Estágio I* e início da *Transição* pode ser um tanto quanto complicada, mas sugere-se a seguinte. A introdução de energia à superfície pela deformação plástica superficial e pela resistência à movimentação, causa elevação da temperatura nos contatos (por exemplo, pela ruptura de contatos em um mecanismo de adesão). A área real de contato tende a aumentar pela deformação dos picos de rugosidade (similar a um processo de *burnishing*) até chegar em uma estabilidade. As superfícies em contato tornam-se muito reativas, já que se encontram instantaneamente em altas temperaturas. Zum Gahr (1987) relata que em ensaios de riscamentos e dependendo do material ensaiado, pode-se chegar a recuperação e recristalização dinâmica do material. Esses efeitos tendem a reduzir a tensão de escoamento e assim, reduzir a resistência a um deslocamento tangencial de material. Todos esses efeitos, podem levar a condições propícias para a ocorrência de adesão, oxidação e a deformações plásticas.

5.2.3. *Transição e Estágio II*

Na *Transição e Estágio II* a predominância de um mecanismo específico de desgaste poderá surgir de alguma peculiaridade dos fatores de influência para o dado riscamento, já que poderá estar ocorrendo uma competição ou até uma sinergia entre os mecanismos principais de desgaste. Por exemplo, em riscamento não lubrificado do aço 0,4 % C de baixa liga, antes de haver uma deformação plástica acumulada normal à superfície que seja suficiente para o deslocamento tangencial de material pode-se chegar à temperatura *flash* para a oxidação. Com a formação progressiva de uma camada de óxidos na superfície, as condições de adesão entre indentador e o aço ficam cada vez mais reduzidas e a tendência para esse caso é o desprendimento de partículas de desgaste por um mecanismo de desgaste com predominância de

oxidação. Esses efeitos são mais bem esclarecidos nos capítulos seguintes especificamente para cada mecanismo de desgaste predominante.

5.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO

Antes de se avaliar os mecanismos de desgaste predominantes para as várias condições analisadas é necessário abordar as influências de parâmetros de processo (variáveis de entrada) sobre o processo de desgaste. Os principais parâmetros analisados são carga normal W , velocidade tangencial v_t , velocidade rotacional n e ângulo de ataque α .

5.3.1. Influência da carga normal

A variação na carga normal apresenta um efeito importante sobre o comportamento de desgaste em riscamento e que pode ser avaliado pelas alterações nas forças e coeficientes de atrito, ou seja, através da identificação do *Estágio I*, *Transição* e *Estágio II*. Maiores cargas reduzem o número de ciclos necessários para o início da *Transição* de desgaste e do *Estágio II* conforme pode ser visualizado nas Figuras 5.5 a 5.6. Essa identificação não é facilmente obtida para gráficos de alterações do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos, em razão da baixa sensibilidade dos resultados para uma determinada carga (Figura 5.5). Já para gráficos de alteração das forças de atrito nas maiores cargas essa identificação é facilitada (Figura 5.6). A utilização de cargas normais muito reduzidas, entretanto, leva a variações muito pequenas da força de atrito na passagem do *Estágio I* para o *Estágio II*, o que dificulta a identificação da *Transição* de desgaste.

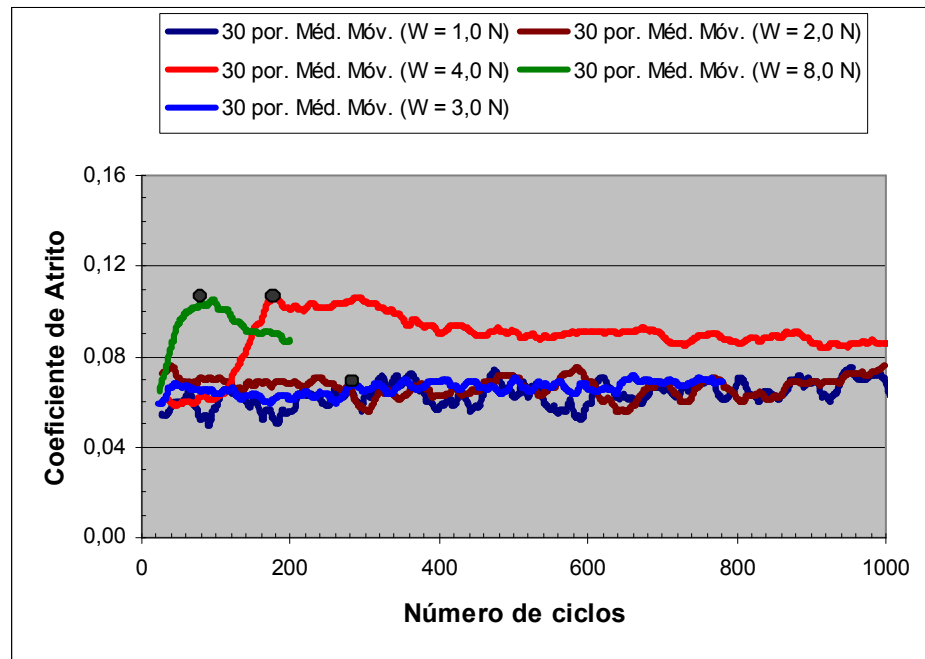


Figura 5.5 – Alteração do coeficiente de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante TC-45 D370; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente, UR = 49-53%.

Na figura 5.6 é colocada uma indicação para o início do Estágio II em cada curva da carga normal (círculo preto). Para ensaios onde se utilizaram cargas de 2,0 e 3,0 N, a identificação do número de ciclos para o início do Estágio II só foi possível com a ampliação da escala do eixo de força de atrito, já para a carga de 1,0 N, a variação da força de atrito entre o *Estágio I* e *Estágio II* é tão pequena que não se consegue identificar a *Transição*.

A ligação entre essas indicações resulta em uma curva de potência com boa aproximação. A equação obtida pode ser utilizada para se estimar quantos números de ciclos são necessários para se iniciar o *Estágio II* utilizando-se outra carga normal nas mesmas condições de riscamento (Figura 5.7). O mesmo raciocínio pode ser utilizado para se estimar o número de ciclos para que ocorra a *Transição* de desgaste.

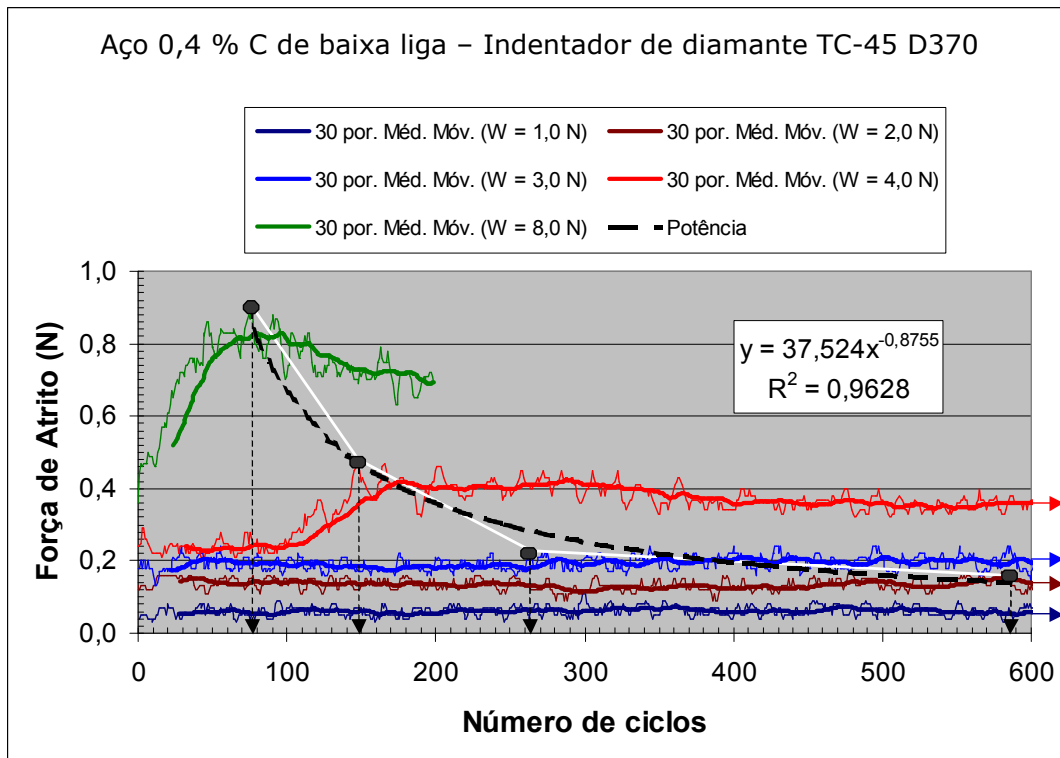


Figura 5.6 – Alteração da força de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante TC-45 D370; $v_t = 0,157$ m/s; ar ambiente, UR = 49-53%.

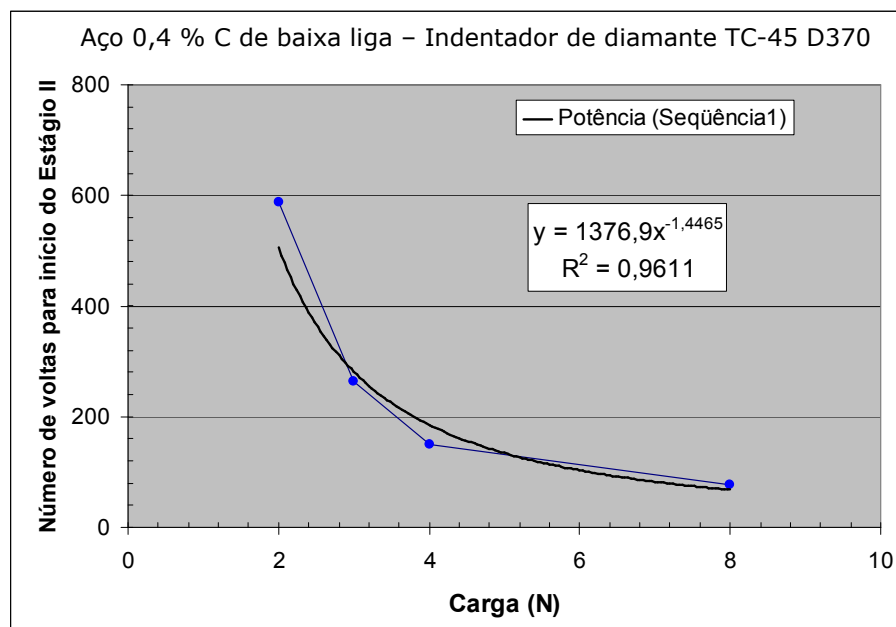


Figura 5.7 – Estimativa da relação carga normal e número de ciclos para o início do Estágio II em aço 0,4 % C de baixa liga nas mesmas condições de riscamento selecionadas.

5.3.2. Influência da velocidade tangencial

A variação na velocidade tangencial de riscamento no aço 0,4 % C de baixa liga com indentadores de rubi promove alterações pouco significativas nas forças de atrito para o intervalo testado de 0,13 a 0,31 m/s. Como na Fase II se buscava a comprovação das transições de desgaste em outros materiais metálicos, esse parâmetro não foi variado, mantendo-se nos ensaios uma velocidade tangencial intermediária das utilizados para o aço, ou seja, $v_t = 0,157$ m/s.

5.3.3. Influência da velocidade rotacional

A variação da velocidade rotacional do disco também não causou alterações significativas sobre o comportamento das curvas de força de atrito entre 50 e 150 rpm quando analisada em relação ao número de ciclos nos riscamentos do aço 0,4 % C de baixa liga. Entretanto, para reduzir a margem de erro das análises de outros parâmetros na Fase II, as velocidades de rotação foram limitadas nos ensaios entre 50 e 100 rpm. Uma abordagem mais bem detalhada da variação da velocidade rotacional do disco encontra-se no Anexo B.1.

5.3.4. Influência do ângulo de ataque

Os resultados da variação do ângulo de ataque sobre a força e coeficiente de atrito não puderam explicados. Existem tendências contraditórias ou ainda não explicáveis quando analisados indentadores de diamante em tronco de cone e indentadores com extremidade semi-esférica para ângulos de ataque de 30° e 45°. Para esses casos é necessária uma investigação específica. Os indentadores em tronco de cone com variação do ângulo de ataque testados na

Fase I não devem ser comparados entre si, já que apresentam diferenças significativas do diâmetro da extremidade. A título apenas informativo, esses resultados encontram-se no Anexo B.2.

5.4. DESGASTE DOS INDENTADORES

Os indentadores de diamante utilizados na Fase II praticamente não apresentaram sinais de desgaste, pelo menos perceptíveis ao microscópio ótico. Além disso, não mostraram alterações anormais entre os resultados de força de atrito e alterações nas superfícies de riscamento em ensaios similares. Já nos indentadores de rubi (Fase I), os desgastes foram bem significativos apenas após um número grande de ensaios nos indentadores com ângulos de ataque de 25° e 45°. Entre ensaios, o desgaste pode ser considerado irrelevante, já que não pôde ser verificado ou contabilizado. Entretanto, o indentador com ângulos de ataque de 60°, apresentou grande desgaste e instabilidade de resultados com apenas três ensaios e por isso não foi mais utilizada essa geometria. Os demais dados do desgaste dos indentadores encontram-se no Anexo C.