

# ***ANÁLISE DE FALHA E DESENVOLVIMENTO DE PUNÇÕES DE CORTE A QUENTE***

**Marcelo Wolf**

Orientador: Prof. Augusto Oscar Kunrath Neto, PhD.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

## **Resumo:**

Punções de corte a quente são ferramentas que, inerentemente ao seu tipo de trabalho, sofrem elevadas tensões cisalhantes e compressivas, o que causa elevado desgaste e conseqüentemente pequena vida útil. Devido a este fato, vários esforços têm sido empregados no sentido de produzir uma ferramenta que apresente um desempenho otimizado de trabalho, sendo comum a substituição do material ou do tratamento térmico/termoquímico da ferramenta à procura de uma combinação ideal.

Este trabalho apresenta a análise de falha de punções de corte a quente de aço ABNT H13 temperados, revenidos e com a sua superfície de trabalho revestida com eletrodo AWS EFe5-B e desenvolve a nitretação a plasma como sugestão de aprimoramento destas ferramentas. A nitretação foi feita em punções apenas temperados e revenidos, para que assim fosse possível avaliar esta como alternativa ao revestimento de solda, que é um processo muito custoso.

Finalmente, conclui-se que o modo de falha dos punções é desgaste adesivo e abrasivo, e que os punções temperados, revenidos e revestidos com solda têm vida útil superior aos temperados, revenidos e nitretados.

## **Abstract:**

### ***“FAILURE ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF PUNCHES FOR HOT WORK”***

Punches for hot work are tools that, inherently to its type of work, suffer high shear and compressive stresses, which cause high wear and consequently short useful life. Due to this fact, several efforts have been done in the sense of producing a tool that presents an optimum performance. It is common the substitution of the material or the treatment of the tool, searching an ideal combination.

This paper presents a failure analysis about punches for hot work made of ABNT H13 steel quenched, tempered and with its work surface covered with AWS EFe5-B electrode and the development of the plasma nitriding as a suggestion to improve these tools. The nitriding was applied on punches only quenched and tempered, in order to evaluate this as an alternative to the weld coating, which is an expensive process.

Finally, it is concluded that the failure mechanism of the punches is adhesive and abrasive wear, and that the quenched, tempered and welded punches have superior useful life than the quenched, tempered and nitrideds ones.

**PALAVRAS CHAVES:** Desgaste, Falha, Nitretação, Corte, Punção.

## ÍNDICE

1. Introdução _____	03
2. Revisão Bibliográfica _____	03
2.1 Análise de Falhas _____	03
2.1.1 Causa das Falhas _____	04
2.1.2 Estágios de uma Análise _____	06
2.2 O Processo de Corte a Quente Utilizando Punções _____	09
2.2.1 Esforços Envolvidos no Processo de Corte a Quente Utilizando Punções _____	10
2.2.2 Tipos de Desgaste _____	10
2.2.3 Deformação Plástica em Punções de Corte a Quente _____	11
2.3 Tratamentos Térmicos, Termoquímicos e Recobrimentos _____	11
3 Materiais, Métodos, e Ensaio _____	13
3.1 Materiais _____	14
3.2 Coleta de Dados e Seleção de Amostras _____	14
3.3 Exame Preliminar da Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda ____	16
3.4 Ensaio Não Destrutivos nos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda ____	17
3.5 Análise da Superfície Desgastada dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda em MEV _____	18
3.6 Determinação do Mecanismo de Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda _____	18
3.7 Tratamento Alternativo ao Revestimento com Solda _____	18
3.8 Teste dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados _____	20
3.9 Medição do Diâmetro dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados Antes do Teste ____	20
3.10 Medição do Diâmetro dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados Depois do Teste ____	21
3.11 Exame Preliminar da Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados _____	21
3.12 Análise Metalográfica dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados _____	22
3.13 Ensaio de Microdureza nos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados _____	23
3.14 Análise da Superfície Desgastada dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados em MEV _____	24
4 Conclusões e Sugestões _____	24
5 Referências Bibliográficas _____	25

## 1 INTRODUÇÃO

Punções de corte a quente são ferramentas que sofrem severo desgaste. O atrito gerado entre o punção e a peça causa elevado desgaste na ferramenta, ocasionando problemas dimensionais no furo e principalmente formação de rebarba. Para evitar que isto ocorra é necessário otimizar a microestrutura superficial do punção e/ou valer-se da deposição de camadas na superfície da ferramenta.

Atualmente na empresa Maxiforja Forjaria e Metalurgia S/A utilizam-se punções de corte a quente de aço ABNT H13 temperados, revenidos e com a sua superfície de trabalho revestida com solda – eletrodo AWS EFe5-B. A razão deste revestimento de solda é o desempenho muito superior deste metal de adição quando comparado com a ferramenta somente temperada e revenida. Este eletrodo é um metal nobre, apresentando propriedades mecânicas semelhantes às de um aço rápido. Estas ferramentas apresentam vida útil regular de aproximadamente 10.000 peças, sem haver variação significativa de um lote para outro.

O problema encontra-se em que a deposição deste revestimento de solda é muito custosa – além do alto custo do eletrodo, exige usinagem prévia do punção, seguida pelo revestimento com solda e nova usinagem para ajustar a geometria da superfície soldada.

Os punções analisados trabalham formando um par, em uma prensa excêntrica tipo C com capacidade de 80 Tonf, furando as abas de uma peça chamada terminal Y (Figura 3.3).

O presente trabalho desenvolveu-se no sentido de analisar e identificar os mecanismos de desgaste e falha destes punções de corte a quente e, depois de chegar à conclusão da principal propriedade que é exigida neste processo, desenvolver um tratamento alternativo ao revestimento de solda que seja mais viável economicamente: a nitretação a plasma.

Dentre os tratamentos de endurecimento superficial, a nitretação é uma técnica já consagrada por métodos tradicionais, como a nitretação em banho de sais e a nitretação gasosa. A nitretação a plasma, a pesar do seu desenvolvimento ter sido iniciado por volta de 1920, começou a ser difundida comercialmente somente a partir dos anos 60. Esta técnica, dentre outras vantagens sobre as técnicas convencionais, possibilita uma total automação e parametrização do processo, assegurando alta repetibilidade dos resultados e, além disso, não é poluente, fator de grande importância para empresas que estão em busca ou que já possuem a certificação ISO 14000.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### *2.1 Análise de Falhas*

O estudo da confiabilidade de componentes e estruturas admite que os produtos podem falhar. Da própria definição de confiabilidade: “confiabilidade é a probabilidade de que um

objeto ou sistema não falhe durante a sua vida útil”, vê-se que a falha é algo que não está livre de ocorrer em qualquer que seja a ocasião.

A partir do entendimento que temos das inúmeras variáveis presentes em um projeto e produção de um componente, tanto qualitativa quanto quantitativamente, as falhas devem ser entendidas e utilizadas como fonte importante de realimentação de dados para o engenheiro, e é justamente neste quadro que se enquadra este trabalho. Por esta ótica, o entendimento das causas das falhas permite aperfeiçoar e otimizar o projeto e a análise de falhas passa a funcionar como uma ferramenta de trabalho e não somente como uma investigação para determinar a “causa mortis” de um componente ou sistema.

### **2.1.1 Causas das Falhas**

Dentre as principais causas de falhas destacam-se as seguintes:

#### *Deficiências de Projeto:*

Dentre as mais variadas causas de falhas produzidas na fase de projeto pode-se destacar como as mais importantes os entalhes, o reaproveitamento de projetos ditos “semelhantes”, escolha errada dos processos de fabricação e desconhecimento das cargas reais exercidas sobre o componente.

#### *Deficiências na Seleção do Material*

A seleção do material para a fabricação de peças é parte fundamental de um projeto, que visa a atender as exigências funcionais que vão impor a necessidade de atendimento de uma série de propriedades como a resistência mecânica, resistência à temperatura, à corrosão, boa lubrificação, entre outras.

#### *Defeitos na Matéria-Prima*

Muitas falhas originam-se de defeitos no material de uma peça. Tanto imperfeições internas quanto superficiais reduzem a resistência, pois além de funcionarem como focos de concentração de tensões constituem-se no local adequado ao desenvolvimento de corrosão do tipo pitting ou facilitam o surgimento de corrosão intergranular.

As principais falhas desta classe são relacionadas à segregação, porosidades e vazios.

#### *Defeitos no Processo de Fabricação*

- a) *Estamparia:* provoca o aparecimento de tensões residuais na peça que, em alguns casos, alteram suas propriedades mecânicas, produzem micro ou macrotrincas, concentram tensões e causam uma redução localizada de ductilidade.
- b) *Retificação:* freqüentemente produz influência nociva na resistência à fadiga das peças, apesar do excelente acabamento superficial que produz, devido às tensões residuais

trativas que acompanham o processo e a não rara ocorrência de “queima”, que provoca a formação de martensita não revenida acompanhada de microtrincas.

- c) *Forjamento*: devido à capacidade de direcionamento das linhas de fluxo do material, pode ser muito útil no aumento do limite de fadiga da peça. Porém, se não feito corretamente, o processo pode ser prejudicial, ocasionando o direcionamento das linhas de fluxo para concentradores de tensão, dobras de forjamento, vincos e rechupes, que reduzem muito a resistência mecânica do material e a sua vida em fadiga.
- d) *Tratamentos Térmicos/Termoquímicos*: se forem utilizados parâmetros incorretos, tais como superaquecimento; uso de temperaturas muito baixas na austenitização; velocidades de aquecimento e/ou resfriamento incorretas; recozimento e precipitações em condições inadequadas para uma determinada peça; podem ocorrer fenômenos muito danosos ao material.
- e) *Soldagem*: quando a soldagem é feita em peças muito rígidas ou de grandes dimensões ou ainda em materiais de alta resistência mecânica, a contração do cordão de solda durante a solidificação produz elevadas tensões residuais que são capazes de provocar trincas antes mesmo da peça entrar em serviço. Na soldagem de aços com alto carbono equivalente, por exemplo, trincas podem surgir da combinação de efeito de tensões residuais e ação do hidrogênio.

#### *Defeitos ou Problemas Introduzidos na Montagem e Inspeção*

As falhas também podem resultar de erros de montagem não detectados pela inspeção durante a fabricação do componente. Este tipo de falha é mais freqüentemente associado a peças móveis de equipamentos mecânicos ou estruturais. Deficiências deste tipo estão algumas vezes relacionadas com especificações incompletas, incorretas ou ambíguas, mas também não raramente ocorrem por erro ou até mesmo negligência do operador.

O desalinhamento de peças como, por exemplo, eixos, engrenagens, mancais, vedadores, acoplamentos e guias são também freqüentes causadores de falhas em serviço.

#### *Uso ou Operação em Condições Inadequadas*

A operação de componentes ou equipamentos sob severas condições de velocidade, temperatura, carga, condições ambientais, ou sem manutenção regular e adequada, contribui muito para a ocorrência de falhas em serviço.

As inspeções periódicas, que normalmente fazem parte dos planos de manutenção, podem ter pequena ou nenhuma influência a menos que sejam estabelecidas em função de algum mecanismo de falha que caracterize o componente analisado.

O início da operação dos equipamentos, especialmente quando são postos em operação pela primeira vez ou após longas paradas para manutenção, é uma fase muito crítica do ponto de vista das falhas. Durante esta fase o equipamento pode ser submetido a condições que não são encontradas em operação normal, como por exemplo, rápidas mudanças nos parâmetros operacionais ou altos gradientes de temperatura.

### **2.1.2 Estágios de uma Análise**

Os principais estágios pelos quais deve passar a investigação e análise de uma falha são os seguintes:

#### *Coleta de Dados e Seleção de Amostras*

Inicialmente a investigação de uma falha deve ser orientada no sentido de agregar todos os detalhes relacionados a ela, coletando as informações disponíveis relacionadas com a fabricação, processamento e histórico operacional do componente que falhou, reconstituindo tanto quanto possível a seqüência dos eventos que precederam a falha.

Devem ser coletados todos os dados relacionados ao sistema que falhou, como velocidade, aceleração, temperatura, entre outros dados que se relacionem com o acidente.

Neste caso devem ser coletadas as amostras para análise e feitos registros fotográficos. Também é necessário o entendimento completo do sistema, sua operação, cargas e solicitações, especialmente do componente que falhou.

#### *Exame Preliminar da Peça que Falhou*

A peça que falhou, incluindo todos os seus fragmentos, deve ser submetida a um exame visual antes que seja procedida a sua limpeza. Frequentemente partículas de sujeira e detritos encontrados na peça podem ser de grande ajuda no estabelecimento das causas de um acidente ou na determinação da seqüência dos fatos que levaram à falha.

O primeiro exame da peça quebrada deve ser visual – a olho nu. Este exame tem uma profundidade de foco excepcional, permitindo a inspeção de grandes áreas detectando mudanças de coloração e textura.

Deve ser dada atenção especial para as superfícies da fratura e à direção de propagação das trincas. Deve-se procurar indicações de condições anormais de operação do componente, analisando seu projeto e processo de fabricação. É importante salientar que este exame nem sempre conduz a uma conclusão quanto à causa da falha, pois embora presente, a indicação pode passar despercebida ao observador.

#### *Ensaio não Destrutivos*

Os ensaios não destrutivos podem ser, em alguns casos, de extrema importância em uma investigação. Dentre estes ensaios destacam-se para detectar trincas e descontinuidades

superficiais a inspeção por partículas magnéticas de materiais ferrosos, a inspeção por líquidos penetrantes de não ferrosos e a inspeção eletromagnética de materiais condutores conhecida como *Eddy-Current*.

Para a detecção de defeitos internos torna-se de grande utilidade o uso de Raios-X e a inspeção ultrassônica.

Outros métodos, como a difração por Raios-X, permitem a determinação de tensões residuais produzidas na fabricação de peças que, em muitos casos, colaboram muito para a falha.

#### *Ensaio Mecânicos*

O ensaio de dureza é o mais simples dos ensaios mecânicos, constituindo-se na mais versátil ferramenta disponível para a análise de falhas, além de ser também um ensaio não destrutivo. Dentre suas aplicações, o teste de dureza pode ser usado para avaliar o tratamento térmico da peça quebrada e dar uma noção da resistência à tração do material.

Outros ensaios, como de tração, torção e fadiga também podem ser muito úteis de acordo com a função do componente. Porém, nestes ensaios a função do acabamento, do tamanho e da forma são muito importantes para obter-se o resultado correto.

#### *Seleção, Identificação, Preservação e Limpeza da Superfície da Fratura*

A correta seleção, preservação e limpeza da superfície da fratura é de grande importância para evitar a destruição de evidências que podem estar relacionadas com a causa da falha.

Normalmente a superfície da fratura deve ser protegida durante a remoção e o transporte. O toque ou esfregamento da superfície da fratura com os dedos devem ser evitados. Da mesma forma, nunca se deve juntar as duas partes de uma peça quebrada, pois poderá danificar a superfície da fratura.

A superfície da fratura somente deve ser limpa quando necessário, para, por exemplo, ser observada em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O procedimento de limpeza inclui uso de jato de ar seco; aplicação de solvente inorgânico; aplicação de soluções ácidas (dependendo do metal), que irão atacar os depósitos, mas sendo inerte em relação ao metal base e limpeza ultrassônica.

Algumas análises, como medição de microdureza, metalografia e análise da fratura em MEV limitam o tamanho da amostra, sendo então necessário corte da peça que falhou para retirada de um pedaço representativo da fratura.

#### *Exame Macroscópico da Fratura*

O exame detalhado da superfície da fratura com ampliações entre 1 e 100 vezes deverá ser feito, na ordem, a olho nu, com lente manual e com uso de microscópio eletrônico.

O exame macroscópico pode determinar a direção de propagação da trinca e o ponto de origem da falha. Em fraturas frágeis e planas, esta determinação é facilitada pelas “marcas de sargento”, onde a direção de propagação da trinca é indicada pelo sentido de divergência destas linhas. Pode-se também observar as “marcas de praia”, indicativo de fadiga no material.

#### *Exame Microscópico da Fratura*

Para este exame podem ser utilizados tanto microscópios óticos quanto MEV. O MEV é o mais empregado devido ao fato de ter a capacidade de examinar a fratura em pequenos aumentos, e então, quando neste aumento se desejar observar um detalhe com aumento muito superior, pode-se simplesmente ampliar a região com o aumento necessário.

Um exame em MEV pode ser muito útil para analisar os modos de falha da fratura, que podem ser os seguintes: coalescência de microcavidades, característica de materiais dúcteis; clivagem, característica de fratura frágil; fratura frágil intergranular, típica de aços temperados e não revenidos; e fragilização por hidrogênio.

#### *Seleção e Preparação de Seções para Análise Metalográfica*

A análise metalográfica de uma seção polida e atacada em microscópio ótico é parte muito importante em uma investigação de falha, devendo ser feita dentro dos procedimentos adequados. O exame metalográfico proporciona ao investigador informações sobre o tipo de material, sua qualidade e tratamentos térmicos e/ou termoquímicos.

A fim de se evitar o abaulamento das bordas da amostra de metal embutidas em baquelite quando do lixamento e polimento metalográfico, é recomendável, sempre que haja necessidade de observação de detalhes próximos à superfície, que se coloque no embutimento da amostra um pequeno pedaço de metal junto à superfície.

#### *Exame e Análise da Microestrutura*

Inclusões, segregação microestrutural, descarbonetação, aumento do teor de carbono, tratamento térmico/termoquímico incorreto, martensita não revenida e corrosão intergranular são algumas das muitas imperfeições metalúrgicas ou condições indesejáveis que podem ser reveladas por este exame.

#### *Determinação do Mecanismo de Falha – Identificação do Tipo de Falha*

A análise de falha de um componente requer a identificação do seu tipo de falha. Levando-se em conta os vários mecanismos de falha e as falhas relacionadas a fatores ambientais, pode-se classificá-las como: fraturas dúcteis e frágeis; falhas por fadiga; falhas por deformação; falhas por desgaste; falhas por atrito; falhas por erosão líquida; falhas por corrosão; falhas por corrosão sob tensão; fragilização por metal líquido; falhas por Hidrogênio; falhas por corrosão-fadiga; e falhas em temperaturas elevadas.

### *Análise Química*

A análise química é utilizada para verificar se o material se enquadra dentro das especificações recomendadas. Pequenos desvios da composição química em relação à especificada não representam problema em relação à análise de falha. De fato, somente uma quantidade muito pequena de falhas em serviço resulta de defeitos de material ou do uso de material errado ou diferente do especificado, ou seja, raramente a razão da falha está relacionada à composição química.

### *Testes Sob Condições Simuladas de Serviço.*

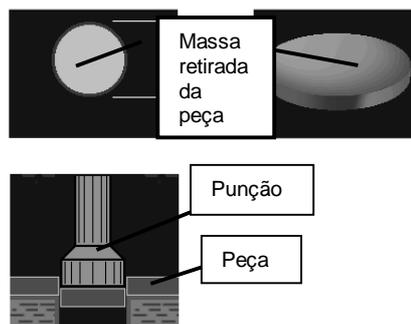
Durante os estágios finais de uma investigação, pode se tornar necessária a execução de testes que simulem as condições nas quais acredita-se que a falha tenha ocorrido. Entretanto, devido ao elevado custo ou dispêndio de tempo, este teste raramente é aplicado, salvo em situações em que ele seja indispensável.

### *Determinação da Causa de Falhas*

Obviamente muitas investigações não envolvem todos os procedimentos aqui descritos. Se a causa provável da falha está bem clara e surge logo no início da análise, o percurso e a extensão das investigações que se seguirem deverão ser dirigidas no sentido de confirmar a causa provável e/ou eliminar outras possibilidades. [Cassou, C.A., 2000]

## **2.2 O Processo de Corte a Quente Utilizando Punções**

O processo de corte a quente utilizando punções é uma operação onde a peça a ser cortada é cisalhada por estas ferramentas.



*Figura 2.1 – Esquema de um punção de corte em serviço.*

Por ser um processo a quente, a temperatura inicial da peça é de cerca de 1000°C, quando se inicia a furação.

Para calcular-se a força teórica necessária para a furação utiliza-se a seguinte equação:

$$F_t = \tau_{esc} \times A_c \quad (1)$$

onde  $F_t$  é a força teórica necessária para o corte,  $\tau_{esc}$  é a tensão de escoamento de cisalhamento do material a ser cortado na temperatura do processo, e  $A_c$  é a área de corte, ou seja, o perímetro da face de corte do punção multiplicado pela espessura do material a ser cortado.

O dado  $\tau_{esc}$  é difícil de ser encontrado, mesmo na literatura técnica, já que é uma informação relativa a um material específico a uma determinada temperatura. Na falta deste, conforme Dubbel, 1989, pode-se utilizar a tensão de ruptura do material por tração,  $\sigma_{rup}$ , também à temperatura de processo.

A força gerada pelo atrito entre os punções e a peça é de extrema relevância. Após alguns ensaios, foi verificado que esta é equivalente a aproximadamente 75% da força teórica de corte ( $F_t$ ) esforço total de corte, ou seja:

$$F_a = \tau_{esc} \times A_c \times 0,75 \quad (2)$$

e

$$F_r = F_t + F_a \quad (3)$$

então,

$$F_r = \tau_{esc} \times A_c \times 1,75 \quad (4)$$

onde  $F_a$  é a força de atrito e  $F_r$  é a força real necessária para o corte.

### 2.2.1 Esforços Envolvidos no Processo de Corte a Quente Utilizando Punções

#### *Tensões térmicas*

Ocorrem de maneira intermitente, já que o punção, entre operações, fica em contato com o ar a temperatura ambiente de processo. Durante a furação, devido à elevada temperatura da peça, o punção sofre dilatação, e após, quando somente em contato com o ar ambiente, contrai-se.

#### *Tensões mecânicas*

Ocorrem devido ao cisalhamento na superfície lateral do punção, à compressão na face de impacto do punção e ao movimento relativo entre o material a ser cortado e a superfície da ferramenta. São relacionadas à força necessária para a realização do processo.

São os fatores acima descritos os principais responsáveis pelo fim da vida das ferramentas. Os modos de falha dos punções são: (i) desgaste e (ii) deformação plástica.

### 2.2.2 Tipos de Desgaste

#### *Desgaste por Difusão*

Ocorre quando átomos de um reticulado cristalino metálico movem-se de uma área de alta concentração, daquele grupo atômico metálico particular, para uma área de baixa concentração. O processo de difusão é dependente da temperatura existente na interface e do

coeficiente de difusão, aumentando exponencialmente com a temperatura. Durante o processo de corte criam-se condições favoráveis para a difusão de material da ferramenta para a peça, devido à alta temperatura gerada na interface ferramenta/peça.

#### *Desgaste por Adesão*

Outro tipo de desgaste de elevada importância quanto se trata de punções de corte a quente é o desgaste adesivo. Este se manifesta, basicamente, na forma de arrancamentos de material da ferramenta pela peça via adesão (solda) de material da própria peça. O desgaste ocorre em lascas, sendo um modo de falha bem caracterizado e não homogêneo ao longo da superfície.

#### *Desgaste por Abrasão*

Ocorre quando partículas duras da peça atiram com a ferramenta e removem material desta por ação mecânica. As partículas podem ser inclusões abrasivas na peça de trabalho ou partículas do material da ferramenta removidas pela adesão. Este tipo de desgaste em punções de corte a quente pode ser favorecido pela perda de resistência mecânica da superfície das ferramentas devido aos efeitos da elevada temperatura do processo. A temperatura na superfície do punção pode atingir, dependendo do tipo de furação, patamares elevadas que provocam, com o decorrer do trabalho, alterações microestruturais e conseqüente diminuição de dureza por perda de resistência ao revenimento. Esta diminuição de dureza diminui substancialmente a resistência ao desgaste do punção, ocasionando desgaste abrasivo.

#### *Desgaste Eletroquímico*

Este mecanismo básico pode incluir outros mecanismos mencionados na literatura: oxidação ou corrosão e correntes elétricas iônicas produzidas pelo atrito entre a peça e a ferramenta. [Pessin, M. A., 1997]

### **2.2.3 Deformação Plástica em Punções de Corte a Quente**

A deformação plástica em punções de corte a quente é causada, principalmente, pelos sucessivos impactos entre o punção e a peça. Já que no decorrer do trabalho o punção pode perder dureza, a cada choque a ferramenta está mais suscetível à deformação plástica, podendo ocasionar a falha.

## **2.3 Tratamentos Térmicos, Termoquímicos e Recobrimentos**

A vida de ferramentas de aço para trabalho a quente pode ser aumentada por diversos tratamentos, tais como:

#### *Têmpera*

É o processo realizado antes de praticamente todos os tratamentos superficiais nos aços com pelo menos 0,3% de carbono, sendo o responsável por conferir dureza ao substrato.

### *Recobrimento com Processos PVD*

Atualmente é um dos processos mais utilizados em aços ferramenta para processos de usinagem, em especial o recobrimento com Nitreto de Titânio. O TiN apresenta o inconveniente de oxidar-se a cerca de 500 °C, já o TiO<sub>2</sub> é termodinamicamente mais estável. Para aplicações em matrizes e punções de forjamento normalmente o CrN é o mais indicado.

### *Nitretação*

Desde que bem realizada, aumenta a vida de praticamente todos os tipos de aços ferramenta. Consiste, basicamente, na formação de nitretos na superfície da peça. Os processos mais comuns são: nitretação a gás, em banho de sais e nitretação a plasma.

A nitretação de aços em banho de sais foi o primeiro processo a ser utilizado. As misturas de sais utilizadas são à base de cianetos, cianatos e carbonatos misturados em diferentes proporções. A temperatura usual de nitretação está em torno de 550 °C a 575 °C e o tempo de imersão é de aproximadamente 2 horas. O banho de sais fundidos gera carbono e nitrogênio necessários para a modificação da composição superficial da peça. Este processo é realizado por breves períodos de tempo, com risco de corrosão da superfície das peças para tempos prolongados.

Deve-se considerar que os sais de cianetos/cianatos são tóxicos e corrosivos, sendo que seu uso pode causar danos ao ser humano e ao meio ambiente, seja durante o seu uso ou com relação ao tratamento de seus resíduos. Ainda, é muito pouco flexível para o controle sobre a formação da camada composta e da zona de difusão para atingir as melhores características metalúrgicas desejadas da camada nitretada.

A nitretação a gás utiliza como fonte de nitrogênio atômico o gás amônia, NH<sub>3</sub>, mediante o aquecimento das partes que se deseja nitretar até uma temperatura média de 540 °C. Em um primeiro estágio, o gás que envolve as peças se dissocia gerando nitrogênio na forma atômica, que desta forma é absorvido pela superfície do substrato. Deve-se lembrar que o uso da amônia requer um controle rígido da composição da atmosfera gasosa, pela possibilidade de reação explosiva com o oxigênio em altas temperaturas e exalação de produtos gasosos prejudiciais a saúde.

A nitretação a plasma é um tratamento termo-físico-químico que utiliza como meio nitretante plasma gerado com uma mistura de gases (N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>) a uma pressão de aproximadamente 5 mbar. O gás é ionizado pela aplicação de uma diferença de potencial entre o componente a ser tratado, acoplado ao cátodo, e o ânodo, que em geral corresponde às paredes da câmara, formando o plasma.

O aquecimento neste caso é provido pelo próprio bombardeamento de íons/átomos excitados e é fortemente dependente da forma e do volume do componente.

Normalmente, para efeitos de controle de temperatura, utiliza-se a chamada “peça falsa”. Esta nada mais é do que uma peça igual à que está sofrendo a nitretação, porém com a inserção de um termopar na região mais importante a ser controlada. Ela pode ser uma peça já com algum desgaste, desde que a sua geometria se mantenha fiel à peça original.

Depois de definidos os parâmetros de nitretação, inclusive a temperatura (tensão do termopar), a peça falsa não precisa mais ser utilizada nas próximas nitretações, para a mesma peça.

#### *Vantagens da nitretação a plasma*

O processo de nitretação a plasma oferece várias vantagens sobre os demais processos de nitretação. Dentre elas, pode-se citar que este processo é único em possibilitar um controle completo sobre as características metalúrgicas da zona nitretada, permitindo variar o tipo dos nitretos que formam a camada composta,  $\gamma'$  ou  $\epsilon$ , a profundidade da camada de difusão, com a possibilidade de eliminação dos nitretos de contorno de grão. Sendo assim, a metalurgia da zona nitretada pode ser especificada de forma dedicada para as solicitações e conseqüentes propriedades exigidas pelo componente em cada aplicação específica. Também os problemas ambientais relacionados aos processos convencionais são totalmente eliminados com o uso do plasma. Deste modo, pode-se relacionar as principais vantagens da nitretação a plasma sobre os processos convencionais, como segue: não causa dano ambiental; não utiliza componentes nocivos à saúde; proporciona fácil variação nos parâmetros do processo; proporciona boa reprodutibilidade; alta flexibilidade e fácil automação; eliminação da presença de poros na camada composta; possibilidade de escolher o tipo da camada composta ( $\gamma'$  ou  $\epsilon$ ); possibilidade de nitretar aços com baixa temperatura de revenido, utilizando temperaturas de processo em torno de 350°C; baixa variação dimensional; possibilidade de nitretação em locais específicos da peça. [Kunrath, A. O., 1995]

### **3 MATERIAIS, MÉTODOS E ENSAIOS**

Os tratamentos, ensaios e testes desenvolveram-se no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS – LAMEF e na empresa Maxiforja S/A.

Inicialmente foram colhidas amostras de punções que apresentaram falha – que furaram cerca de 10.000 peças –, sua especificação, dados da máquina na qual eles trabalham e suas condições de operação. Em seguida, a peça foi inspecionada visualmente a olho nu, seguida por lupa e microscópio. Após foi realizado ensaio de dureza na superfície do punção revestida de

solda e também no resto do seu corpo, para verificação da têmpera e da dureza do metal de solda. Seguido a este processo, foi realizado corte e limpeza do punção a fim de observar os micromecanismos de falha em MEV. Depois de definido qual o mecanismo de falha, foi sugerido um tratamento alternativo para estas ferramentas, com o objetivo de maximizar sua vida útil. Estes punções alternativos foram testados e analisados da mesma forma.

### 3.1 Materiais

Os materiais envolvidos no estudo são os seguintes: aço ABNT H13, aço ABNT 1045 e eletrodo AWS EFe5-B.

O aço ABNT H13 é o material do substrato dos punções, o eletrodo AWS EFe5-B é o metal de adição usado como revestimento nos punções, e o aço ABNT 1045 é o material das peças que são furadas pelos punções. As suas respectivas composições químicas estão nas tabelas abaixo.

Tabela 3.1 – Composição química do aço ABNT H13

C	Si	Cr	Mo	V	Fe
0,4	1,00	5,0	1,5	1,0	Restante

Tabela 3.2 – Composição química do aço ABNT 1045, percentual em peso.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Fe
0,45	0,67	0,017	0,011	0,23	0,21	Restante

Tabela 3.3 – Composição química do eletrodo AWS EFe5-B, percentual em peso.

C	Mn	W	Cr	Mo	V	Si	Fe	Outros
0,5 - 0,9	0,6	1,0 - 2,5	3,0 - 5,0	5,0 - 9,5	0,8 - 1,3	0,8	Restante	1,0

### 3.2 Coleta de Dados e Seleção de Amostras

A ferramenta em questão tem dimensões conforme a Figura 3.1:

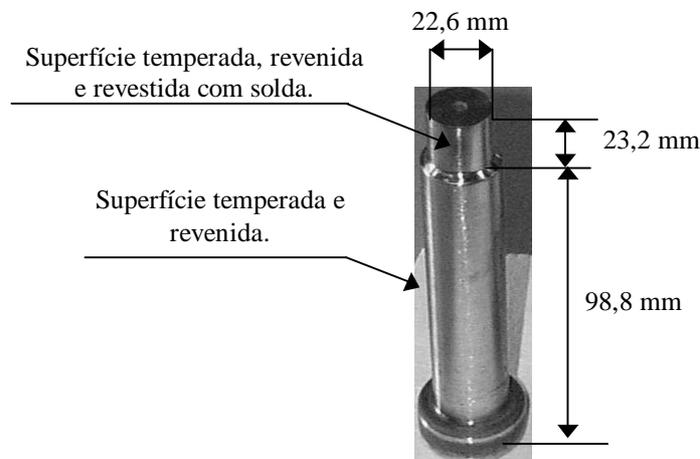
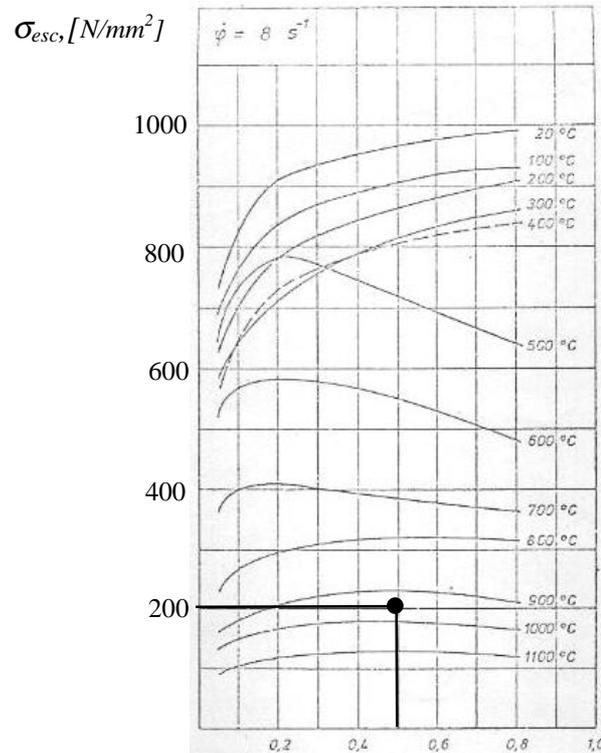


Figura 3.1 – Dimensões dos punções analisados e localização das superfícies.

Os punções coletados haviam furado cerca de 10.000 peças. Estas peças, de aço SAE 1045, entram no processo de furação já forjadas, com velocidade de deformação igual a  $8 \text{ s}^{-1}$ ; deformação igual a 0,5; temperatura entre  $900^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$ ; tensão de escoamento de tração ( $\sigma_{esc}$ ) de aproximadamente  $200 \text{ N/mm}^2$ ; e tensão de escoamento de cisalhamento ( $\tau_{esc}$ ) de aproximadamente  $100 \text{ N/mm}^2$ , conforme a Figura a seguir:



Deformação, [adimensional]. Fonte: LdTM.

Figura 3.2 – Gráfico de variação da tensão de escoamento com a deformação e a temperatura para uma dada velocidade de deformação.

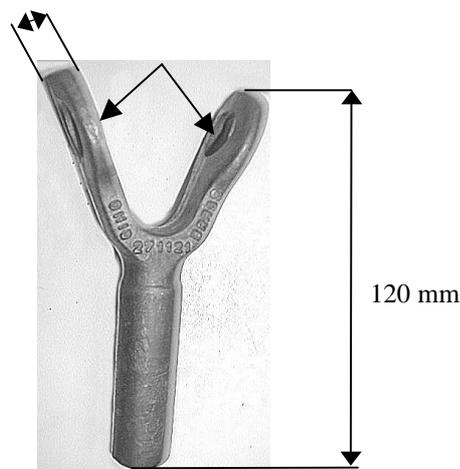


Figura 3.3 – Peça que é furada pelos punções. Em destaque os orifícios.

Como a área de corte da ferramenta é de  $90,4 \text{ mm}^2$ , pela equação 4 tem-se:

$$F_r = 100 \text{ N/mm}^2 \times 90,4 \text{ mm}^2 \times 1,75$$

$$F_r = 15,820 \text{ kN.}$$

A partir daí pode-se facilmente calcular a tensão que age sobre a face de corte do punção pela equação que segue:

$$\sigma = \frac{F_r}{A} \quad (5)$$

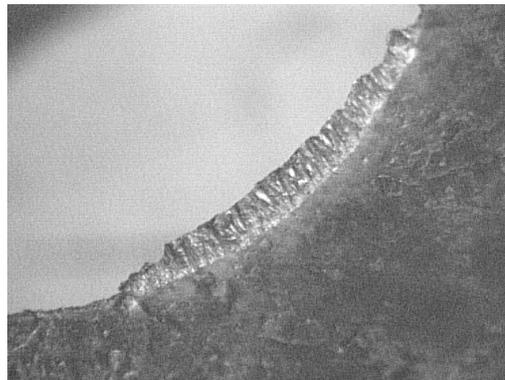
onde  $A$  é a área de impacto do punção. Então,

$$\sigma = \frac{15820}{401} = 39,4 \text{ MPa.}$$

Analisando este resultado, pode-se inferir rapidamente que esta solicitação imposta pelo processo é muito inferior à tensão de escoamento do aço ABNT H13.

O equipamento utilizado para o processo de corte a quente é uma prensa excêntrica tipo C com capacidade de 80 Tonf da marca Gutmann, e a velocidade do processo é de 0,08 m/s. O processo envolve um par de punções, cada um furando um lado da peça por vez (Figura 3.3).

A verificação de falha dá-se pela formação de rebarba no furo feito pelo punção na peça, conforme a figura a seguir:



*Figura 3.4 – Rebarba no furo da peça, caracterizando falha do punção.*

Foi verificado que os punções em análise tiveram vida útil equivalente aos que haviam trabalhado antes, sob as mesmas condições, no mesmo equipamento e com os mesmos operadores.

Pôde-se também verificar que não há desalinhamento dos punções em relação às guias existentes na máquina para a furação da peça, pois o desgaste ocorre de maneira idêntica ao longo de toda a superfície de trabalho do punção.

### ***3.3 Exame Preliminar da Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda***

Nesta etapa, foi feita inspeção visual da peça a olho nu e utilizando uma lupa marca Zeiss, com aumentos sucessivos e 1,2 a 6,6 vezes. Foram feitos registros fotográficos, dos punções após o teste, conforme as figuras abaixo:



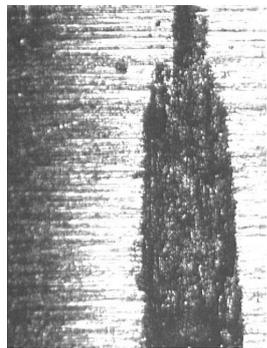
*Figura 3.5 – Superfície de corte do punção*

*temperado, revenido e revestido com solda – aumento de 1,2 x.*



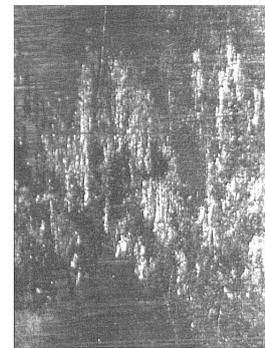
*Figura 3.6 – Superfície de corte do punção*

*temperado, revenido e revestido com solda – aumento de 1,2 x.*



*Figura 3.7 – Superfície de corte do punção*

*temperado, revenido e revestido com solda – aumento de 3,2 x.*



*Figura 3.8 – Superfície de corte do punção*

*temperado, revenido e revestido com solda – aumento de 6,6 x.*

### **3.4 Ensaios Não Destrutivos nos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda**

Foi realizado apenas um tipo de ensaio não destrutivo, o ensaio de dureza. Este foi realizado com o intuito de verificar basicamente dois itens: se o processo provoca perda de dureza do material (aço ABNT H13); e se o processo provoca perda de dureza no metal de solda (o eletrodo utilizado é o AWS EFe5-B).

Foi utilizado um durômetro marca Rockwell do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF) e a medição foi feita em 5 pontos de cada área, na escala Rockwell C. As medidas foram feitas ao longo da superfície circular de corte da ferramenta, e o ensaio seguiu os seguintes critérios: distância entre as impressões:  $4 \times d$  ou 2 mm (o que for maior); distância entre a borda e a impressão:  $> 2,5 \times d$  ou 1 mm (o que for maior); temperatura do ensaio:  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; tempo de aplicação da carga: 10 s a 15 s, onde  $d$  é o diâmetro da impressão. Os resultados do ensaio estão na tabela a seguir:

Tabela 3.4 – Resultados do ensaio de dureza do metal de solda e do substrato, HRC.

	1	2	3	4	5	Média	Desv. Pad.
<b>Metal de Solda</b>	55,7	56,0	55,5	55,5	54,5	55,4	0,56
<b>Substrato</b>	55,6	55,5	55,5	56,0	55,7	55,6	0,20

### 3.5 Análise da Superfície Desgastada dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda em MEV

Utilizando-se o MEV, foram feitas fotomicrografias da superfície desgastada do punção:

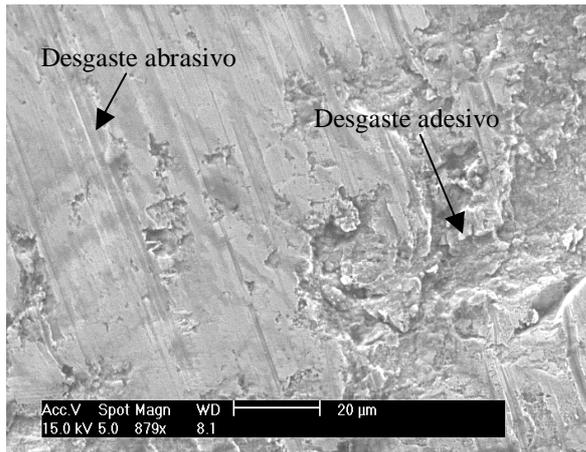


Figura 3.9 – Superfície de corte do punção temperado, revenido e revestido com solda.

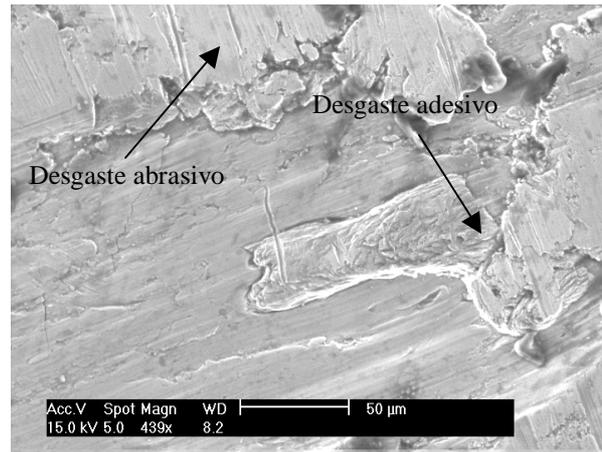


Figura 3.10 – Superfície de corte do punção temperado, revenido e revestido com solda.

Combinação de adesão com abrasão – aumento de 879 x.

Combinação de adesão com abrasão – aumento de 439 x.

### 3.6 Determinação do Mecanismo de Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Revestidos com Solda

Através de exame visual e análise das imagens obtidas em MEV, pode-se concluir que o mecanismo de falha dos punções é a combinação de desgaste adesivo com desgaste abrasivo.

### 3.7 Tratamento Alternativo ao Revestimento com Solda

Depois de estudado e determinado o mecanismo de falha dos punções recobertos com solda, foi sugerido um tratamento alternativo à solda: a nitretação a plasma. Este foi proposto pelo fato de conferir ao material nitretado elevada dureza superficial, com a possibilidade da não formação da camada de compostos, que tornaria a superfície muito frágil.

#### Tratamento de Nitretação dos Punções

Através da literatura [Hoppe, S., 1998] [Huchel, U. et al., 1995] [Venkatesan, K. et al., 1997] foram definidos os parâmetros de nitretação, de forma que não se formasse a camada de compostos.

Tabela 3.5 – Parâmetros de nitretação utilizados no tratamento dos punções.

<b>MISTURA GASOSA</b>	95% H <sub>2</sub> – 5% N <sub>2</sub>
<b>PRESSÃO ( mbar )</b>	4,0
<b>TENSÃO ( V )</b>	497
<b>CORRENTE ( mA )</b>	908
<b>TENSÃO DO TERMOPAR ( mV )</b>	17,7
<b>TEMPERATURA ( °C )</b>	450
<b>DURAÇÃO ( h )</b>	3,0

Os punções foram nitretados na câmara de nitretação a plasma do LAMEF. Foram nitretados três peças, sendo uma falsa e outras duas em condições de entrar em serviço.

O procedimento de nitretação a plasma requer alguns cuidados específicos, tais como polimento das superfícies que serão nitretadas (Figura 3.11), imersão destas superfícies em acetona para desengraxe (Figura 3.12), controle do processo para evitar a formação de arcos elétricos entre as peças e o ânodo (paredes da câmara); e aumento lento e gradual da diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo (peça) para evitar a desestabilização do plasma.

Como a superfície importante do punção é a de menor diâmetro (Figura 3.11), para um controle eficaz de temperatura nesta região foi utilizado como peça falsa uma peça levemente desgastada com um termopar inserido naquele local (Figura 3.14). A temperatura foi controlada de forma que a dureza provinda da transformação martensítica do tratamento de têmpera não diminuísse.

A seguir estão fotos que apresentam o procedimento da nitretação a plasma:

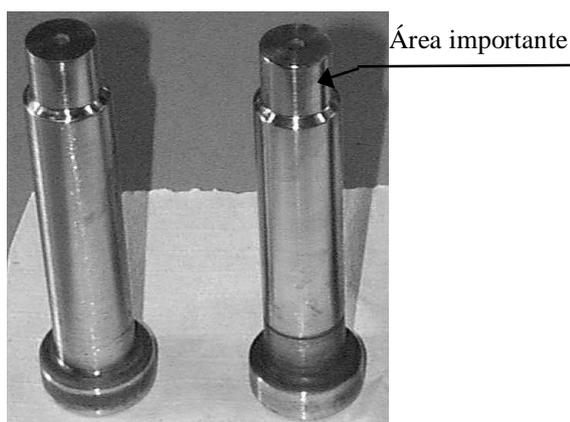


Figura 3.11 – Punções temperados e revenidos, polidos antes da nitretação.



Figura 3.12 – Punções temperados e revenidos imersos em acetona para desengraxe.



Figura 3.13 – Equipamento de nitretação a plasma, durante o processo.

Figura 3.14 - Peça falsa. Em destaque o orifício para inserção do termopar.

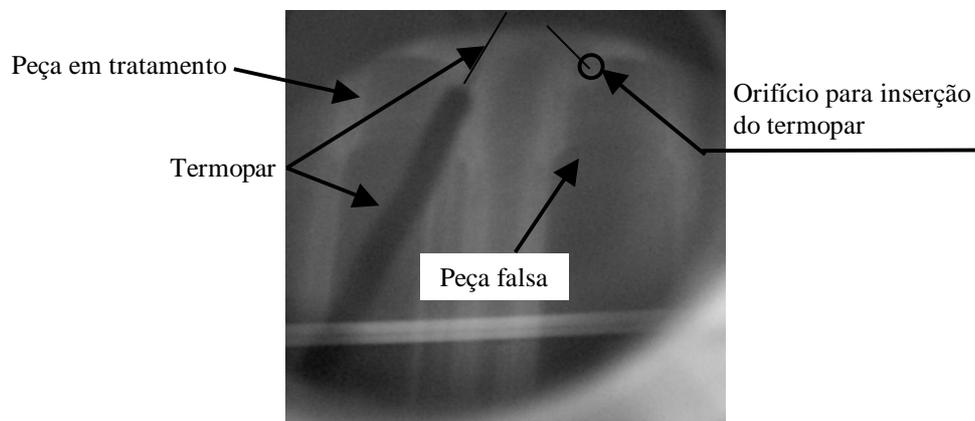


Figura 3.15 - Punções durante a nitretação, destacando o termopar conectado à peça falsa.

### 3.8 Teste dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados

Os punções nitretados foram testados da seguinte forma: no mesmo equipamento em que os punções revestidos com solda trabalharam aos pares, foi feito um par utilizando-se um punção de cada tipo, ou seja, um nitretado e outro revestido com solda – cada um fazendo um furo em um lado da peça. Deste modo pôde-se avaliar apenas a ferramenta, pois se tinha certeza de que o material a ser furado, o operador, a temperatura de furação e todos os demais parâmetros seriam os mesmos para ambas as ferramentas.

### 3.9 Medição do Diâmetro dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados Antes do Teste

A fim de quantificar a diferença de desgaste entre os punções revestidos com solda e os nitretados, foram feitas medições do diâmetro de cada um antes do teste ser iniciado. Foi utilizado um micrômetro digital marca mitutoyo com incerteza de medição de 0,001mm. O resultado destas medições está na tabela abaixo:

Tabela 3.6 – Medição do diâmetro dos punções antes do teste

<b>DIÂMETRO (mm)</b>	<b>PUNÇÃO NITRETADO</b>	<b>PUNÇÃO COM SOLDA</b>
	22,716 ± 0,001	22,609 ± 0,001
	22,716 ± 0,001	22,602 ± 0,001
	22,715 ± 0,001	22,594 ± 0,001
	22,714 ± 0,001	22,593 ± 0,001
	22,713 ± 0,001	22,600 ± 0,001
<b>Média (mm)</b>	22,714 ± 0,001	22,600 ± 0,001

### 3.10 Medição do Diâmetro dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados Depois do Teste

Depois de encerrado o teste os punções foram novamente medidos. Para efeito de obter medições coerentes com as iniciais, foi utilizado o mesmo instrumento, as medições foram realizadas nos mesmos pontos dos punções e pela mesma pessoa.

Como resultado desta nova medição teve-se que nenhum dos punções teve redução no diâmetro ou ovalização.

### 3.11 Exame Preliminar da Falha dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados

O teste teve seu fim no momento em que foi detectada formação de rebarba no furo feito pelo punção nitretado.

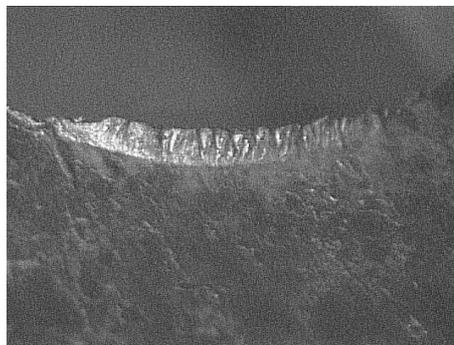


Figura 3.16 – Formação de rebarba no furo feito pelo punção nitretado.

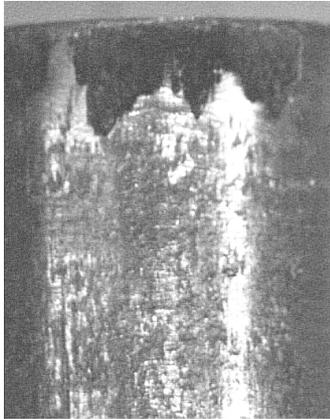
Depois de encerrado o teste, foi feita inspeção visual do punção a olho nu e utilizando lupa, com aumentos sucessivos e 1 a 6,6 vezes. Foram feitos registros fotográficos, conforme segue:



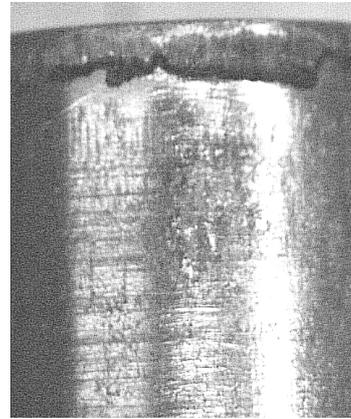
*Figura 3.17 – Punção temperado, revenido e nitretado. Desgaste na superfície de corte do punção.*



*Figura 3.18 – Punção temperado, revenido e nitretado. Desgaste na superfície de corte do punção.*



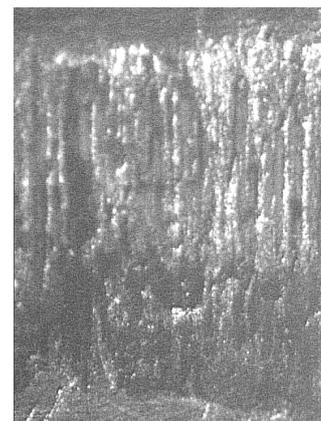
*Figura 3.19 – Punção temperado, revenido e nitretado. Ampliação da figura 3.18 – aumento de 2,5 x.*



*Figura 3.20 – Punção temperado, revenido e nitretado. Ampliação da figura 3.17 – aumento de 2,5 x.*



*Figura 3.21 – Punção temperado, revenido e nitretado. Ampliação da figura 3.17 – aumento de 3,2 x.*



*Figura 3.22 – Punção temperado, revenido e nitretado. Ampliação da figura 3.17 – aumento de 6,6 x.*

### 3.12 Análise Metalográfica dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados

Terminado o teste, foi feita análise metalográfica dos punções para avaliação da camada nitretada. Para isto, a amostra foi cortada transversalmente à camada nitretada. Após o corte, a amostra foi embutida utilizando-se um apoio de metal colado à superfície transversal para evitar o efeito de borda. Para o lixamento, foram utilizadas lixas com granulometria 120, 220, 400, 600 e 1000, sempre mudando em 90° a direção de lixamento de uma lixa para outra. Após, foi polida utilizando-se discos de 4 µm e 1µm, nesta ordem, com pasta de diamante e álcool e então atacada com nital 2%. Depois de atacada, a amostra foi levada ao microscópio ótico para ter a sua microestrutura analisada. Não foi detectada qualquer precipitação de nitretos e/ou carbonitretos nos contornos de grão.

Nesta análise, infelizmente, não foi possível analisar a camada nitretada com precisão, então se optou por outro ensaio para medi-la, o ensaio de microdureza.

### 3.13 Ensaio de Microdureza nos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados

Para a realização do ensaio de microdureza foi utilizado um microdurômetro marca Leitz Wetzlar utilizando indentador Vickers e carga de 100 gf. O tempo de aplicação da carga foi de 10 s, e a incerteza do ensaio é de 5%.

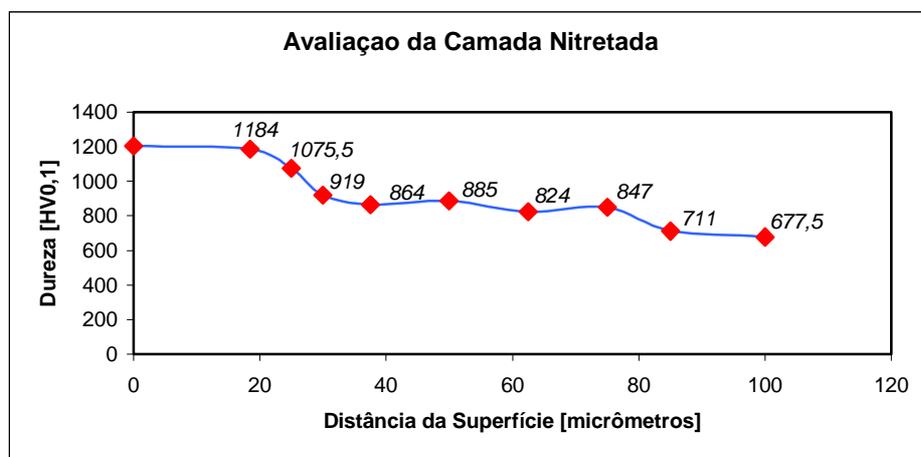


Figura 3.23 – Avaliação e Medição da Camada Nitretada

A microdureza superficial do punção nitretado ficou em torno de 1203 HV<sub>0,1</sub>. A profundidade de nitretação foi estimada a partir do gráfico do perfil de microdureza tomando por critério que a dureza limite para a determinação da profundidade é dada por:

Dureza Limite = (Dureza de núcleo + 50) HV<sub>0,1</sub>, sempre arredondando para os 10 HV<sub>0,1</sub> mais próximos. [DIN 50.190 parte 3] [Pessin, M.A., 1997] Então,

$$\text{Dureza Limite} = (677,5 + 50) \text{ HV}_{0,1} = 727,4 \text{ HV}_{0,1} \rightarrow 730 \text{ HV}_{0,1}$$

Sendo assim, através do gráfico (Figura 3.23), pode-se dizer que a profundidade da camada nitretada foi de cerca de 80 µm.

### 3.14 Análise da Superfície Desgastada dos Punções Temperados, Revenidos e Nitretados em MEV

Utilizando-se o MEV, foram feitas fotomicrografias da superfície desgastada do punção:

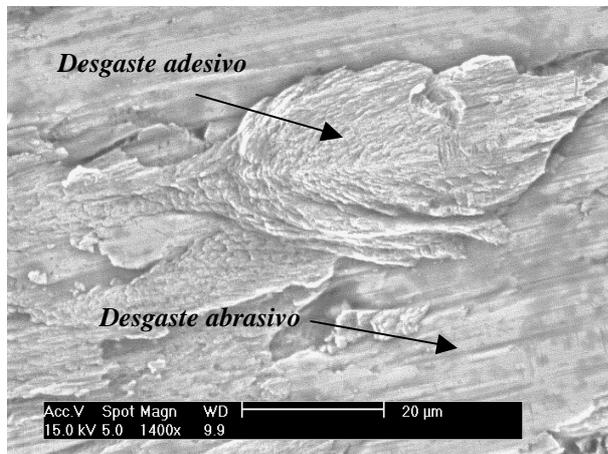


Figura 3.27 – Superfície de corte do punção temperado, revenido e nitretado. Combinação de adesão com abrasão – aumento de 1400 x.

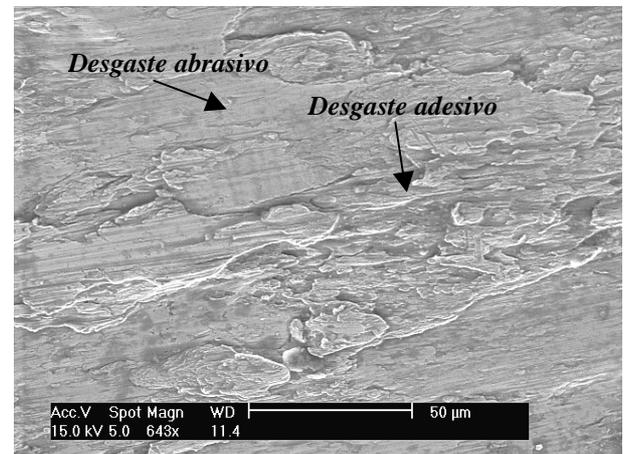


Figura 3.28 – Superfície de corte do punção temperado, revenido e nitretado. Combinação de adesão com abrasão – aumento de 643 x.

## 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

De posse dos resultados das análises, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- O mecanismo de falha dos punções temperados, revenidos e revestidos com solda foi a combinação do desgaste adesivo com o desgaste abrasivo. A causa da falha é a limitação do material da ferramenta frente à sollicitação.
- O processo de nitretação a plasma foi bem sucedido, porém os punções temperados, revenidos e nitretados a plasma tiveram vida útil inferior aos revestidos com solda, não justificando a utilização dos primeiros.
- O mecanismo e a causa da falha dos punções temperados, revenidos e nitretados a plasma foram os mesmos dos revestidos com solda.
- Não há participação de macrodeformação plástica na falha dos punções. Isto pode ser confirmado observando o resultado da equação 4 e comparando-o com a tensão de escoamento do material; e analisando a forma com a qual a falha ocorre, sem ovalização da superfície.
- Não há perda significativa de dureza do aço ABNT H13 ou do metal de solda durante o processo. As durezas inicial e final foram aproximadamente iguais, em torno 55 HRC.
- A principal propriedade que o material deve apresentar para desempenhar bem o processo é elevada dureza superficial. Porém, como o processo propicia impacto nos punções,

estes devem apresentar também apreciável tenacidade. Outra propriedade importante é o coeficiente de atrito entre a superfície do punção e a peça.

A vida útil dos punções temperados, revenidos e nitretados foi de 3.800 peças, não justificando, então, a sua utilização. O motivo deste mau desempenho, comparativamente aos punções revestidos com solda, deve-se ao fato de o eletrodo AWS EFe5-B ser um metal altamente nobre. Porém, os punções nitretados continuam em desenvolvimento para este fim. Estão sendo encaminhadas novas nitreções com diferentes parâmetros, a plasma e a gás, com e sem formação da camada de compostos, sobre o revestimento de solda e sobre o aço H13 temperado e revenido, para nova avaliação.

Fica como sugestão para novos trabalhos uma outra técnica para aumentar a vida útil destas ferramentas: a nitreção seguida por oxidação passiva, já que a camada de óxido deve ter melhor desempenho frente ao desgaste adesivo.

## **5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Cassou, C. A., 2000. “Metodologia de Análise de Falhas”, UFRGS, Porto Alegre.
- Hoppe, S., 1998. “Fundamentals and Applications of the Combination of Plasma Nitrocarburizing and Oxidizing”, Elsevier Science S.A., EUA.
- Huchel, U., et al., 1995. “Single Cycle, Combination Layers with Plasma Assistance”, Elsevier Science S.A., EUA.
- Kunrath, A. O., 1995. “Tratamentos Térmicos em Plasma: Nitreção, Cementação e Carbonitreção”, UFRGS, Porto Alegre.
- Pessin, M. A., 1997. “Estudo da Influência da Pressão Gasosa no Processo de Nitreção a Plasma Para o Aço ABNT M2”, UFRGS, Porto Alegre.
- Pessin, M. A., 1999. “Caracterização de Camadas Nitretadas a Plasma em Aço ABNT 1045 com Aplicação de Fonte de Potência Pulsada”, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.
- Sommers, M. A. J. et al., 1992. “On the Oxidation of  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N<sub>1-x</sub> Layers: Redistribution of Nitrogen”, John Wiley & Sons Ltd, EUA.
- Strohaecker, T. R., 2000. “Mecânica da Fratura”, UFRGS, Porto Alegre.
- Venkatesan, K. et al., 1997. “Three-Body Abrasion of Surface Engineered Die Steel at Elevated Temperatures”, Elsevier Science S.A., EUA.
- Wierzchon, T., et al., 1999. “Properties of Multicomponent Surface Layers Produced on Steels by Modified Plasma Nitriding Processes”, Elsevier Science S.A., EUA.
- Zinchenko, V. M., et al., 1998. “New Possibilities of Gas Nitriding as a Method for Anticorrosion Treatment of Machine Parts”, Plenum Publishing Co., EUA.