

BROCHAMENTO INTERNO DE BRAÇO DE ARTICULAÇÃO EM AÇO ABNT 1045 FORJADO

Celso Cardoso de Lima

Universidade de Taubaté – UNITAU, Mechanical Engineering Department, Daniel Danelli, St., s/n
Jd. Morumbi Taubaté - SP – Brazil ZIP Code 12060-440, phone.: (011) 6460-5515, Fax.: (011)
6432-5106, e-mail: celso.cardoso@yamaha-motor.com.br

Gilberto Walter Arenas Miranda

Universidade de Taubaté – UNITAU, Mechanical Engineering Department, Daniel Danelli, St., s/n
Jd. Morumbi Taubaté - SP – Brazil ZIP Code 12060-440, phone.: (012) 3625-4191, Fax.: (012)
3629-2566, e-mail: gilware@terra.com.br

Resumo. *A Indústria, na busca da competitividade, racionaliza seus processos de produção, viabilizando a integração entre as fases de desenvolvimento do produto e operações de usinagem visando um melhor custo/benefício. Dentro desse enfoque o processo de usinagem por brochamento surge como uma solução natural para determinado tipo de operações. O processo utiliza uma ferramenta de desbaste, semi-acabamento e acabamento em seqüência. A eficiência do processo está no aumento da qualidade: redução de peças com anomalias, redução de tempos operacionais, aumento da produtividade, redução de custos da peça usinada e o alívio da tensão mental e física de trabalhadores por oportunizar tarefas realizadas de forma simplificada. Este trabalho visa mostrar os resultados obtidos no processo de brochamento de furo em um braço de articulação, por meio da mudança da microestrutura do aço forjado ABNT 1045, obtida através de tratamento térmico de normalização e revenimento com controle apurado de temperatura para a produção de uma microestrutura definida, com garantia de propriedades mecânicas como resistência e ductilidade. Como consequência, foram obtidas umas melhorias significativas na usinabilidade do material da peça e na vida útil da ferramenta. Devido às variações de produtividade da brocha, foram realizadas análises na estrutura do material, nos flancos e no grau de acabamento superficial da ferramenta. Nos testes realizados em peças foram feitas medições de: cilindricidade, potência média consumida, rugosidade e dureza.*

Palavras Chave: *Forjamento, Usinabilidade, Tratamento térmico.*

1. INTRODUÇÃO

A racionalização dos processos de produção, em conjunto com o trabalho técnico realizado nos fornecedores de insumos produtivos, apresenta soluções técnicas efetivas, proporcionado aumento da produtividade, com investimentos relativamente menores, que se pagam com a significativa redução dos custos. Em virtude disso, inicia-se um movimento, por parte da indústria, em busca da integração entre as fases do desenvolvimento do produto e o processo de usinagem.

A vida útil da ferramenta é um dos componentes importantes dos custos de produção, por isso, empresas, preocupadas em reduzir seus custos, buscam meios para obter um aumento na vida útil da ferramenta, o que irá proporcionar um aumento de produtividade e redução nos custos do processo, sem alterar a qualidade do produto.

Dentro deste enfoque, o presente trabalho foi realizado explorando a importância da aplicação do processo do brochamento em relação ao comportamento estrutural do aço ABNT 1045 forjado,

na usinagem de furo em braço de articulação, tomando-se como ponto de partida o baixo rendimento da ferramenta e as perdas produtivas.

De acordo com dados da Fiesp, o processo do brochamento representa, em nossos dias, 8% da usinagem na indústria automobilística.

2. USINABILIDADE

A usinabilidade é uma grandeza tecnológica que co-relaciona variáveis como a complexidade e a importância das propriedades do material da peça e a ferramenta de corte em seus processos. De acordo com Ferraresi (1977), Stipkovic Filho (1970), Diniz, et al (2002), Arfeld e Hanum (1977), a usinabilidade não depende somente das condições intrínsecas do material, mas também, das condições da usinagem, das características da ferramenta, do fluido de corte, da rigidez do sistema máquina-dispositivo de fixação-peça-ferramenta, do tipo de trabalho realizado pela ferramenta entre outros. Isso tudo em relação a outro material tomado como padrão.

De acordo com Chiaverini (1998), os fatores principais que influem na usinabilidade do material a ser usinado são: a dureza as propriedades mecânicas, a composição química, os processos de conformação anteriores a frio ou a quente e eventual encruamento. Um material que se deforma bastante plasticamente antes de se romper é caracterizado como dúctil, quando a ductilidade for alta e o teor de carbono baixo, existirão problemas devido ao aparecimento da aresta postiça de corte (APC), o que diminui a usinabilidade do material.

3. TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO

Segundo Colpaert (2000), o tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, conforme o diagrama de fases TTT (Tempo, Temperatura, Transformação).

O tratamento térmico é bastante utilizado em aços de alto teor de carbono ou com elementos de liga, tendo como objetivo:

- Aumentar ou diminuir a dureza;
- Aumentar a resistência mecânica;
- Melhorar a resistência ao desgaste, à corrosão, ao calor;
- Modificar propriedades elétricas e magnéticas;
- Remover tensões internas, provenientes, por exemplo, de resfriamentos desiguais;
- Melhorar a ductilidade, o processo e as propriedades de corte.

Os principais parâmetros de influência nos tratamentos térmicos são:

- Aquecimento: geralmente realizado a temperaturas acima da temperatura crítica, para uma completa “austenização” do aço. Esta austenização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, que vão acontecer em função da velocidade de resfriamento;
- Tempo de permanência à temperatura de aquecimento: deve ser o estritamente necessário para se obter uma temperatura uniforme em toda a massa da peça;
- Velocidade de resfriamento: é o fator mais importante, pois é o que efetivamente vai determinar a estrutura e, conseqüentemente, às propriedades finais desejadas.

As Siderúrgicas e demais indústrias escolhem os meios de resfriamento, ainda, em função da massa e da forma da peça. Dentre os tratamentos térmicos mais utilizados, encontram o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenimento.

3.1 Recozimento

No recozimento, a velocidade de esfriamento é sempre lenta e o aquecimento feito à temperatura superior à crítica. É utilizado, quando se deseja remover tensões devido a tratamentos mecânicos, tais como: o forjamento, laminação e trefilação. O tratamento tem por finalidade:

1. Diminuir a dureza para melhorar a conformabilidade e usinabilidade do aço.

2. Alterar propriedades mecânicas.
3. Ajustar o tamanho do grão.

3.2 Normalização

A normalização é um tratamento semelhante ao anterior quanto aos objetivos, e a diferença consiste no fato de que o resfriamento posterior é menos lento. Visa a refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido, e peças laminadas ou forjadas. É também usada como tratamento preliminar para a tempera e para o revenimento, visando a produzir uma estrutura mais uniforme e reduzir empenamentos.

Com esse processo obtém-se comumente uma granulação mais fina que com o esfriamento no forno. No estado normalizado, as durezas, bem como os limites de escoamento e resistência são um pouco mais elevados que no estado plenamente recozido, ao passo que, o alongamento e a estricção sofrem ligeira diminuição, isto devido ao fato de não se processar completamente a separação da ferrita na zona crítica. A austenita transforma-se, então, em uma perlita lamelar muito fina, que contém mais ferrita que a proporção normal.

A avaliação do teor de carbono, pelo aspecto micrográfico, torna-se, neste caso, impraticável, porque a textura se assemelha à de um aço com teor de carbono muito mais elevado. Da mesma forma, certas propriedades mecânicas de um determinado aço, como por exemplo, a resistência à tração, o alongamento e a dureza Brinell diferem dos valores habitualmente encontrados nos ensaios dos aços recozidos, com igual teor de carbono.

O efeito da normalização é tanto mais intenso, quanto maior o teor de carbono e manganês e, quanto menor a espessura da peça.

Os aços diferenciam-se entre si pela forma, tamanho e uniformidade dos grãos que os compõem e, é claro, por sua composição química, visto que pode ser alterada em função do interesse de sua aplicação final, obtendo-se através da adição de determinados elementos químicos, aços com diferentes graus de resistência, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão, entre outros.

3.3 Têmpera

A têmpera consiste no resfriamento rápido da peça de uma temperatura superior à crítica, com a finalidade de se obter uma estrutura com alta dureza (denominada estrutura martensítica). Embora a obtenção deste tipo de estrutura leve a um aumento do limite de resistência à tração do aço, bem como, de sua dureza, há, também, uma redução da maleabilidade e o aparecimento de tensões internas. Esses inconvenientes são atenuados por meio do revenimento.

3.4 Revenimento

O revenimento, geralmente, sucede à têmpera, pois, além de aliviar ou remover tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade do material e aumenta a maleabilidade e a resistência ao choque. A temperatura de aquecimento é inferior a da zona crítica, e os constituintes obtidos dependem desta temperatura.

3.5 Coalescimento

O Coalescimento - segundo Colpaert (2000) acontece quando o material, no processo de revenimento, aproxima-se da temperatura da zona crítica e permanece muita hora na sua vizinhança, fazendo com que as partículas de cementita se agrupem em partículas maiores, formando glóbulos facilmente visíveis em microscópio, classificados como cementita coalescida ou esferoidizada. O coalescimento chega a reduzir a dureza do aço quase pela metade da que possuía no estado recozido, permitindo, dessa forma, uma economia apreciável na usinagem de aços de elevado teor de carbono (materiais extras duros, hipereutetóides).

4. BROCHAMENTO

O processo de usinagem por brochamento teve origem nos Estados Unidos, sendo patenteado em 1873. A primeira máquina de brochamento externa foi contruída em 1882,

posteriormente, o processo teve grande desenvolvimento com a indústria automobilística, sendo, atualmente, aplicado em quase todo tipo de indústria de produção seriada. Embora o processo de brochamento seja caro, devido ao alto custo do investimento inicial, o seu custo é justificado em função da elevada quantidade de peças a serem produzidas.

As penetrações de avanço praticadas são da ordem de 0,06 a 0,15 mm, de modo que, espessuras maiores de material a ser removido resultam no emprego de uma ferramenta com um número elevado de dentes em série e máquinas com curso maior.

O processo de brochamento é importante na produção de itens com superfícies bem acabadas e com precisão dimensional, competindo, favoravelmente, com outros processos de usinagem como furação, fresamento, retificação e alargamento.

De acordo com Schartz (1951), Dalmaso (2005), Lautec (2005), Forst (1973), Stemmer (1992), o brochamento é um processo de usinagem, em que o movimento de corte é basicamente linear, como no plainamento, caracterizando-se, porém, pelo emprego de uma ferramenta de dentes múltiplos, de alturas crescentes, dispostos em série, denominada Brocha (*broach*), relativamente, comprida, que pode ser usada na usinagem de furos, utilizando esforços de compressão ou tração (brochamento interno), ou arrastada sobre a superfície de uma peça (brochamento externo).

A disposição conveniente dos dentes na brocha permite realizar, simultaneamente, a operação de desbaste, de semiacabamento e de acabamento da peça. No brochamento helicoidal é executado um movimento rotativo por parte da ferramenta em relação ao eixo longitudinal do elemento em usinagem que se sobrepõe ao movimento linear da mesma. Durante a operação de brochamento, a ferramenta ou a peça de trabalho podem ser movimentadas normalmente na direção horizontal ou vertical.

O bom acabamento obtido no processo de brochamento explica-se pelo grande número de dentes da brocha, cada dente remove uma camada de material relativamente fina, porém, a camada total de material removida pode ser considerável.

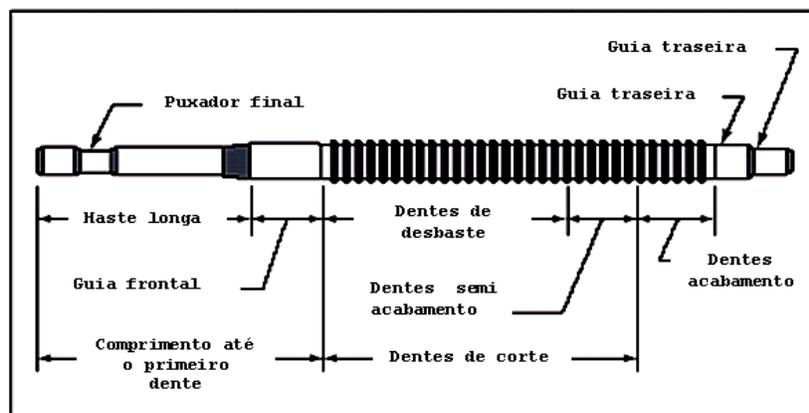


Figura 1. Partes principais de uma brocha cilíndrica interna, segundo norma DIN 1415.

No brochamento de furos em peças fundidas ou forjadas, as solicitações mecânicas aplicadas modificam a estrutura do material, deformando os grãos, e criando tensões, o que aumenta a resistência, a dureza e diminuem o escoamento. Por isso, foram desenvolvidas ferramentas de corte para brochamento interno com perfis nos dentes de desbaste (hexagonal, radial e múltiplas ranhuras).

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho visa a avaliar a modificação dos parâmetros de tratamento térmico, realizado após o processo do forjamento de braço de articulação (*relay*), com a finalidade de melhorar a usinagem por brochamento de furo (Figura 2), contribuindo dessa forma, para a melhoria da produtividade desta peça.

5.1 Material pesquisado

Peça: braço de articulação forjado em aço ABNT 1045 com composição química %C 0,43-0,50 - % Mn 0,60-0,90 - %S 0,05 máx.



Figura 2. Braço de articulação forjado em aço ABNT 1045

5.2 Tratamento Térmico normal e modificado braço de articulação

Tabela 1. Mudança executada no tratamento térmico da peça (braço de articulação).

Tratamento Normal	Tratamento Modificado
-----	Normalização a $900 \pm 10^\circ\text{C}/20\text{min}$
Tempera a $860 \pm 10^\circ\text{C}/90\text{min}$	Tempera a $860 \pm 10^\circ\text{C}/90\text{min}$
Resfriamento em óleo	Resfriamento em óleo
Revenimento a $350^\circ\text{C}/180\text{min}$	Revenimento à $450^\circ\text{C}/180\text{min}$
Resfriamento ao ar livre	Resfriamento ao ar livre
Dureza na superfície e núcleo de 290 HB	Dureza na superfície e núcleo de 270 HB
Tamanho de grão conforme norma ASTM de 2 a 3	Tamanho de grão conforme norma ASTM de 7 a 8

5.3 Ensaios realizados

Para mostrar a influência da modificação da estrutura na usinabilidade do material, obtida por meio de mudança no tratamento térmico, foram realizados os seguintes ensaios em peças com tratamento normal e modificado, bem como na ferramenta (brocha):

- Análise química da estrutura do material da peça
- Verificação da cilindricidade do furo analisado
- Verificação da potência consumida na operação de brochamento do furo
- Verificação da rugosidade
- Verificação da dureza
- Verificação do desgaste da brocha

5.4 Equipamentos usados para os ensaios

- Brochadeira modelo NUV 10-14 Nachi, origem Japão.
- Equipamento de medição de cilindricidade tipo *Roundtest* Extreme RA-2000 CNC -Mitutoyo.
- Aparelho aferidor análogo marca *Marposs* modelo E18.
- Alicata amperímetro digital modelo *Clamp* ET 3102 marca Minipa, (procedência E.U.)
- Espectrofotômetro por difração de raios-X (*Element analyser* tipo JSX-3000 *Maker*: Jeol).
- Rugosímetro modelo Surf-test SJ-400 - Mitutoyo.
- Durômetro Mitutoyo modelo *Wizhard* Duro SI-001-DDB.
- Microscópio Olympus Tóquio PME IE-04/6.

- Micrômetro digital modelo 293-806 marca - Mitutoyo.

5.5 O processo

A ferramenta, já presa na máquina, é introduzida no furo da peça, sendo executada a seguir a operação de brochamento (Figura 3a). Utiliza-se um calibrador tampão passa e não-passa, para o controle dimensional do furo (Figura 3b).

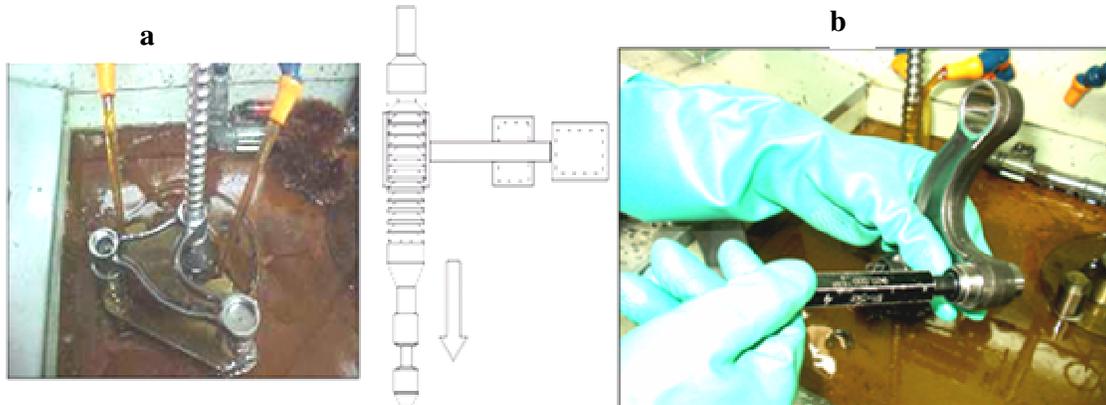


Figura 3. a) brochamento da peça b) controle dimensional com calibre passa não passa

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra o resultado da verificação da tolerância geométrica de cilindridade (especificada 21 μm), em quatro corpos de prova com tratamento normal e quatro corpos de prova com tratamento modificado.

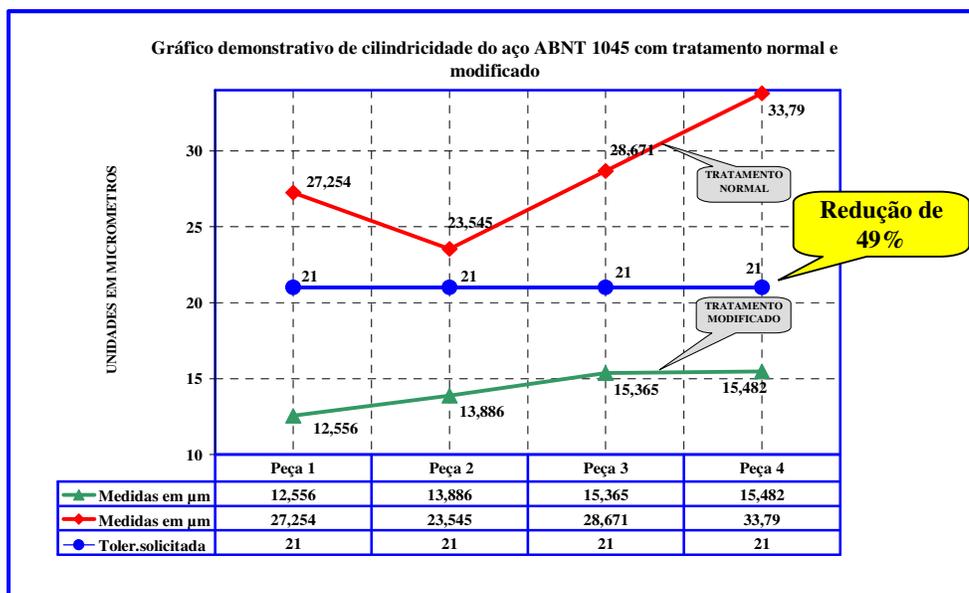


Figura 4. Tolerância de cilindridade

Nos corpos de prova com tratamento normal identificou-se, já no ensaio de controle dimensional, anomalia caracterizada pela dificuldade na introdução do calibrador passa não passa no furo, o que foi ratificado com os resultados obtidos na verificação da cilindridade com medidas fora de especificação. Na verificação dos corpos de prova com tratamento modificado, os valores ficaram dentro da tolerância e com uma faixa de dispersão menor. O equipamento utilizado foi o Roundtest extreme RA-2000 CNC da Mitutoyo.

O ensaio de medição da potência foi realizado em quatro posições, durante a operação de brochamento do furo (Figura 5) em 10 corpos de prova com tratamento normal e 10 corpos de prova com tratamento modificado. Na Figura 6, pode-se verificar que a média geral de potência consumida nos ensaios com tratamento normal foi de 3,485 kW e nos ensaios com tratamento modificado de 3,411 kW, a variação dos resultados coloca em evidência uma variação na estrutura do material (falta de homogeneidade) e conseqüente variação de resistência durante o processo. O equipamento utilizado foi um alicate amperímetro digital modelo *Clamp* ET 3102 Minipa, e os dados coletados (Ampéres) serviram de base para o cálculo da potência em kW, considerando-se uma tensão constante no valor de 380 Volts.

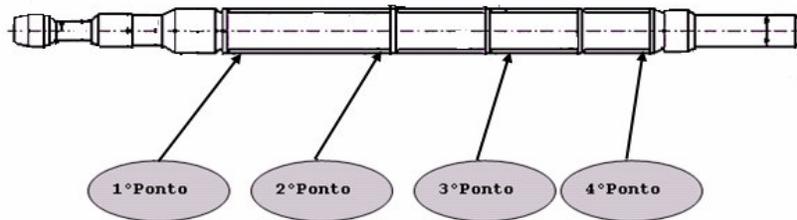


Figura 5. Pontos de medição da potência consumida no brochamento do furo da peça

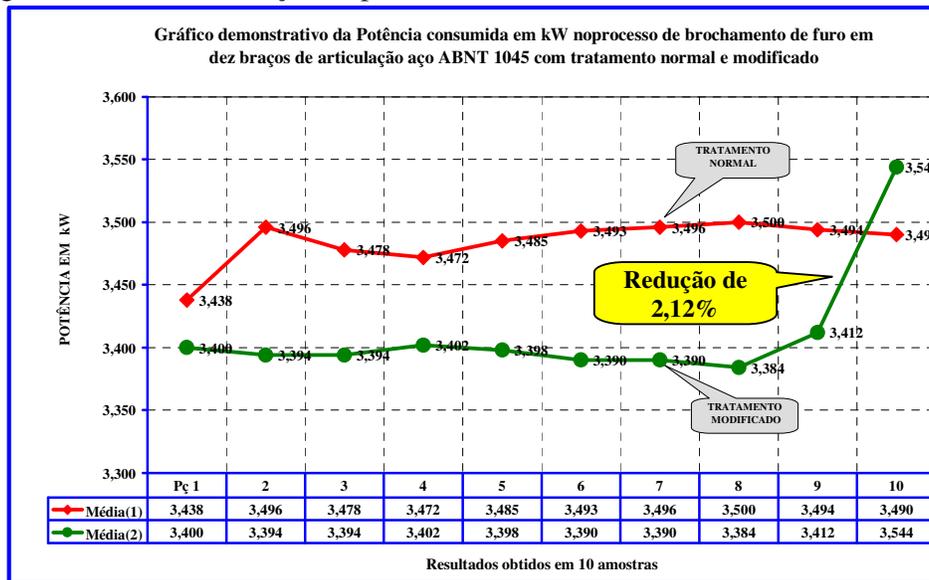


Figura 6. Potência Consumida em kW.

Outra medição analisada foi a rugosidade dos furos usinados, conseqüência direta das propriedades físicas e mecânicas do material, da geometria da ferramenta das condições de fixação, do comportamento dinâmico da máquina-ferramenta, da deformação plástica, do cavaco produzido e do fluido de corte utilizado. A rugosidade foi medida em 03 corpos de prova fracionados em 04 partes para cada uma das duas condições de tratamento térmico (Figura 7), utilizando-se um rugosímetro modelo SJ-400 da Mitutoyo. Os resultados verificados (Figura 8) mostram variações normais em cada tipo de medição, mas a comparação entre os dois grupos de medições apresenta uma variação média de 46,3%, o que atesta a melhor homogeneidade da estrutura do material da peça devido ao tratamento modificado.

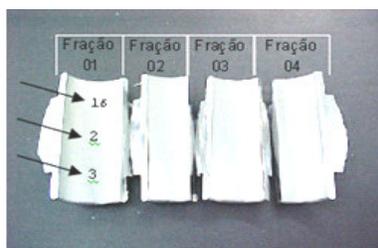


Figura 7. Indicação dos lugares de medição da rugosidade.

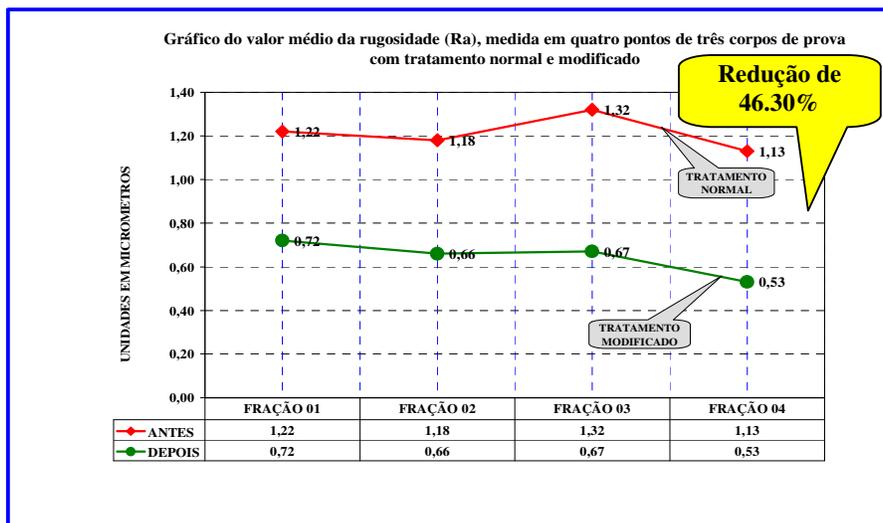


Figura 8. Média das rugosidades Ra em μm .

A medição relativa à dureza foi realizada em seis pontos, em uma das extremidades de três peças, com o auxílio de durômetro modelo Wizhard duro Mitutoyo (Figura 9). Verifica-se na análise dos dados apresentados, uma redução de 5% no valor médio da dureza na superfície e 3% no núcleo, em relação ao tratamento normal. Constata-se, também que os valores, depois do tratamento modificado, apresentam pouca dispersão, o que mostra uma melhor homogeneidade devido ao melhor rearranjo da rede cristalina do material, em consequência direta do tempo e da temperatura do revenimento. A especificação de projeto para a dureza final da peça é 287 ± 20 HB.

A ferramenta (brocha), na usinagem em peças com tratamento normal, apresentou desgastes e deformações por abrasão nos perfis das facas de corte, o que prejudicou sensivelmente o grau de acabamento dos furos, sendo necessário removerem durante a afiação da ferramenta até 0,35 mm. O desgaste da ferramenta mostrou-se irregular e com entalhes, em função do aumento da dureza da peça ultrapassar o valor médio de 200 HB, considerado de boa usinabilidade. Outra possível causa é a presença de inclusões abrasivas extremamente duras que provocam a formação de micro lascas na aresta de corte da ferramenta, tornando o corte interrompido. Após o tratamento modificado, a ferramenta apresentou pequenos desgastes sem deformações em suas facas de corte, melhorando o grau de acabamento dos furos usinados e a remoção de material durante sua afiação, que passou para somente 0.15 mm, trazendo como consequência um prolongamento da sua vida útil.

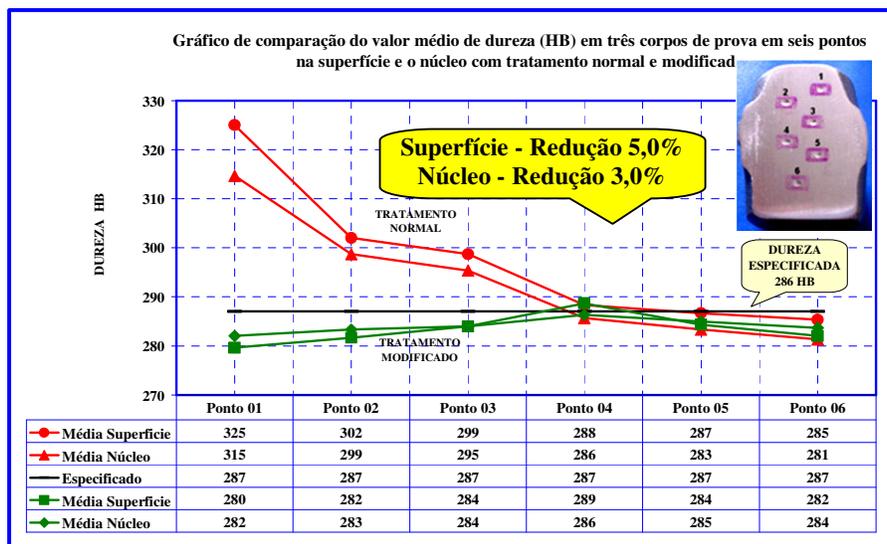


Figura 9. Dureza média em HB na superfície e núcleo da peça com tratamento normal e modificado

A figura 10 mostra o grau de desgaste das facas da ferramenta na área de acabamento com tratamento normal e modificado.

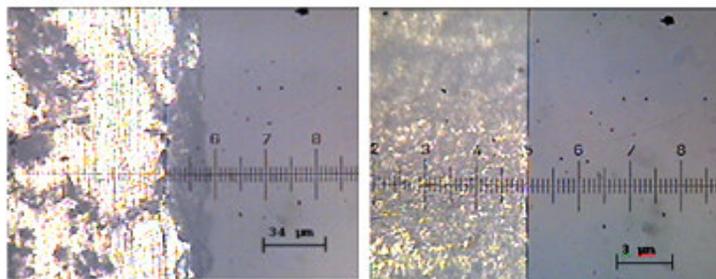


Figura 10. Desgaste da ferramenta nos dentes de acabamento com o tratamento normal e modificado

7. CONCLUSÕES

Ao final deste estudo realizado sobre o brochamento interno de braço de articulação em aço ABNT 1045 forjado, foi possível concluir que:

- O comportamento e as propriedades mecânicas dos aços dependem, não somente da sua composição química, mas também, de como a estrutura reticular se apresenta em função dos tratamentos térmicos a que são submetidos.
- A cilindricidade da peça melhorou 49% após o tratamento modificado.
- A redução da potência consumida mostrou uma variação da estrutura do material após o tratamento térmico modificado.
- A rugosidade média, após o tratamento térmico modificado, apresentou uma melhoria de 46,3%.
- A dureza apresentou uma melhoria média de 5% e de 3% no núcleo após o tratamento térmico modificado.
- Houve uma nítida melhora no desgaste por abrasão da ferramenta e, em conseqüência, um aumento da sua vida útil.
- O controle sobre a estrutura cristalina durante o processo de tratamento modificado resultou numa maior produtividade da ferramenta brocha, garantindo a qualidade do produto com um menor custo por peça.

8. REFERÊNCIAS

- ARFELD, E. D.; HANUM, A. Aços de Corte Fácil de baixo Carbono. **Metalurgia - ABM**. Vol. 33, nº. 241, p. 773 – 776, dezembro, 1977.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ª. ed.; São Paulo, Edgard Blucher, 2000.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6º ed., São Paulo, McGraw-Hill, 1998.
- DALMASO, A .R . **Equipamentos Industriais**, São Paulo; Entrevista concedida em 20 de outubro de 2005,
- DINIZ, A. E. MARCONDES, F. C.; COPPINI N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo, 5ª ed.; Editora Artliber 2002.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo, p. 566-568, Ed. Edgar Blucher, 1977.
- FORST, O. **Hints on broaching**, Soligen, Berlim, 1973.
- LAUTEC, **Fabricante de ferramentas de brochamento standard e especiais de precisão**, São Paulo; Entrevista concedida em 20 de agosto de 2005.
- SCHATZ, A.: **Innenraumen**. WB 26, 3ª ed., Dreher, Berlim, 1951.
- STEMMER, CASPAR E. **Ferramentas de Corte II.**, v. 3 e 4, 1992.
- STIPKOVIC FILHO, M. **Usinagem**, São Paulo, pág. 69, 1970.

INTERNAL BROACHING OF ARTICULATION ARM IN ABNT 1045 FORGING STEEL

Celso Cardoso de Lima

Universidade de Taubaté – UNITAU, Mechanical Engineering Department, Daniel Danelli, St., s/n
- Jd. Morumbi Taubaté - SP – Brazil ZIP Code 12060-440, phone.: (011) 6460-5515, Fax.: (011)
6432-5106, e-mail: celso.cardoso@yamaha-motor.com.br

Gilberto Walter Arenas Miranda

Universidade de Taubaté – UNITAU, Mechanical Engineering Department, Daniel Danelli, St., s/n
- Jd. Morumbi Taubaté - SP – Brazil ZIP Code 12060-440, phone.: (012) 3625-4191, Fax.: (012)
3629-2566, e-mail: gilware@terra.com.br

Abstract

The Industry, in the search of the competitiveness, rationalizes their production processes, making possible the integration between the phases of development of the product and machining operations seeking a better benefit/cost. Inside of that focus the machinability process for broaching appears as a natural solution for certain type of operations. The process uses a tool rough-hewing , semi-finish and finish in sequence. The efficiency of the process is in the increase of the quality: reduction of pieces with anomalies, reduction of operational time, productivity increase , costs reduction of the machined piece and the relief of the workers' mental and physical tension for importuning accomplished tasks in a simplified way. This work seeks to show the results obtained in the process of hole broaching in an articulation arm, through the change of the micro structure of the forged steel ABNT 1045, obtained through thermal treatment of normalization and heat treatment with select control of temperature for the production of a defined micro structure,

with warranty of mechanical properties as resistance and ductility. As consequence, they were obtained some significant improvements in the machinability of the material of the piece and in the useful life of the tool. Due to the variations of productivity of the brush, analyses were accomplished in the structure of the material, in the flanks and in the degree of superficial finish of the tool. In the tests accomplished in pieces were done measurements of: cilindricity, medium potency consumed, roughness and hardness.

Words Key: Forging, Machinability, thermal Treatment.