

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO PUNÇONADO DE FURAÇÃO DE CHAPAS
ESPESAS A ALTAS TEMPERATURAS

por

Gustavo Giordani

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO PUNÇIONADO DE FURAÇÃO DE CHAPAS
ESPESSAS A ALTAS TEMPERATURAS

por

Gustavo Giordani

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof.^a Cintia C. Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 08 julho de 2011.

DEDICATÓRIA

Aos meus maiores incentivadores, meus maiores mestres - Prof. Euc Giordani e Prof. Milede Possamai Giordani. Por todo o incentivo e empenho durante todos os anos dedicados à minha formação como pessoa e como profissional.

Ao meu irmão, Tiago Giordani, pela incomparável força e capacidade de ajudar nos momentos mais necessários.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a orientação, ajuda e boa vontade de muitos profissionais que dedicaram seu tempo na elaboração e construção deste projeto. Agradeço de princípio, o Eng. Tomaz Petracco e o Eng. Jaques Araripe Suris pelo incentivo e ajuda na elaboração do escopo do trabalho.

Agradeço ao Graduando em Eng. Metalúrgica, Gustavo Valentino Veit, que ajudou incansavelmente durante todo o projeto, dando suporte no que fosse preciso para que os resultados fossem obtidos. Aos Graduandos em Eng. Mecânica, Luis Guilherme Martini Bolfoni, Anderson Andrighetti Letti, Henrique Zenker e Diego Brum Gendelsky, pelas sugestões e suporte durante a fase de elaboração do experimento.

Aos Metalúrgicos, Amarildo da Silva Rocha, Paulo Portela e equipe, pela paciência e rapidez na fabricação das peças que possibilitaram que este projeto se tornasse uma realidade. Ao Técnico em Metrologia, Ricardo Bonatto Pohlmann, que ajudou no estudo dimensional dos corpos de prova.

Ao Eng. de Materiais, Tiago Giordani pelo tempo dedicado a análise metalúrgica das peças.

Agradeço também a orientação da Prof.^a Cintia C. Petry Mazzaferro, pela dedicação e análise crítica que tornaram este trabalho uma realidade.

Giordani, G. **Análise Experimento do Processo Puncionado de Furação de Vigas Espessas a Altas Temperaturas**. 2011. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

A aplicação de furação através de puncionamento em chapas finas tem sido utilizada em larga escala na indústria, mas quando chapas espessas são consideradas, geralmente outros métodos são aplicados. Nestes casos, com o uso do puncionamento a qualidade dimensional é reduzida devido à combinação entre elevada carga e grande folga necessárias entre punção e matriz. Em vista disto e pela carência de estudos sobre o assunto, uma bancada de furação de chapas espessas a altas temperaturas foi projetada, manufaturada e montada a fim de avaliar os efeitos que tais temperaturas poderiam gerar sobre a qualidade dos furos. Chapas do material SAE 5140 a 1100°C, com 20 mm de espessura e 100 mm de largura, foram perfuradas com um punção de 20,3 mm diâmetro a 5 mm/s. A folga utilizada foi de apenas 1%. Após o procedimento experimental, o dimensional e as principais características resultantes dos furos obtidos foram analisados. Observou-se que a região de arredondamento foi fortemente reduzida devido à utilização de prensa-chapas o qual também reduziu o empenamento do corpo de prova. Esta região representou apenas 7,5% da espessura da chapa. A variação máxima do diâmetro interno ao longo da espessura não variou mais que 0,09 mm em relação ao diâmetro nominal, assim como a circularidade máxima encontrada não ultrapassou 0,1 mm. A zona de fratura, que em chapas furadas a temperatura ambiente geralmente representa 70% da espessura, foi praticamente eliminada neste procedimento experimental. A pequena folga utilizada, inferior ao aconselhado para chapas finas a frio, possibilitou a geração de furos com saída de rebarba praticamente desprezíveis. São apresentadas também análises de fibragem do material perto da região perfurada e também perfis de dureza para chapas normalizadas e temperadas em água logo após o procedimento experimental. Apesar de o processo ter sido realizado a temperaturas que acarretam em distorções no material após o resfriamento, a precisão dimensional atingida com este tipo de processo superou as expectativas quanto à qualidade e o potencial de aplicabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: furação, altas temperaturas, chapas espessas

Giordani, G. **Experimental Analysis of Punching Process of Thick Plates at High Temperatures**. 2011, 19 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

Punching process in thin plates has been applied in large scale in the industry, but when thick plates are considered, generally other methods are used. In these cases, the use of punching reduces the dimensional quality owing to the combination of elevated load and large clearance necessary between punch and die. Considering these facts and the lack of studies about this matter, a punching probe for thick plates at high temperatures was projected, manufactured and assembled in order to evaluate the effects that high temperatures could cause on the quality of the holes. Plates of SAE 5140 at 1100°C, 20 mm thick and 100 mm large, were pierced with a 20,3 mm diameter punch at 5 mm/s. It was used 1% clearance. After the experimental procedure, the dimensional and the main resulting characteristics of the holes were analyzed. The use of a sheet holder strongly reduced rollover which also caused warp reduction. This region represents only 7,5% of the plate thickness. The maximum variation throughout the internal diameter of the holes does not exceed 0,09 mm of the nominal diameter and the maximum circularity found was about 0,1 mm. The fracture zone, which at room temperatures generally is 70% of the thickness, was practically vanished in this experimental procedure. The lower clearance compared to thin sheets, has enabled practically the elimination of the burr. Also, an analysis of the material flow direction near the hole and also the hardness profile of normalized and quenched plates are presented. Generally, the high temperature used in this experimental procedure causes distortions in the material after cooling, however the dimensional precision reached with this process overcame the expectations regarding quality and applicability potential.

KEYWORDS: punching, high temperatures, thick plates.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
4. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE FURAÇÃO A QUENTE	5
4.1. DETERMINAÇÃO DA CARGA DE FURAÇÃO	6
4.2. PROJETO DA BANCADA DE FURAÇÃO	7
4.3. MONTAGEM BANCADA DE FURAÇÃO	9
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	10
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
7. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Anexo I	16
Anexo II	17
Anexo III	18

1. INTRODUÇÃO

Processos de cisalhamento e perfuração de chapas são utilizados vastamente em diversos setores da indústria. Tais práticas podem ser utilizadas em operações intermediárias de produção ou até mesmo, em casos menos frequentes, gerar produtos acabados. A norma DIN 8588 [Tschätsch, 2005] classifica o processo de separação de chapas entre corte aberto e fechado. No corte aberto há a separação das chapas em mais partes, enquanto que no corte fechado há geração de perfurações. Entre os diversos métodos para a realização de cortes fechados, há preponderância na utilização do corte por puncionamento, definido pela norma como a separação ou segregação de parte do componente sem a formação de cavaco. Esse processo é utilizado tanto para a diminuição de massa, assim como para a geração de cavidades que servirão como engate para outros componentes.

Além do processo puncionado para a geração de furos, existem outros métodos para a separação e furação de chapas. Pode-se citar o corte a gás, o corte a laser, o corte a plasma e o corte fino. Cada uma destas técnicas encontra espaço dentro de determinados setores que a selecionam dependendo da aplicação e dos requerimentos do produto em fabricação. A geração de furos por processos de corte convencional, também chamado de puncionamento, é empregada em alta escala pela sua relativa simplicidade de aplicação, grande capacidade produtiva, baixo custo e boa qualidade dimensional. Este método tem se mostrado adequado para a maioria das aplicações e, portanto, tem tido grande aceitabilidade pela indústria.

Porém, as aplicações do processo de puncionamento são geralmente limitadas para chapas com espessura inferior a 6,4 mm [ASM Handbook, 1988]. Para chapas de maior espessura, que requerem boa qualidade superficial e dimensional, o processo geralmente é realizado com broca. A furação gerada através da utilização de broca exige a utilização de ferramentas caras e, quando o material da chapa está temperado, desgasta a broca mais rapidamente gerando a necessidade de troca. Em virtude disto, alguns estudos têm sido realizados sobre processos de puncionamento em chapas espessas.

A bibliografia existente sobre furação com punção, independentemente da espessura, da temperatura e das geometrias dos componentes, faz menção a algumas características particulares a qualquer processo de puncionamento. Abaixo da chapa a ser perfurada, conforme é mostrado na Figura 1.1, situa-se uma matriz com diâmetro levemente maior que o do punção. A relação entre a espessura da chapa e diâmetro do punção, assim como a folga existente entre punção e matriz, são as principais características que garantirão as propriedades dimensionais e de acabamento do furo. No primeiro estágio do puncionamento, conforme é mostrado na 2ª fase da Figura 1.1, ocorre na chapa uma deformação elasto-plástica, chamada de zona de arredondamento ou indentação. Os materiais mais dúcteis têm esta região mais saliente devido à alta capacidade de deformação sem rompimento. A utilização de prensa-chapas melhora a qualidade do furo, pois reduz a fase de indentação e evita ou ameniza o empenamento da chapa. Quando a tensão induzida no material atinge a tensão máxima, ocorre a formação de uma zona cisalhada que apresenta como principal característica a parede lateral totalmente vertical, seguindo a forma do punção (3ª fase da Figura 1.1). Geralmente estas duas zonas, anteriormente descritas, abrangem 30% da espessura da chapa, porém dependendo da folga, do material, da geometria do punção entre outros fatores, este valor pode variar. Quando a capacidade de deformação do material atinge seu limite, surge na aresta de corte da matriz uma trinca que cresce em direção a aresta de corte do punção, conforme representada na 4ª fase. Por fim, o material é desprendido totalmente da chapa. Em seguida o punção recua e o processo de furação se completa. Ao lado da 5ª Fase são mostradas as regiões características do furo obtidas através do puncionamento.

A perfuração com punção gera um furo que somente é reto e suave por uma porção da espessura da chapa. A região de fratura do material tem alta rugosidade e gera na saída uma rebarba que muitas vezes pode prejudicar a aplicação, a fabricação ou a aparência do produto. Outra característica indesejada do processo é o aparecimento da zona de

arredondamento. Dependendo da folga e da utilização ou não de um prensa-chapas, a altura desta zona pode variar consideravelmente, já que a força normal aplicada aumenta a força de atrito, dificultando que a superfície da chapa se deforme. Sabe-se que a utilização de maior folga acarreta em maior vida útil do punção e menor carga de cisalhamento, já que as tensões induzidas nas arestas de corte são menores, porém a qualidade dimensional é afetada diretamente. As recomendações para folga variam bastante, mas geralmente estão entre 3% e 12,5% da espessura da chapa [ASM Handbook, 1988]. Deve-se entender esta folga em percentual como sendo a folga no raio e não no diâmetro.

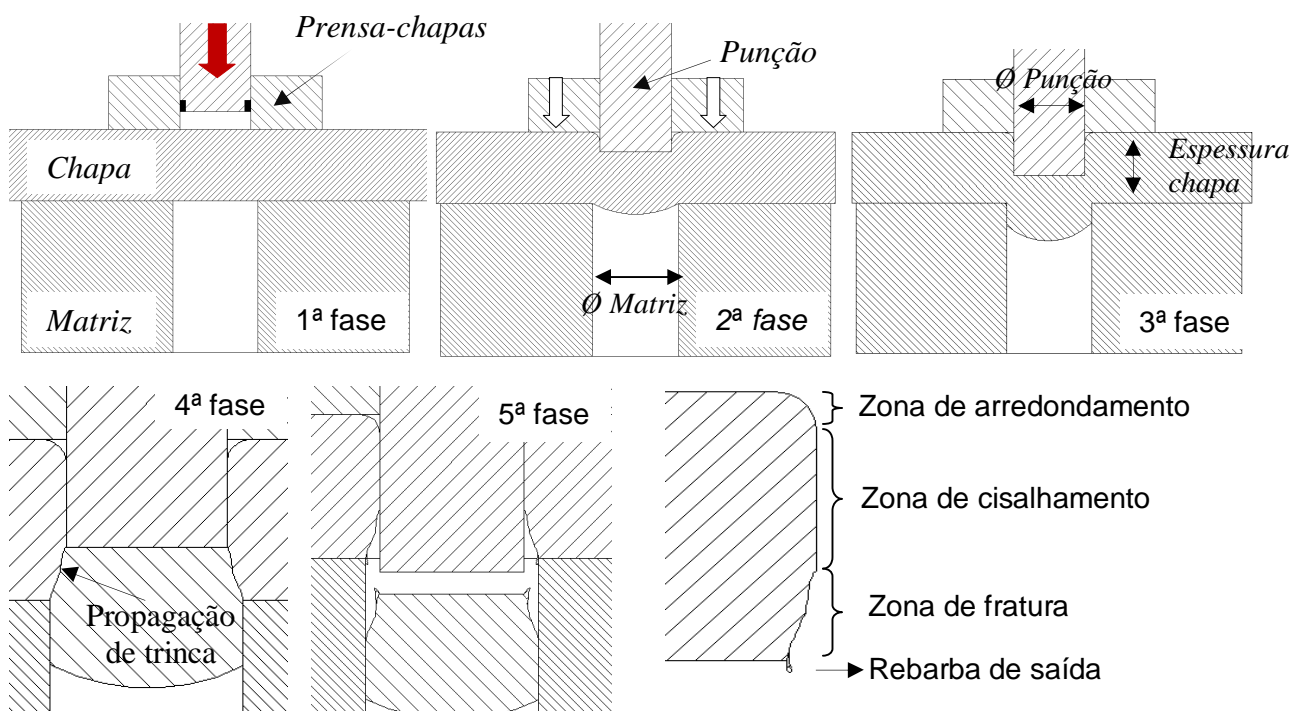


Figura 1.1 Fases do processo de punção de chapas e regiões características do furo

As características da superfície perfurada dependem de inúmeros parâmetros que são, em maior ou menor grau, determinantes para a qualidade e forma do orifício, entre eles pode-se citar:

- folga entre punção e matriz;
- forma do punção;
- material e dureza da aresta de corte do punção e da matriz;
- utilização de prensa-chapas e força aplicada durante processo;
- relação entre diâmetro do punção e espessura da chapa;
- propriedades mecânicas e metalúrgicas da chapa a ser cisalhada;
- lubrificação;
- alinhamento entre punção e matriz;
- equipamento de acionamento do punção;
- velocidade do punção.

Apesar de não mencionado acima, a temperatura em que a chapa, a matriz e o punção se encontram são fatores modificadores destes parâmetros, já que a curva de resistência ao escoamento a quente é influenciada pelas propriedades do material, pela temperatura, pela deformação e pela taxa de deformação. Sabe-se que o aumento da taxa de deformação do material tende a aumentar a tensão máxima da curva tensão x deformação, assim como, o aumento da temperatura aumenta a tenacidade do material, reduzindo sua tensão última.

2. OBJETIVO

Apesar da indústria, principalmente a automobilística, utilizar o processo de corte convencional para chapas finas, poucos estudos foram realizados considerando elevadas espessuras. Além disso, a utilização de altas temperaturas também não tem sido considerada. Haja vista a carência de informações sobre o efeito destes parâmetros de processo, o presente trabalho tem o intuito de gerar informações sobre o processo de furação de chapas a altas temperaturas e com elevada espessura. Todo o procedimento experimental será realizado dentro de uma empresa do setor metal-mecânico. Muitos dos parâmetros já mencionados anteriormente serão mantidos constantes, enquanto alguns outros poucos sofrerão variações, podendo-se avaliar os efeitos que estas variações acarretarão na qualidade e na capacidade de geração do furo. Para tanto, uma bancada será desenvolvida com a finalidade de realizar testes e experimentos. Desta maneira, pode-se subdividir o trabalho nas seguintes etapas:

- projeto da bancada e dispositivo de furação, englobando a verificação da força necessária à furação e estudo dimensional para garantir alinhamento e posicionamento do furo;
- fabricação dos componentes necessários;
- montagem do dispositivo na bancada;
- execução de ajustes para garantir processo de acordo com parâmetros pré-estabelecidos;
- execução do processo de furação;
- análise dimensional dos furos;
- análise de fibragem na região afetada pela furação;
- determinação dureza da superfície cisalhada.

Por fim, será realizada a comparação dos resultados das análises com processos de cisalhamento estudados na literatura, avaliando-se os prós e contras deste processo de furação a quente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos relativos ao processo de furação são geralmente limitados aos casos aplicados corriqueiramente na indústria. Quando o processo de cisalhamento de chapas, barras e vigas de grandes espessuras são considerados, há uma grande carência de informações na literatura. No trabalho de Luo, 1999, são realizados experimentos com diferentes geométricas de punções com 13,6 mm e 15,7 mm de diâmetro em chapas com 12,5 mm e 11,5 mm de espessura, ou seja, com relação entre espessura e diâmetro, denominada relação de aspecto, um pouco inferior a unidade. Relações de aspecto próximo ou superiores a unidade caracterizam o processo como sendo processos em chapas espessas. Luo, 1999, constatou que a penetração do punção numa configuração ideal de folga chegou a 30% da espessura até a iniciação da trinca na aresta de corte da matriz. Este percentual é o valor geralmente encontrado em processos de furação de chapas finas. Porém, o autor salienta que independentemente deste fato, a espessura elevada da chapa pode acarretar no aparecimento de duas zonas de fratura. Enquanto o punção penetra na chapa, a região do material perto da aresta de corte da matriz é forçada para dentro da cavidade. Tanto esforços de momento quanto de cisalhamento fazem com que o material chegue a um limite de deformação que acarreta na formação da primeira região de trinca, conforme Figura 3.1a [Luo,1999]. Devido à pequena folga existente entre punção e matriz, a trinca se desloca num plano praticamente vertical, porém, o grande distanciamento entre a aresta de corte do punção com a da matriz, faz com que a propagação da trinca seja interrompida devido ao excessivo encruamento do material. Desta maneira, conforme é mostrado na Figura 3.1b, se inicia uma segunda zona de cisalhamento na aresta de corte da matriz. O aparecimento destas duas regiões se deve à pequena folga existente, pois quanto maior a folga, maior é o comprimento de crescimento da trinca primário que pode seguir propagando sem interrupções até a aresta de corte do punção. Na Figura 3.1c, observam-se as zonas de arredondamento, cisalhamento e fratura para uma

folga de 5%. Em termos de rugosidade superficial, a zona cisalhada é superior em relação à zona de fratura, principalmente devido ao crescimento irregular da trinca.

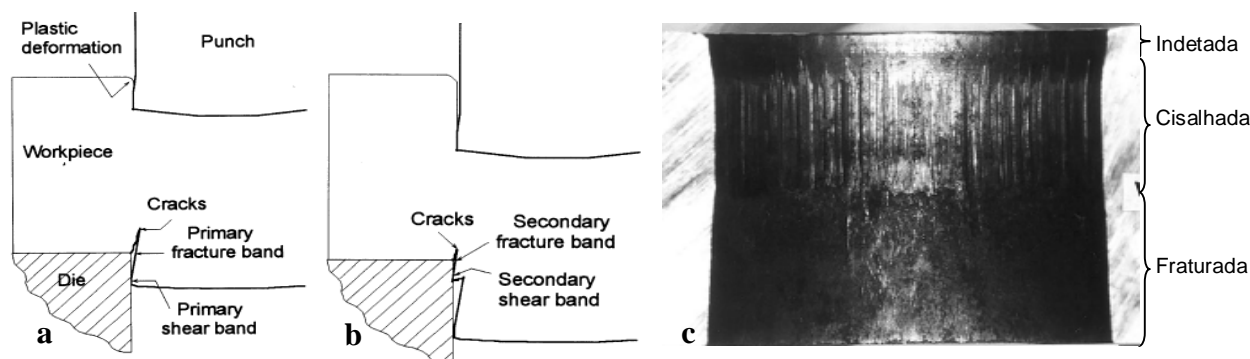


Figura 3.1. Processo de furação de chapas espessas a temperatura ambiente com duas zonas de fratura (a,b); foto mostra as três zonas características do corte (c). [Adaptado Luo, 1999]

Conforme o avanço do punção, a força necessária para realizar a operação varia ao longo da espessura da chapa. Independentemente da dureza, da temperatura, da relação de aspecto, da folga e da velocidade do punção, o formato da curva força x deslocamento é o mesmo. O artigo de Klingenberg et alli, 2008, apresenta esta curva conforme Figura 3.2. As fases I e II representam a região de arredondamento, enquanto a fase III representa a região de iniciação e nucleação da trinca. A fase IV representa a propagação da trinca até a fratura e a fase V é a subsequente fase de desprendimento do material.

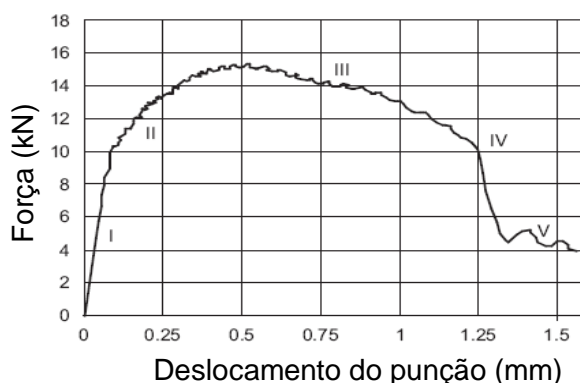


Figura 3.2. Exemplo de força aplicada pelo punção x deslocamento através da chapa. [Adaptado Klingenberg et alli, 2008]

O estudo de Sasada et alli, 2006, dedicou-se à análise do processo de puncionamento em casos em que a relação de aspecto, ou seja, relação entre espessura da chapa e diâmetro do punção variava entre 0,33 a 5. O autor deu grande importância para simulações em elementos finitos para avaliar as cargas necessárias para possibilitar a realização do processo. Foi observado que quanto maior a relação de aspecto, maior é a fase de indentação no começo do corte, pois o aumento da espessura da chapa atrasa o começo da fase de cisalhamento do material.

Apesar do processo de furação analisada no presente trabalho ser realizado a altas temperaturas, as informações dos artigos referentes ao processo em chapas espessas a temperatura ambiente terão grande importância, pois servirão como dados de comparação entre as características analisadas.

Somente um artigo que faz referência ao efeito da temperatura da chapa sobre o processo de furação foi encontrado. Mori et alli, 2008, analisou o processo de furação de chapas com relação de aspecto de 1/5 em seis diferentes temperaturas: 25°C, 650°C, 700°C, 830°C, 970°C e 1070°C. Os resultados apresentados compararam o efeito das diferentes

temperaturas sobre as regiões de arredondamento, cisalhamento e ruptura. Observou-se que o aumento da temperatura aumenta consideravelmente a zona cisalhada, diminuindo significativamente a zona de fratura do furo. Na Figura 3.3, é mostrada as fotos que evidenciam esta variação. A 25°C, a zona de cisalhamento e a região de indentação atingiram cerca de 20% da espessura da chapa, enquanto a 650°C estas duas regiões atingiram em torno de 60%. A 1070°C este percentual chegou perto dos 90%.

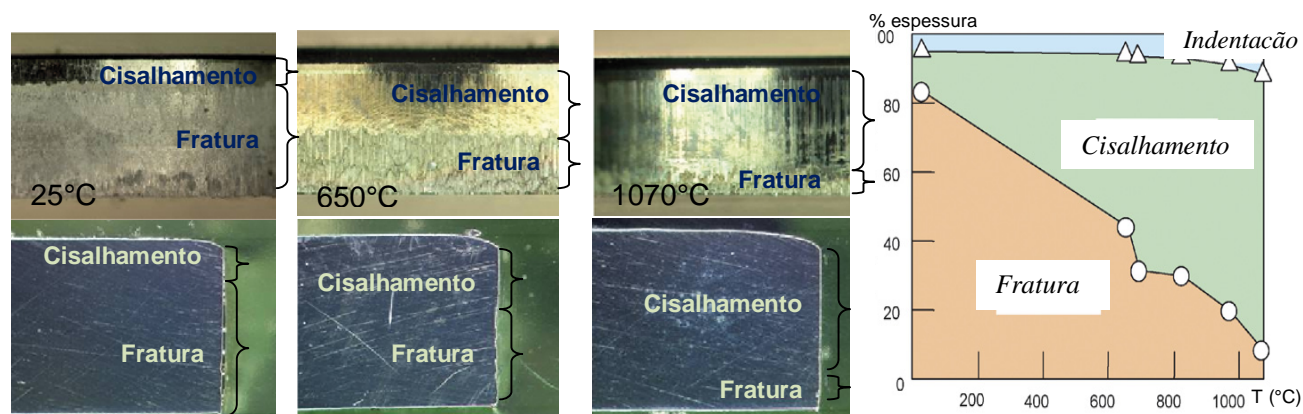


Figura 3.3. Zonas características a 25°C, 650°C e 1070°C no processo de furação. [Adaptado Mori, 2008]

A análise também considerou o efeito que o aumento da temperatura teria sobre a rebarba de saída do furo. Observou-se que a altura da rebarba em relação à espessura da chapa aumentava exponencialmente em temperaturas superiores a 800°C e também com o aumento da folga. Para o estudo foram consideradas folgas de 5%, 10% e 15%, que são valores usualmente utilizados em processos de puncionamento a frio.

O estudo analisou também o efeito da temperatura sobre a rugosidade nas diversas regiões características. Acima de 700°C a rugosidade da região de ruptura dobrou em relação à temperatura ambiente, porém a zona cisalhada manteve a rugosidade praticamente constante para qualquer temperatura. Não foram encontradas variações de dureza para as diferentes regiões independentemente da temperatura.

Este trabalho de Mori et alii, 2008, apresentou características interessantes que em sua maioria favoreceram a utilização de temperaturas elevadas para furação. O aumento da região da zona cisalhada discutida é benéfica, pois caracteriza o furo com um diâmetro praticamente constante ao longo de quase toda a espessura da chapa. Além disso, a diminuição da carga necessária à furação diminuiu o desgaste da aresta de corte do punção e da matriz. Contudo, o aumento da rebarba de saída pode representar alguns problemas para a aplicação do produto ou até mesmo para a sua aparência.

4. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE FURAÇÃO A QUENTE

A fim de realizar a análise do processo de furação a quente em chapas espessas, foi necessário planejar, projetar e construir uma bancada de testes. Com base nos artigos já discutidos, foram definidos diversos parâmetros para a realização do projeto e conseqüente execução. Decidiu-se utilizar uma relação de aspecto próxima à unidade. Assim sendo, o punção foi escolhido arbitrariamente com um diâmetro de 20,3 mm e a espessura da chapa com 20 mm. Não foram seguidas as folgas aconselhadas para chapas, pois o processo a quente, devido à alta tenacidade do material e à diminuição da carga de furação, possibilita a redução da folga, já que a sua diminuição reduz a rebarba de saída. Em vista disto, o diâmetro de entrada da matriz foi determinado em 20,7 mm. Isso significa que no raio a folga ficou em aproximadamente 1%. A primeira necessidade relacionada à definição do processo foi determinar como seria realizado o acionamento do punção e determinar a força necessária para a operação de furação.

4.1. DETERMINAÇÃO DA CARGA DE FURAÇÃO

Usualmente, em processos de furação de chapas finas a frio, a força máxima “ F_{mc} ” para realizar a operação é calculada aproximadamente com a Equação 4.1 [Schaeffer, 2004], onde “ R_m ” é o limite de resistência do material, “ L ” é o comprimento da linha de corte, “ S ” é a espessura da chapa e o fator “ c ” relaciona o limite de resistência do material com a resistência do material contra o corte. Este fator “ c ” varia entre 0,7 para chapas de alta resistência à fratura e 0,9 para chapas com alto alongamento e de baixa resistência à fratura.

$$F_{mc} = c \cdot R_m \cdot L \cdot S \quad (4.1)$$

Neste trabalho, como será mostrado adiante, serão perfuradas chapas do material SAE 5140 a 1100°C com um punção a 5 mm/s. No trabalho de Wang et alli, 2004, são mostradas curvas tensão x deformação para diferentes taxas de deformação deste material. Quanto maior esta taxa, maior é a tensão necessária para uma mesma deformação. Isso se deve a fenômenos chamados de recristalização e recuperação dinâmica. Não há como determinar um valor único para o limite de resistência “ R_m ” no processo de furação, pois a medida que se distancia das proximidades do furo a taxa de deformação diminui progressivamente. Porém, Wang et alli, 2004 mostram as tensões máximas para taxas de deformação entre $0,1 s^{-1}$ e $10 s^{-1}$, variando entre 50 MPa e 120 MPa. Taxas de $10 s^{-1}$ são valores extremamente elevados, que dificilmente ocorrem num processo em que o punção está a uma baixa velocidade. Dever-se-ia utilizar um valor que representasse a taxa de deformação média, porém para determinar este valor somente seria possível através de soluções numéricas. Se for considerado que a tensão máxima da taxa de deformação a $10 s^{-1}$ seja 120 MPa, a força “ F_{mc} ” para furação de chapas de 20 mm de espessura e com diâmetro de 20,3 mm seria de aproximadamente 160 kN. Porém, este valor está superdimensionado devido à velocidade do punção durante o experimento ser de apenas 5 mm/s.

No anexo II é apresentado, juntamente com as simplificações e considerações do processo de furação, a simulação em elementos finitos realizado no Software QForm 3D (2008-2011). Na Figura 4.1 é mostrada a curva de tensão x deformação obtida na simulação da furação a quente. É possível observar que a força máxima necessária para o punção gerar o furo é inferior a 130 kN. Durante o processo há um pico de tensão que decai progressivamente com a diminuição da secção resistente da mesma forma que é mostrado na Figura 3.2 [Klingenberg et alli, 2008]. Com base na combinação da simulação numérica e da Equação 4.1 e sabendo que a erro associado à ambas são bem elevadas devido às simplificações e considerações, selecionou-se um atuador hidráulico com capacidade bem superior ao calculado.

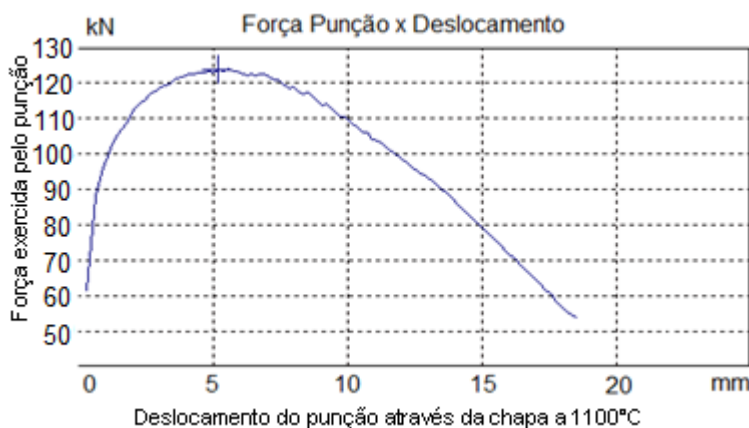


Figura 4.1. Força do punção durante processo de furação das chapas dado pelo programa de elementos finitos. [Adaptado QForm 3D]

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com a bancada de furação a quente já montada, deu-se início ao procedimento experimental. As chapas do material SAE 5140 com 20 mm de espessura e com 100 mm de largura foram aquecidas através de indução eletromagnética. Um campo de alta frequência induz sobre na chapa uma corrente que a esquenta progressivamente. Na Figura 5.1b é mostrado o indutor para o aquecimento do corpo de prova utilizado especificamente para aquecer perfis redondos, enquanto na Figura 5.1a é mostrada a chapa já aquecida posta entre os blocos de retenção um pouco antes do processo de furação ser inicializado.

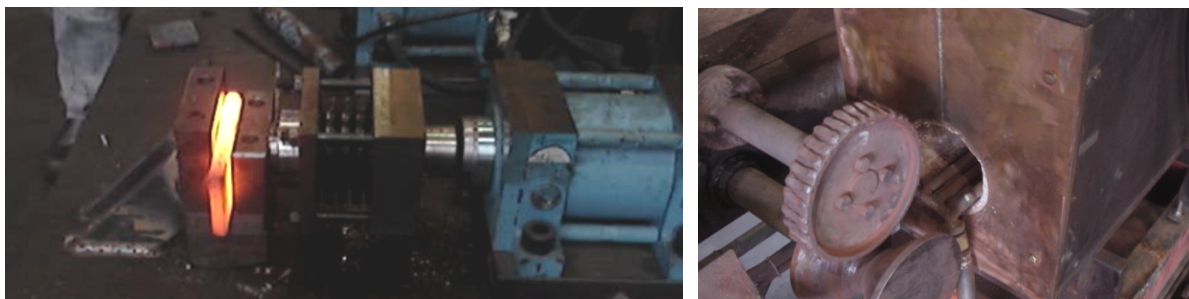


Figura 5.1. Chapa aquecida antes do começo do processo de furação (a); indutor utilizado para o aquecimento da chapa (b)

A fim de determinar a temperatura superficial atingida com o aquecimento indutivo, foi necessário utilizar uma câmera térmica sensível a altas temperaturas segundos antes da realização da operação de furação. Porém, para encontrar a temperatura da chapa é necessário levar em consideração alguns parâmetros relativos ao processo de medição da temperatura. A determinação da temperatura através da faixa de infravermelho gera a necessidade de conhecimento principalmente da emissividade do corpo. Foi utilizada emissividade de 0,92 para a foto mostrada na Figura 5.2 conforme recomendações usuais para aços não moldados com temperaturas variando entre 900°C e 1200°C [Manual Flier Systems, 2006]. Além disso, a temperatura aparente refletiva e a temperatura ambiente utilizadas para a medição foram de 25°C. É possível notar na Figura 5.2 que há três pontos de medição de temperatura na chapa quente. Porém, aços a temperaturas próximas a 1100°C geram rapidamente uma camada oxidada que altera a correta emissividade, assim como a própria temperatura da superfície. Outros fatores como o não aquecimento homogêneo da chapa por toda a sua espessura, já que o indutor não é especificamente utilizado para aquecimento deste tipo de perfil, podem acarretar na alteração da carga necessária para realizar a operação. Levando estes fatores em consideração, pode-se assumir o processo como sendo realizado a aproximadamente 1100°C com variações de $\pm 25^\circ\text{C}$.

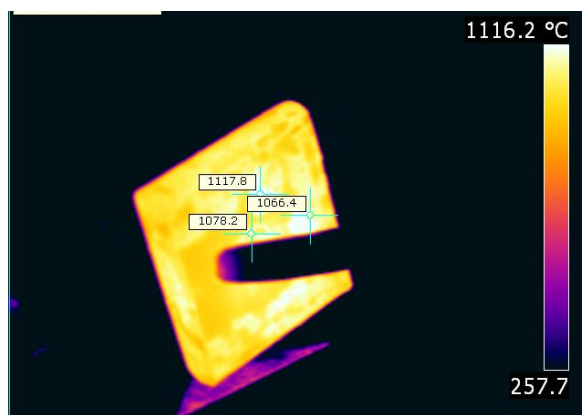


Figura 5.2. Foto mostrando a distribuição de temperatura da chapa a ser perfurada com uma câmera térmica; emissividade utilizada de 0,92

Para o acionamento do atuador, um motor de indução de quatro pólos e de 2,0 HP (1,5 kW) bombeia óleo através das mangueiras para dentro do cilindro hidráulico. Este cilindro tem diâmetro de 160 mm e curso total de 80 mm. Observou-se que a capacidade de bombeio gerou uma velocidade de avanço do pistão e conseqüentemente do punção em aproximadamente 5,0 mm/s durante o processo de furação das chapas.

Com o avanço do punção, o material foi progressivamente perfurado desprendendo o material da chapa. Não foi utilizada lubrificação tanto no contato entre punção e chapa quanto entre a chapa e os blocos de retenção, sendo realizado um furo completo em cada uma de três chapas a 1100°C. Na primeira operação a chapa foi têmpera em água logo após a furação. A segunda e terceira amostras foram resfriadas ao ar. Foram também feitas três perfurações parciais a fim de analisar as etapas do processo.

Sucessivamente à execução do procedimento experimental, foram realizadas diversas análises tanto sobre o material desprendido quanto sobre a região da chapa próxima ao furo. Foi realizado um estudo dimensional verificando diâmetro e circularidade dos furos através do instrumento de medição por coordenadas Zeiss C500. Avaliou-se também, com o perfilômetro Mahr PCV, a região de arredondamento e de saída de rebarba dos furos. Metalurgicamente foi realizada uma análise de dureza nas proximidades dos furos na escala Rockwell C com um durômetro Leipzig. Por fim, para evidenciar as deformações induzidas no material, avaliaram-se as deformações nas linhas de fluxo através de um estudo de fibragem.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o resfriamento das chapas, elas foram passadas por um processo de jateamento a fim de limpar as camadas superficiais. Conforme já mostrado anteriormente, Mori et alli, 2008, mostrou que com o aumento da temperatura a região de ruptura diminui, a região cisalhada aumenta e a região de arredondamento permanece praticamente estável. Pode-se observar na Figura 6.1 a chapa temperada em água já perfurada. A região de indentação não teve uma altura muito elevada, enquanto a região de cisalhamento ocorreu praticamente por toda a espessura da chapa. A fratura do material também foi reduzida severamente em virtude da alta temperatura. Em alguns pontos observou-se que esta região poderia ser até considerada inexistente. A rebarba de saída foi minimizada já que a baixa folga de 1% dificultou que o material ficasse aprisionado entre a matriz e o punção ao final da furação. Estas mesmas características também foram observadas nas chapas normalizadas.

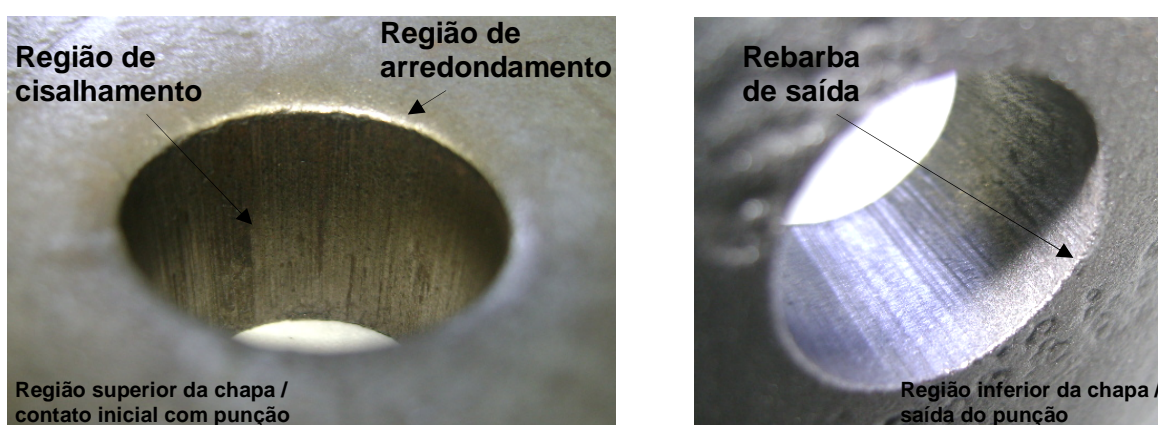


Figura 6.1. Aspecto das regiões superior e inferior da chapa com têmpera em água após processo de furação

Após a visualização inicial das características dos furos, realizou-se um estudo dimensional a fim de determinar a precisão do processo. Utilizou-se um instrumento industrial de medição por coordenadas com resolução de 0,001 mm para realizar a análise. Mediu-se o diâmetro em quatro alturas diferentes ao longo da espessura da chapa, assim como se avaliou

a circularidade¹ de cada um dos três furos. As distâncias utilizadas para realizar as medições foram, em relação a superfície superior, de 4 mm, 8 mm, 12 mm e 16 mm. Na Tabela 6.1 são mostrados estes dados medidos. Considerando que o diâmetro do punção é de 20,3 mm, pode-se observar que o máximo desvio em relação ao diâmetro nominal foi de aproximadamente 0,09 mm, enquanto que a máximo ovalização ficou em aproximadamente 0,1 mm.

Tabela 6.1 – Medição de diâmetro e ovalização dos furos em quatro posições

Dist. da face superior (mm)	Temperado em água		1º Furo com Resfriamento ao Ar (Normalizada)		2º Furo com Resfriamento ao Ar (Normalizada)	
	Diâmetro (mm)	Circularidade (mm)	Diâmetro (mm)	Circularidade (mm)	Diâmetro (mm)	Circularidade (mm)
4	20,377	0,070	20,241	0,098	20,360	0,104
8	20,284	0,024	20,292	0,089	20,298	0,066
12	20,312	0,035	20,319	0,046	20,373	0,039
16	20,219	0,032	20,230	0,053	20,336	0,053
Média	20,298	0,040	20,270	0,071	20,342	0,065
Desvio máximo da Média	0,079	0,030	0,049	0,026	0,031	0,039

Apesar do diâmetro da matriz ser de 20,7 mm, não se observou nenhum grau de conicidade em nenhum dos três furos produzidos. Isso se deve ao fato da região cisalhada ser definido pelo diâmetro do punção. Somente quando há uma região saliente de fratura, definida pela propagação da trinca da aresta de corte da matriz em direção a aresta de corte do punção, é que é possível observar algum grau de conicidade. Porém, como neste experimento esta região foi praticamente eliminada, o diâmetro médio dos furos ficou muito próximo ao diâmetro do punção.

Transformações mecânicas que utilizam temperaturas tão elevadas geram variações dimensionais consideráveis após o resfriamento dos componentes. Schaeffer, 2006, mostra que processo de forjamento a quente em geral apresentam tolerâncias ISO IT 14 a 16 e, em casos especiais, tais tolerâncias podem ser reduzidas para ISO IT12. Considerando o diâmetro de 20,3 mm do punção como diâmetro nominal e também uma tolerância de 0,1 mm, este processo de furação a quente foi capaz de gerar orifícios com tolerâncias ISO IT 11. Isto demonstra que, considerando o processo de fabricação, dimensionalmente os resultados foram muito bons.

Depois da avaliação dimensional da região cisalhada do furo, estudou-se criteriosamente a região de arredondamento gerado no início do processo. Esta região está diretamente relacionada com a tensão aplicada pelo prensa-chapas, pelas propriedades mecânicas da chapa, pela qualidade da aresta de corte, assim como pela velocidade do punção. Quanto maior a ductilidade do material e maior o desgaste do punção, mais saliente será a indentação. Em virtude disto é que a pressão aplicada pelo prensa-chapas é imprescindível para geração de furos com boa qualidade. Avaliou-se a altura da indentação nos três corpos de provas, observando-se que não houve significativa variação entre eles. Na Figura 6.2a é mostrada a curva gerada por um perfilômetro na primeira amostra normalizada. A distância da face superior da chapa até o final da região de arredondamento ficou em torno de 1,5 mm para todas as amostras furadas a 1100°C. A medição em quatro posições ao redor do furo para cada um dos três chapas perfuradas revelou que em nenhuma das doze medições esta medida ultrapassou 1,7 mm. Isto demonstra que a região de indentação, com as condições de contorno impostas e com o nível de desgaste das arestas de corte ainda pequeno, fica em torno de 7,5% da espessura da chapa. A região ao redor do orifício afetada pelo processo não ultrapassou 8 mm da face do furo como mostra a Figura 6.2a.

¹ A circularidade pode ser entendida como sendo o grau de ovalização do furo, ou seja, o quanto o orifício tendeu para um formato elíptico.

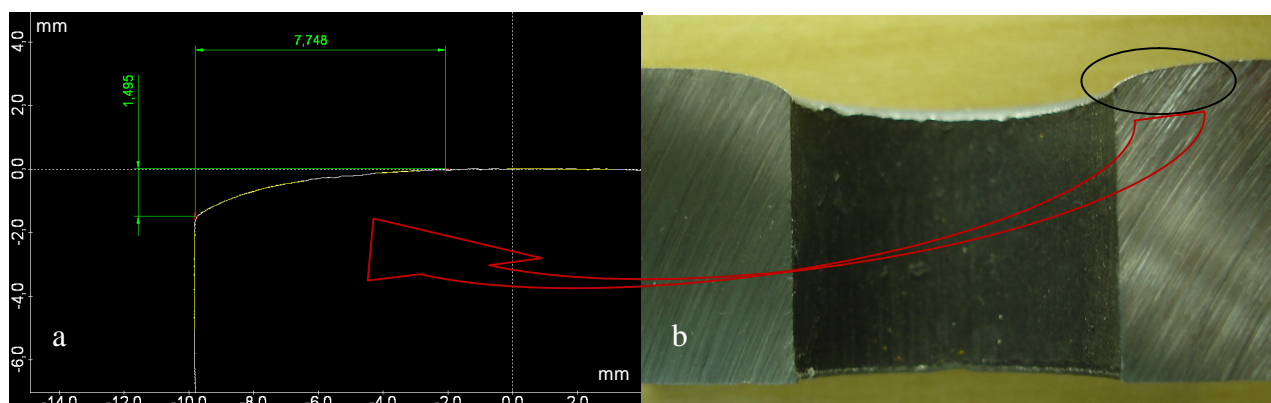


Figura 6.2. Perfil da região de indentação gerado pelo processo de furação puncionado (a); amostra cortada para visualização das principais características do processo (b)

Embora não seja o foco da análise, são apresentadas no Anexo III as características mais pertinentes das massas desprendidas durante o processo de furação. Comentários sobre a saída de rebarba, a descrição da superfície cisalhada e a forma global do corpo são realizados.

Após observar as características da fase de indentação, desenvolveu-se um estudo voltado para a análise de fibragem durante o processo de furação através de furações incompletas, ou seja, avançava-se com o punção parcialmente para dentro da chapa e, em seguida, o recuava. Devido às chapas serem fabricadas com processos de laminação, existe uma orientação horizontal das fibras. Através do ataque com ácido clorídrico sobre as chapas cortadas, foi possível visualizar a deformação que o processo causou sobre estas linhas de fluxo. Na Figura 6.3 são mostradas tais linhas para a primeira fase de indentação, para o começo e também final da fase de cisalhamento. É possível observar que perto das arestas de corte, as linhas se encontram mais comprimidas e que à medida que o material começa a ser cisalhado, somente as regiões mais próximas ao furo sofrem deformações elevadas. As fotos são de amostras normalizadas.

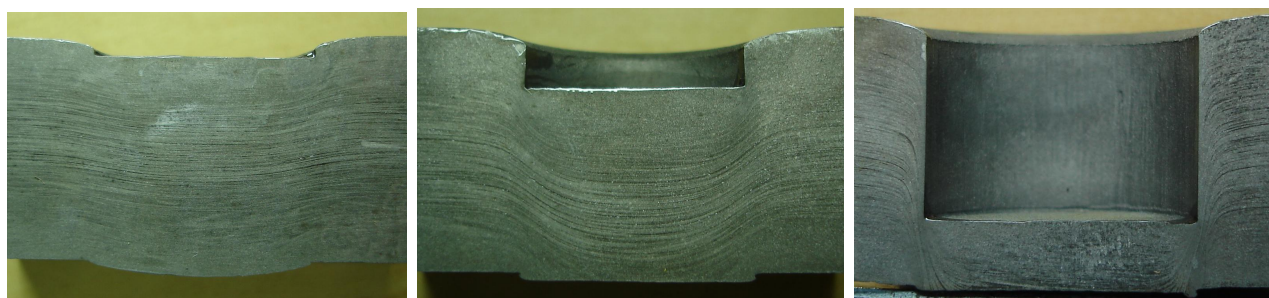


Figura 6.3. Fibragem ou linhas de fluxo da chapa durante etapas intermediárias do processo de furação; ataque de solução de ácido clorídrico

A massa empurrada para dentro da matriz teve que ser cortada da chapa, pois o processo incompleto de furação prendia o material dentro da cavidade do anel de desgaste, impossibilitando a chapa de ser retirada do local entre os dois blocos de retenção

Além da caracterização da fibragem, fez-se uma análise de durezas na escala Rockwell C nas proximidades do furo tanto para uma chapa normalizada quanto para a chapa temperada. Na Tabela 6.1 são apresentados os valores encontrados nos pontos indicados na Figura 6.4b. As durezas altas encontradas na amostras temperadas em água mostram o efeito da microestrutura formada principalmente de martensita. Fica evidente que, devido ao resfriamento mais rápido perto da superfície do furo, as durezas alcançadas foram mais elevadas, enquanto que a 10 mm da face do orifício, as durezas são um pouco inferiores

devido ao resfriamento mais lento. É importante frisar que não foi feito revenimento no material para alívio de tensões. Em aplicações práticas este procedimento deve ser realizado. Já na amostra normalizada, as durezas encontradas foram inferiores e praticamente homogêneas, tanto perto quanto longe da parede do furo. Isso ocorre, pois a taxa de resfriamento não é alterada significativamente independente do local analisado.

Tabela 6.1. Durezas na escala Rockwell C em diferentes locais da chapa

Temperado em Água				Normalizado			
A	55	F	51	A	27	F	29
B	57	G	53	B	29	G	32
C	56	H	50,5	C	30	H	33,5
D	57	I	51,5	D	31,5	I	31
E	57	J	53	E	29	J	31

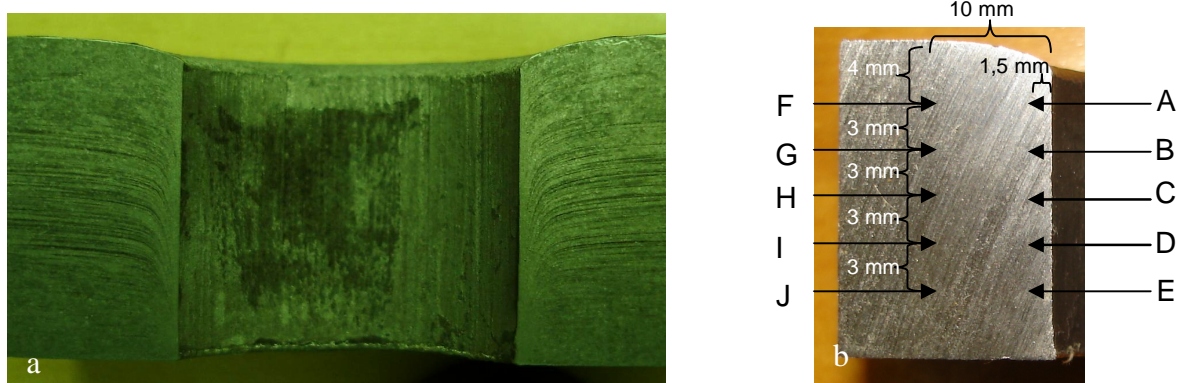


Figura 6.4. Linhas de fluxo para furação completa (a); locais de medição de dureza HRc para chapa temperada e normalizada (b)

7 CONCLUSÃO

Através de análises de artigos, catálogos de fabricantes de componentes mecânicos, e simulações por elementos finitos, uma bancada para furação a quente foi desenvolvida e aplicada com êxito na furação de chapas de aço SAE 5140 com 20 mm de espessura, utilizando uma relação de aspecto próxima à unidade.

As altas temperaturas das chapas, próximo aos 1100°C durante o puncionamento, praticamente eliminou a região de fratura, característica de processos de puncionamento de chapas espessas a frio. Este fato contribuiu para que o orifício permanecesse com um diâmetro praticamente constante ao longo da espessura da chapa.

Com a análise de fibragem puderam ser observadas as linhas de fluxo do material, evidenciando regiões com deformações elevadas próximas ao furo, as quais foram ocasionadas pelo deslocamento do punção durante o processo de furação. As durezas encontradas mostraram que a têmpera direta, ou seja, resfriamento em água logo após o processo de furação, gerou uma dureza mais elevada perto da face do furo do que a distâncias maiores do orifício. Isso pode ser benéfico para o componente, pois o aumento da dureza causa uma elevação no limite da tensão de escoamento do material, já que furos geralmente são concentradores de tensões que podem gerar trincas e ser o foco principal da falha do componente. A precisão dimensional evidenciada no trabalho demonstra que as tolerâncias atingidas são muito superiores às encontradas em processos de forjamento convencionais. Isto gera um potencial aumento na aplicabilidade da furação a quente em substituição à processos de usinagem como a furação com broca. Além deste fator, o puncionamento a altas temperaturas pode ser utilizado para diminuir o número de operações para a manufatura do

produto. Componentes que geralmente necessitam ser furados e que recebam tratamento térmico de têmpera, convencionalmente são num primeiro momento temperados para somente depois, através da furação com broca, gerar o orifício necessário. A utilização do processo de furação a quente e o resfriamento imediato logo após a perfuração, possibilita que uma operação seja retirada do processo de fabricação do componente. A consequência atrelada a isto seria a redução da quantidade de equipamentos necessários e também a diminuição do tempo total de manufatura. Evidentemente que, aliado a um controle eficiente de processo, a utilização da furação a quente reduziria o custo total de fabricação do produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM Handbook Committee, **“Forming and Forging”**, ASM International Handbook, Vol. 14, pp 997-1023, 1988.

Böhler Técnicas de Soldagens, **“Consumíveis para soldagem”**, catálogo UTP, 2011.

Dober Fixações, **“Catálogo molas prato”**, Disponível em <<http://www.dober.com.br/catalog.aspx?id=3>>. Acessado em 01/03/2011.

Flier Systems -ThermaCAM E300, **“Manual do utilizador”**, 2006

Klingenberg, W.; de Boer, T.W.; **“Condition-based maintenance in punching / blanking of sheet metal”**, International journal of machine tools & manufacture, 2008.

Luo, S.Y.; **“Effect of the geometry and the surface treatment of punching tool on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate”**, Journal of materials processing technology, 1999.

Meyer, L.W.; Weise, A.; Hahn, F.; **“Comparison of Constitutive Flow Curve Relations in Cold and Hot Forming”**, Technische Universitat Chemnitz-Zwickau, 1997.

Mori, K.; Saito, S.; Maki, S.; **“Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet”**, CIRP annals – manufacturing technology, 2008

Software QForm 3D v.5.1.1, QuatorForm, Copyright 2008-2011

Sasada, M.; Kobayashi, H.; Aoki, I.; **“Study on piercing mechanism of small holes”**, Journal of materials processing technology, 2006.

Schaeffer, L.; **“Conformação Mecânica”**, Imprensa Livre, 2ª Edição, 2004

Schaeffer, L.; **“Forjamento – Introdução ao Processo”**, Imprensa Livre, 2ª Edição, 2006.

Tschätsch, H.; **“Praxis der umformtechnik – arbeitsverfahren, maschinen, werkzeuge”**, Vieweg praxiswissen, 2005.

Wang, M.; Li, X.; Du, F.; Zheng, Y.; **“Hot deformation of austenite and prediction of microstructure evolution of cross-wedge rolling”**, Materials Science and Engineering, 2004.

ANEXO II

Simulações em elementos finitos geralmente requerem que sejam estabelecidos parâmetros que definam as condições de contorno do problema. Devido a isto, devem-se selecionar os parâmetros de entrada, as simplificações do modelo e as considerações do processo. O programa utilizado foi o Qform 3D, muito aplicado na indústria para simulações de forjamento em temperaturas que variam entre 800°C e 1250°C.

Na simulação, a chapa de 20 mm de espessura foi considerada com temperatura homogênea de 1100°C por toda sua espessura. O diâmetro do punção e da matriz são os mesmos utilizados no procedimento experimental. Contudo, o programa considera ambos indeformáveis durante o processo de conformação. Além disso, o alinhamento entre os dois eixos é considerado perfeito. Não foi considerado o efeito da força aplicada pelo prensa-chapas, porém, considerou-se que a chapa estava aprisionada entre uma matriz inferior e uma matriz superior imóveis. A velocidade do punção foi assumida como 5 mm/s durante todo o processo.

A aresta de corte da matriz com diâmetro de 20,7 mm e a aresta do punção de diâmetro 20,3 mm foram consideradas como cantos-vivos. Porém, esta é apenas uma simplificação já que a medida que o punção é utilizado, o gume cortante tende a formar um pequeno raio devido às tensões durante o processo serem extremamente elevadas nesta região.

Em virtude das propriedades dos materiais a altas temperaturas serem bastante influenciáveis por fatores como deformação e taxa de deformação, utiliza-se a Equação A.1 de Hessel and Spittel [Meyer et alli, 1997] para descrever a influência de tais fatores sobre as tensões induzidas no material, onde “ K_f ” é a resistência ao escoamento, “ A_0 ”, “ a_1 ”, “ a_2 ”, “ a_3 ” e “ a_4 ” são constantes do material, “ T ” é a temperatura, “ φ ” a deformação e “ $\dot{\varphi}$ ” a taxa de deformação.

$$k_f = A_0 \cdot \varphi^{a_1} \cdot e^{(a_4 \cdot \varphi)} \cdot \dot{\varphi}^{a_2} \cdot e^{(a_3 \cdot T)} \quad (\text{A.1})$$

Esta equação esta atrelada a cada elemento finito da análise e as constantes para o aço SAE 5140 são obtidas através de ensaios. Dentro do próprio programa são informadas as constantes deste material conforme Tabela A.1.

Tabela A.1. Constantes para a equação de Hessel and Spittel - SAE 5140 [Meyer et alli, 1997]

A_0	a_1	a_2	a_3	a_4
1620,466	0,17424	0,154	-0,00277	0

Na Figura A.2 é mostrado o avanço do punção sobre a chapa, e as tensões induzidas sobre o material. Pela simetria do processo de furação em relação ao eixo central do punção e matriz, somente foi necessário simular um lado. A curva de força x deslocamento desta simulação já foi mostrada na Figura 4.1. É importante salientar que a tensão máxima induzida na aresta de corte do punção não deve ser considerada como real, pois a medida que se refina malha de elementos finitos em cantos-vivos, a tensão tende a ir ao infinito. Por isso, as reais tensões induzidas sobre a chapas devem ser somente consideradas a certa distância do gume de corte. É facilmente notado que existe um campo de tensões entre as duas arestas e a medida que se aproxima do eixo central as deformação tendem a diminuir, pois o deslocamento do material que esta sendo desprendido se torno somente um movimento de corpo livre.

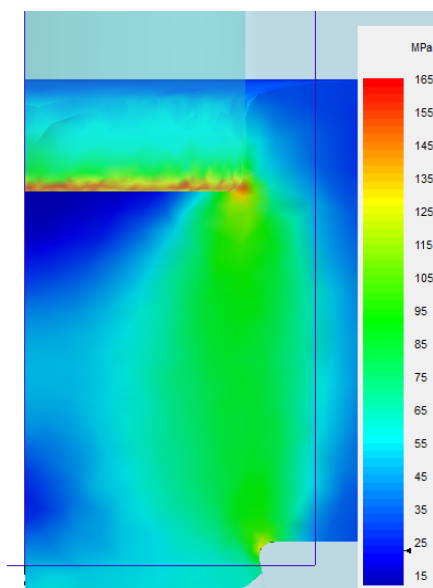


Figura A.2. Tensões principais induzidas no material da viga a 1100°C

Anexo III

O material desprendido durante a operação de furação a quente também deve ser analisado para compreender melhor o que ocorre durante o procedimento. Na Figuras A.3a e A.3b são mostradas claramente que praticamente pela totalidade da espessura há marcas verticais atribuídas ao processo de cisalhamento e sucessivo desprendimento do material. É somente encontrada uma pequena região de ruptura nas regiões superiores das amostras e uma saída de rebarba. O processo de furação a altas temperaturas impede que sejam criadas trincas na aresta de corte da matriz e sua subsequente programação.

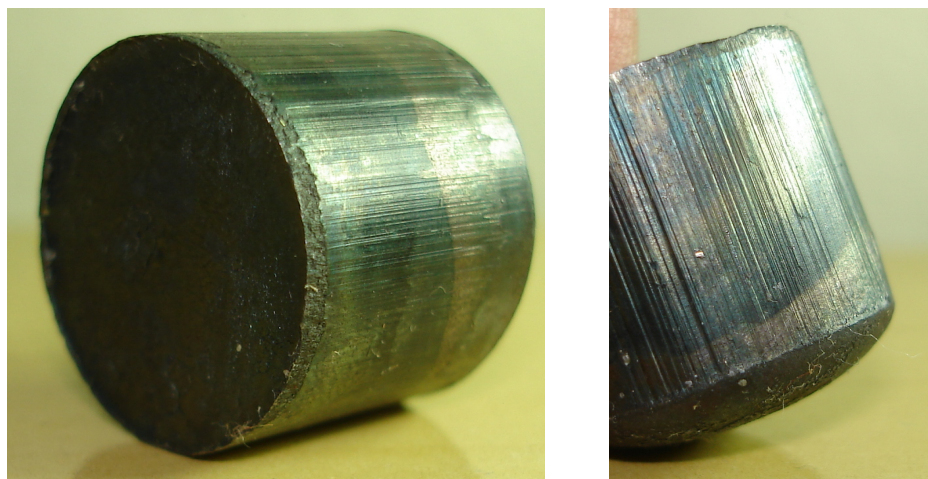


Figura A.3. Parte superior do material desprendido e pequena região de ruptura perto da superfície (a); vista das ranhuras formadas pelo processo sobre o material desprendido (b)

Assim como realizado para a região de indentação dos furos nas chapas, foi utilizado um perfilômetro a fim de avaliar a altura de rebarba de saída. Contudo, dependendo do ponto de medição, esta altura varia ou inexistente. Na Figura A.4 é mostrado perfil para a saída de rebarba mais saliente encontrada. Portanto, as alturas da rebarba encontradas foram inferiores a 0,37 mm. Estes valores devem ser semelhantes aos que seriam encontrados nas chapas antes do processo de jateamento.

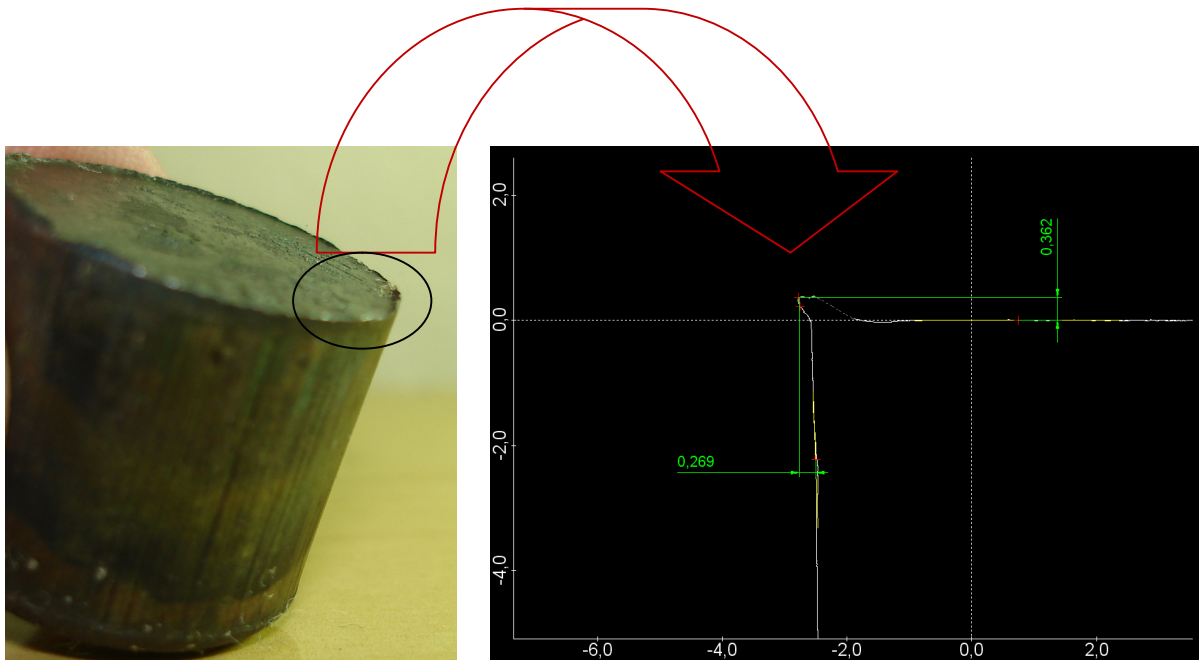


Figura A.4. Perfil da região da saída de rebarba do material desprendido; evidencia-se a maior altura encontrada